

# **DIMENSIONAMENTO DE PONTES METÁLICAS COM CONTRAVENTAMENTOS EM MADEIRA**

**JOEL FRANCISCO DE PAIVA MEDEIROS**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

---

Orientador: Professor Doutor Pedro Alvares Ribeiro Carmo Pacheco

---

Coorientador: Engenheira Ana Luísa Bordalo Maia Coelho

JULHO DE 2019

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2018/2019**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



[miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



[feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2018/2019 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

*“Ensinar não é transferir conhecimento,  
mas criar as possibilidades para a sua própria produção ou a sua construção.”*

*Paulo Freire*



## **AGRADECIMENTOS**

Servem as seguintes linhas para expressar de uma forma simples, o meu agradecimento perante as pessoas a seguir mencionadas.

Gostaria de agradecer à Engenheira Ana Coelho, pela sua colaboração no desenvolvimento deste trabalho, pela partilha de conhecimento, e pela paciência em determinados momentos.

Ao Professor Pedro Pacheco, pela sua motivação e apoio. Revelando ter sido importante e essencial.

Aos meus companheiros, André Nóbrega e Carlos Figueiredo. Foi um gosto ter partilhado as tantas horas de sofrimento ao longo deste percurso académico. Uma palavra especial para o meu amigo Carlos, pela motivação nata, e pela partilha numas tantas histórias.

Quero agradecer ao meu amigo André Martinho, pela influência positiva, pela assertividade e pela companhia em momentos chave no meu percurso. Um muito obrigado pela sua amizade.

Um obrigado, ao André Medeiros e Giovanna Veingartner, pela paciência, companhia e apoio. Obrigado pela vossa presença diária nestes últimos meses.

E claro está, o mais importante, um muito obrigado aos meus pais e avó. Pela educação, pelo conhecimento, pelos ensinamentos, pela convicção e por toda a confiança depositada nesta causa.

Uma palavra especial aos meus pais pelo exemplo de coragem e esforço que sempre me foi transmitido.



## RESUMO

O desenvolvimento contínuo da construção metálica, nas suas diversas vertentes, o que se aplica ao caso particular das pontes modulares, promove a constante procura de novas abordagens para aumentar a eficiência e a competitividade das soluções existentes. É nesse contexto que neste trabalho se estuda, se explora e se avalia uma solução técnica cuja a adoção não é corrente nem de uso generalizado.

Na construção de pontes metálicas modulares, por vezes as condições de projeto obrigam a soluções do tipo de estruturas apresentada no caso de estudo presente nesta dissertação, “*Half-Through Bridges*”. Este tipo de pontes, em determinadas circunstâncias, exigem uma grande quantidade de aço para resolver problemas de instabilidade à encurvadura impostos em elementos sujeitos a esforços de compressão.

É nestas circunstâncias que se enquadra o tema do presente trabalho, “*Dimensionamento de pontes metálicas com contraventamentos de madeira*”. Combinando estes dois materiais, de forma a reduzir a quantidade necessária de aço, e usando a madeira como elemento de contraventamento, são apresentadas três diferentes soluções.

Assim, a presente tese é um estudo sobre a adoção de contraventamentos de madeira em estruturas metálicas treliçadas. Depois da apresentação do estado da arte e da sumarização das principais regras de cálculo aplicáveis, é estudado um exemplo concreto de uma ponte metálica modular no qual se comparam soluções, nomeadamente:

- a) uma convencional integralmente em aço;
- b) outras alternativas, em tudo semelhantes, mas com a otimização da corda superior metálica adicionando um contraventamento em madeira.

São, na presente dissertação, comparados os resultados e estabelecidas as conclusões.

O Eurocódigo 3 e o Eurocódigo 5 dispõem de metodologias para a verificação da estabilidade destes elementos. Posto isto, a presente dissertação visa a verificação de instabilidade à encurvadura de elementos comprimidos, recorrendo a análises de 1.<sup>a</sup> e de 2.<sup>a</sup> ordem, de acordo com as referentes Normas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Encurvadura, Efeitos de 2.<sup>a</sup> ordem, Treliças Metálicas, Contraventamento, “*Half-Through Bridges*”



## ABSTRACT

The continuous development of metal construction, in your several strands, what applies in the particular case of the modular bridges, promotes the constantly demand of new approaches for increase the efficiency and the competitiveness of the existing solutions. It's in this context that this work is studied, explored and it's evaluated one technique solution which adoption is not common neither of use generalized.

In modular metallic bridges construction, sometimes design restrains lead to the use of solutions such as the ones which are the study object of this thesis, "Half-Through Bridges". This type of bridges, under certain circumstances, requires a high quantity of steel to deal with instability issues derived from buckling which is imposed by elements submitted to compression.

The present work "Dimensionamento de pontes metálicas com contraventamentos de madeira" fits in these circumstances. By combining two materials, adding wood as bracing elements in order to reduce the use of steel, three different solutions are presented.

Thus, the present dissertation consists on a study on the application of wood bracings on trussed metallic structures. After the state of art presentation and the establishment of most relevant applicable design procedures, a modular bridge example is studied where solutions are compared, namely:

- a) the first is a conventional metallic modular bridge;
- b) the other are similar solutions where wood bracings are used to optimize the metallic superior chord of the structure.

In the end results are compared and conclusions are established.

Eurocode 3 and Eurocode 5 present the verification methodologies to assess the stability of such elements. As so, the buckling effect due to the compressed elements is assessed in this thesis, using 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> order analysis.

**KEYWORDS:** Buckling effect, 2.<sup>a</sup> order effects, Metallic Truss, Bracing, "Half-Through Bridges"



ÍNDICE GERAL

|                                                        |            |
|--------------------------------------------------------|------------|
| <b>AGRADECIMENTOS .....</b>                            | <b>V</b>   |
| <b>RESUMO .....</b>                                    | <b>VII</b> |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                   | <b>IX</b>  |
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                               | <b>1</b>   |
| 1.1. ENQUADRAMENTO DA TESE .....                       | 1          |
| 1.2. OBJETIVOS.....                                    | 2          |
| 1.3. ESTRUTURA DA TESE .....                           | 2          |
| <b>2 ESTADO DA ARTE .....</b>                          | <b>5</b>   |
| 2.1. INTRODUÇÃO .....                                  | 5          |
| 2.2. ESTRUTURAS TRELIÇADAS METÁLICAS .....             | 5          |
| 2.2.1. Definição de treliça .....                      | 5          |
| 2.2.2. Treliça: configuração geral e terminologia..... | 6          |
| 2.2.3. Tipos de treliça .....                          | 7          |
| 2.2.4. Análise de uma treliça .....                    | 8          |
| 2.2.4.1. Determinação estática .....                   | 9          |
| 2.3. PONTES TRELIÇADAS METÁLICAS .....                 | 13         |
| 2.3.1. Enquadramento.....                              | 13         |
| 2.3.2. Funcionamento estrutural .....                  | 14         |
| 2.3.2.1. Ponte treliçada do tipo “Half-Through” .....  | 15         |
| 2.3.2.2. Contraventamentos.....                        | 18         |
| 2.4. ESTRUTURAS MISTAS AÇO-MADEIRA.....                | 21         |
| 2.4.1. Considerações gerais.....                       | 21         |
| 2.4.2. Exemplos de estruturas mistas aço-madeira.....  | 23         |
| <b>3 ENQUADRAMENTO REGULAMENTAR.....</b>               | <b>27</b>  |
| 3.1. INTRODUÇÃO .....                                  | 27         |
| 3.2. EUROCÓDIGO 3 - PROJETO DE ESTRUTURAS DE AÇO.....  | 27         |
| 3.2.1. Análise de estruturas metálicas .....           | 28         |
| 3.2.1.1. Análise global de elementos comprimidos.....  | 29         |
| 3.2.1.2. Imperfeições.....                             | 30         |
| 3.2.1.3. Estabilidade das estruturas .....             | 32         |
| 3.2.2. Resistência dos elementos à encurvadura.....    | 33         |

|                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.2.1. Análise local de elementos comprimidos .....                                                          | 33        |
| 3.2.2.2. Verificação da resistência à encurvadura devido à compressão .....                                    | 35        |
| 3.2.2.3. Verificação da resistência à encurvadura devido à flexão .....                                        | 36        |
| 3.2.2.4. Verificação da resistência à encurvadura de elementos uniformes em flexão composta por compressão ... | 39        |
| 3.3. EUROCÓDIGO 5 - PROJETO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA .....                                                     | 40        |
| 3.3.1. Enquadramento .....                                                                                     | 41        |
| 3.3.2. Tipos e resistências de madeira .....                                                                   | 41        |
| 3.3.3. Verificação de segurança – elementos comprimidos .....                                                  | 43        |
| <b>4 CASO DE ESTUDO .....</b>                                                                                  | <b>47</b> |
| 4.1. INTRODUÇÃO .....                                                                                          | 47        |
| 4.2. APRESENTAÇÃO GERAL DO CASO DE ESTUDO – PONTE MB36 .....                                                   | 47        |
| 4.2.1. Condicionamentos e requisitos .....                                                                     | 48        |
| 4.2.2. Solução estrutural .....                                                                                | 50        |
| 4.2.3. Processo e faseamento construtivo .....                                                                 | 52        |
| 4.3. CRITÉRIOS DE PROJETO .....                                                                                | 53        |
| 4.3.1. Ações e combinações de ações .....                                                                      | 53        |
| 4.3.1.1. Ações permanentes .....                                                                               | 53        |
| 4.3.1.2. Ações variáveis .....                                                                                 | 53        |
| 4.3.1.3. Combinações de Ações .....                                                                            | 55        |
| 4.3.2. Verificação de segurança .....                                                                          | 56        |
| 4.4. MODELAÇÃO ESTRUTURAL .....                                                                                | 57        |
| 4.5. ELEMENTOS CONDICIONADOS PELA ENCURVADURA .....                                                            | 58        |
| <b>5 ANÁLISE DE SOLUÇÕES ALTERNATIVAS .....</b>                                                                | <b>61</b> |
| 5.1. APRESENTAÇÃO DE SOLUÇÕES ALTERNATIVAS .....                                                               | 61        |
| 5.1.1. V0.1 – modelo com cordas rodadas .....                                                                  | 61        |
| 5.1.2. V1.0 – modelo contraventado (prolongamento da travessa metálica) .....                                  | 64        |
| 5.1.3. V1.1 – modelo contraventado (madeira) .....                                                             | 66        |
| 5.1.4. V2.0 – modelo contraventado (diagonais à corda superior) .....                                          | 69        |
| 5.2. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DA CORDA SUPERIOR .....                                                    | 71        |
| 5.2.1. Análises globais elásticas .....                                                                        | 71        |
| 5.2.2. Cálculo das Imperfeições .....                                                                          | 75        |
| 5.2.2.1. Imperfeição geométrica global da estrutura .....                                                      | 76        |
| 5.2.2.2. Imperfeição geométrica local do elemento .....                                                        | 78        |

|                                                                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.3. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS EM MADEIRA .....                                                               | 80        |
| <b>6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>                                                                              | <b>83</b> |
| 6.1. INTRODUÇÃO .....                                                                                                            | 83        |
| 6.2. DIMENSIONAMENTO DA CORDA SUPERIOR .....                                                                                     | 83        |
| 6.2.1. Verificações Estruturais .....                                                                                            | 83        |
| 6.2.1.1. Verificação da resistência à encurvadura por compressão.....                                                            | 83        |
| 6.2.1.2. Verificação da resistência à encurvadura por flexão.....                                                                | 84        |
| 6.2.1.3. Verificação da resistência à encurvadura por flexão composta com compressão .....                                       | 86        |
| 6.2.1.4. Resumo da verificação da resistência à encurvadura por flexão composta com compressão para as diferentes análises ..... | 86        |
| 6.2.2. Análise Equivalente.....                                                                                                  | 87        |
| 6.2.2.1. Resumo dos resultados das análises (1º modo de encurvadura) .....                                                       | 88        |
| 6.3. DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS EM MADEIRA .....                                                                              | 89        |
| 6.4. QUANTIDADES DE MATERIAL (AÇO E MADEIRA) DAS SOLUÇÕES ESTUDADAS .....                                                        | 91        |
| <b>7 CONCLUSÕES.....</b>                                                                                                         | <b>93</b> |
| 7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....                                                                                                  | 93        |
| 7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....                                                                                              | 94        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                                                                           | <b>97</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                                                                                                              | <b>99</b> |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 - (A) Viga. (B) Treliza.[2] .....                                                                                                                                | 6  |
| Figura 2.2 - Terminologia de uma treliza.[5] .....                                                                                                                          | 7  |
| Figura 2.3 - Tipos de treliza com banzos paralelos.[5] .....                                                                                                                | 7  |
| Figura 2.4 - Elemento básico de uma treliza.[8] .....                                                                                                                       | 8  |
| Figura 2.5 - Construção real de uma treliza.[8] .....                                                                                                                       | 9  |
| Figura 2.6 - Equilíbrio do nó de uma treliza.[8] .....                                                                                                                      | 10 |
| Figura 2.7 - Construção de uma treliza Warren.[8] .....                                                                                                                     | 10 |
| Figura 2.8 - Aplicação do teste de determinação estática.[8] .....                                                                                                          | 11 |
| Figura 2.9 - Análise de uma treliza Warren.[8] .....                                                                                                                        | 12 |
| Figura 2.10 - Aplicação do método de Ritter.[8] .....                                                                                                                       | 12 |
| Figura 2.11 - Equilíbrio da secção de uma treliza.[8] .....                                                                                                                 | 13 |
| Figura 2.12 - Tipos de treliza de acordo com a posição do pavimento. (A) “Through Truss”. (B) “Half-Through bridges” ou “Pony Truss”. (C) “Deck Truss”. .....               | 14 |
| Figura 2.13 - Forças axiais numa ponte em treliza. (A) Treliza Pratt. (B) Treliza Warren.[3] .....                                                                          | 15 |
| Figura 2.14 - Secção U de uma ponte trelizada “Half-Through”. [10] .....                                                                                                    | 16 |
| Figura 2.15 - Secção H de uma ponte trelizada “Half-Through”. [10] .....                                                                                                    | 16 |
| Figura 2.16 - Modo de encurvadura da corda superior de uma ponte trelizada “Half-Through Truss”. [12] .....                                                                 | 17 |
| Figura 2.17 - Ponte trelizada metálica do tipo “Half-Through”. Clague Park in Westlake, OH [10] .....                                                                       | 17 |
| Figura 2.18 - Ponte trelizada metálica do tipo “Half-Through”. Esposende - Fão, Portugal. ....                                                                              | 18 |
| Figura 2.19 - Sistemas de contraventamento. [12] .....                                                                                                                      | 19 |
| Figura 2.20 - Sistemas de contraventamento torsional. [12] .....                                                                                                            | 19 |
| Figura 2.21 - Ação estrutural do contraventamento torsional. [12] .....                                                                                                     | 20 |
| Figura 2.22 - Ação estrutural do sistema de contraventamento de uma secção U. [12] .....                                                                                    | 21 |
| Figura 2.23 - Orientação e direções de uma peça de madeira. [13] .....                                                                                                      | 22 |
| Figura 2.24 - <i>Flitch Beam</i> . [14] .....                                                                                                                               | 22 |
| Figura 2.25 - Estrutura mista aço-madeira- Pilares em aço, vigas e contraventamentos em madeira, - <i>Rupert Station – Vancouver, British Colombia, Canada</i> . [16] ..... | 24 |
| Figura 2.26 - Pormenor de ligação de uma treliza mista. [15] .....                                                                                                          | 25 |
| Figura 2.27 - Pormenor de ligação de uma treliza mista. [15] .....                                                                                                          | 26 |
| Figura 2.28 - Pormenor do sistema roscado de introdução de tensão. [15] .....                                                                                               | 26 |
| Figura 3.1 - Efeitos de segunda ordem. ....                                                                                                                                 | 30 |
| Figura 3.2 - Substituição das imperfeições iniciais por forças horizontais equivalentes. [17] .....                                                                         | 31 |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.3 - Forças estilizador equivalente.....                                                                | 32 |
| Figura 3.4 - Relação $\sigma$ - $\lambda$ de um elemento linear comprimido.[18] .....                           | 34 |
| Figura 3.5 - (a)Encurvadura por torção. (b) Encurvadura flexão-torção. [18] .....                               | 34 |
| Figura 3.6 - Comprimento de encurvadura LE em função do comprimento L.[18] .....                                | 35 |
| Figura 3.7 - Curvas de encurvadura.[17] .....                                                                   | 36 |
| Figura 3.8 - Algoritmo para verificação da resistência à encurvadura por compressão. ....                       | 36 |
| Figura 3.9 - Efeito da encurvadura lateral numa viga não restringida lateralmente.[19] .....                    | 38 |
| Figura 3.10 - Algoritmo para a verificação da resistência à encurvadura por flexão-torção.....                  | 39 |
| Figura 3.11 - Algoritmo para a verificação da resistência à encurvadura.....                                    | 40 |
| Figura 4.1 - Modelo 3D da ponte MB36.....                                                                       | 47 |
| Figura 4.2 - Montagem do módulo.....                                                                            | 48 |
| Figura 4.3 - Inspeção de soldaduras. ....                                                                       | 49 |
| Figura 4.4 - Vista geral do módulo central. ....                                                                | 49 |
| Figura 4.5 - Pré-montagem da ponte MB36 em fábrica.....                                                         | 50 |
| Figura 4.6 - Vista da ponte MB36 após pré-montagem em fábrica.....                                              | 50 |
| Figura 4.7 - Vista em alçado da ponte MB36 e designação dos módulos que a constituem.....                       | 51 |
| Figura 4.8 – Vista em planta da ponte MB36. ....                                                                | 51 |
| Figura 4.9 - Corte transversal tipo. ....                                                                       | 51 |
| Figura 4.10 - Pré-montagem da ponte MB36 e do nariz de lançamento. ....                                         | 52 |
| Figura 4.11 - Lançamento com recurso a estrutura auxiliar denominada de nariz de lançamento da ponte MB36. .... | 52 |
| Figura 4.12 - Esquema da carga móvel.....                                                                       | 54 |
| Figura 4.13 - Representação da carga “Tandem”. ....                                                             | 54 |
| Figura 4.14 - AASTHO Ponto 3.6.1.1.2 – Multiple Presence of Live Load. ....                                     | 54 |
| Figura 4.15 - AASTHO Ponto 3.6.2 – Dynamic Load Allowance: IM.....                                              | 55 |
| Figura 4.16 - Fatores de carga para cargas permanentes.....                                                     | 56 |
| Figura 4.17 - Vista 3D do modelo inicial. ....                                                                  | 57 |
| Figura 4.18 - Vista em alçado do modelo inicial.....                                                            | 57 |
| Figura 4.19 - Vista em secção do modelo inicial. ....                                                           | 57 |
| Figura 4.20 - Tipo de ligação usado nos elementos diagonais da estrutura.....                                   | 58 |
| Figura 4.21 - Forças internas nos montantes e diagonais do modelo inicial. ....                                 | 59 |
| Figura 4.22 - Forças internas nas cordas, superior e inferior, do modelo inicial.....                           | 59 |
| Figura 4.23 - 1.º Modo de encurvadura global do modelo V0.0 ( $\alpha_{cr} = 6,65$ ).....                       | 60 |
| Figura 5.1 - Imagem 3D do modelo V0.1. ....                                                                     | 62 |

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5.2 - Vista da secção do modelo V0.1.....                                                                                     | 62 |
| Figura 5.3 - Vista em pormenor dos perfis rodados e respetiva identificação. Modelo V0.1.....                                        | 63 |
| Figura 5.4 - Momento instalado na corda superior do modelo V0.1.....                                                                 | 63 |
| Figura 5.5 - 1.º Modo de encurvadura global do modelo V0.1 ( $\alpha_{cr} = 4,19$ ). ....                                            | 64 |
| Figura 5.6 - Vista 3D do modelo V1.0.....                                                                                            | 64 |
| Figura 5.7 - Vista em secção do modelo V1.0.....                                                                                     | 64 |
| Figura 5.8 - Tipo de ligação, articulada, no elemento de madeira do modelo V1.0. ....                                                | 65 |
| Figura 5.9 - Esforços impostos ao elemento de madeira. Modelo V1.0. ....                                                             | 65 |
| Figura 5.10 - Esquema do comportamento da travessa no modelo V1.0.....                                                               | 66 |
| Figura 5.11 - 1.º Modo de encurvadura global do modelo V1.0 ( $\alpha_{cr} = 4,65$ ).....                                            | 66 |
| Figura 5.12 - Imagem 3D do modelo V1.1. ....                                                                                         | 67 |
| Figura 5.13 - Subestrutura, em madeira, usada no modelo V1.1.....                                                                    | 67 |
| Figura 5.14 - Tipo de ligação usado e respetivo detalhe da ligação aço-madeira, com rotação livre...68                               |    |
| Figura 5.15 - Momento fletor nas cordas inferior, em aço, e na corda de madeira do modelo V1.1.....                                  | 68 |
| Figura 5.16 - 1.º Modo de encurvadura global do modelo V1.1 ( $\alpha_{cr} = 4,51$ ).....                                            | 69 |
| Figura 5.17 - Imagem 3D do modelo V2.0. ....                                                                                         | 69 |
| Figura 5.18 - Vista em secção do modelo V2.0.....                                                                                    | 69 |
| Figura 5.19 - Pormenor do sistema, em madeira, usado.....                                                                            | 70 |
| Figura 5.20 - Tipo de ligações usadas no modelo V2.0.....                                                                            | 71 |
| Figura 5.21 - 1.º Modo de encurvadura global do modelo V2.0 ( $\alpha_{cr} = 4,80$ ).....                                            | 71 |
| Figura 5.22 - Representação das forças equivalentes aplicadas nos nós da corda superior de 1,4m em 1,4m no programa de cálculo. .... | 75 |
| Figura 5.23 - Escolha da curva de encurvadura em função da secção transversal para perfis laminados. ....                            | 78 |
| Figura 6.1 - Gráfico com os respetivos pesos discriminados de cada modelo. (kg) .....                                                | 91 |



## ÍNDICE DE QUADROS

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 3.1 - Valores de cálculo das amplitudes das imperfeições locais $e_0/L$ para elementos.[17]....                         | 31 |
| Quadro 3.2 - Fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura.[17].....                                                    | 35 |
| Quadro 3.3 - Valores recomendados dos fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura lateral.[17].....                   | 37 |
| Quadro 3.4 - Curvas de encurvadura lateral recomendadas para as secções transversais quando utilizada a Equação 3.19[17] ..... | 37 |
| Quadro 3.5 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira para estruturas (resinosas).[21] .....                                | 42 |
| Quadro 3.6 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira para estruturas (folhosas).[21] .....                                 | 42 |
| Quadro 3.7 - Propriedades mecânicas de madeira lamelada colada.[21] .....                                                      | 43 |
| Quadro 3.8- Valores atribuídos ao $k_{mod}$ . ....                                                                             | 46 |
| Quadro 5.1 - Exemplo da folha de cálculo das forças equivalentes. ....                                                         | 73 |
| Quadro 5.2 - Valores da amplitude máxima do deslocamento inicial da corda superior $e_0$ . ....                                | 74 |
| Quadro 5.3 - Valores do fator de amplificação a tomar para os diferentes modelos. ....                                         | 74 |
| Quadro 5.4 - Características geométricas dos perfis usados na corda superior nos diferentes modelos. ....                      | 75 |
| Quadro 5.5 - Fator $\alpha_{cr}$ correspondente aos casos de carga críticos. ....                                              | 76 |
| Quadro 5.6 - Comprimentos de encurvadura globais, dos diferentes modelos. ....                                                 | 76 |
| Quadro 5.7 - Curvas de encurvadura e fator de imperfeição de acordo com a respetiva direção. ....                              | 77 |
| Quadro 5.8 - Deslocamento máximo horizontal .....                                                                              | 77 |
| Quadro 5.9 - Curvas de encurvadura e fator de imperfeição. ....                                                                | 78 |
| Quadro 5.10 - Cálculo dos comprimentos de encurvadura para os casos mais críticos de cada modelo. ....                         | 79 |
| Quadro 5.11 - Cálculo do coeficiente de redução. ....                                                                          | 79 |
| Quadro 5.12 - Valores característicos dos elementos de madeira. ....                                                           | 80 |
| Quadro 5.13 – Propriedades seccionais. ....                                                                                    | 81 |
| Quadro 6.1 - Resistência à encurvadura por compressão. ....                                                                    | 84 |
| Quadro 6.2 - Rácios de resistência à encurvadura por compressão. ....                                                          | 84 |
| Quadro 6.3 - Coeficientes $C_1$ e Momento Crítico. ....                                                                        | 85 |
| Quadro 6.4 - Resistência à encurvadura por flexão. ....                                                                        | 85 |
| Quadro 6.5 - Rácios de resistência à encurvadura por flexão. ....                                                              | 85 |
| Quadro 6.6 - Coeficientes de momentos uniformes equivalentes. ....                                                             | 85 |
| Quadro 6.7 - Fatores de interação $k_{ij}$ . ....                                                                              | 85 |
| Quadro 6.8 - Rácios finais de resistência à encurvadura. ....                                                                  | 86 |

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 6.9 – Resumo da verificação da resistência à encurvadura para as diferentes análises..... | 86 |
| Quadro 6.10 – Resultados das várias análises (1ª modo de encurvadura).....                       | 88 |
| Quadro 6.11 - Esforços impostos nos elementos de madeira. ....                                   | 89 |
| Quadro 6.12 - Valores de cálculo de resistência, dos elementos em madeira. ....                  | 89 |
| Quadro 6.13 - Dados para o cálculo da resistência à encurvadura.....                             | 90 |
| Quadro 6.14 - Resumo do cálculo de elementos de madeira comprimidos. ....                        | 90 |
| Quadro 6.15 – Pesos finais correspondentes a cada modelo.....                                    | 91 |

**SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

LRFD – Load and Resistance Factor Design

EN – Norma Europeia

EC3 – Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço

EC5 – Eurocódigo 5 – Projeto de estruturas de madeira

ETA – Aprovação Técnica Europeia

ETAG – Guia de Aprovação Técnica Europeia

- **AÇOS**

$\bar{\lambda}_{LT}$  - Esbelteza normalizada para a encurvadura lateral

$\bar{\lambda}_T$  - Esbelteza normalizada associada à encurvadura de colunas por torção ou flexão-torção

$\Delta M_{y,Ed}$  - Momento devido ao afastamento do eixo baricêntrico y-y

$\Delta M_{z,Ed}$  - Momento devido ao afastamento do eixo baricêntrico z-z

$\Phi_{LT}$  - Valor para determinar o coeficiente de redução  $\chi_{LT}$

$M_{Ed}$  - Valor de cálculo do momento fletor atuante

$M_{Rk}$  - Valor característico do momento fletor resistente da secção transversal condicionante

$M_{b,Rd}$  - Valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral (de vigas por flexão torção)

$M_{cr}$  - Momento crítico elástico de encurvadura lateral

$M_{y,Ed}$  - Valor de cálculo do momento fletor atuante, em relação ao eixo y-y

$M_{y,Rd}$  - Valor de cálculo do momento fletor resistente, em relação ao eixo y-y

$M_{z,Ed}$  - Valor de cálculo do momento fletor atuante, em relação ao eixo x-x

$M_{z,Rd}$  - Valor de cálculo do momento fletor resistente, em relação ao eixo x-x

$N_{Ed}$  - Valor de cálculo do esforço normal atuante

$N_{Rd}$  - Valores de cálculo do esforço normal resistente

$N_{Rk}$  - Valor característico do esforço normal resistente da secção transversal condicionante

$N_{b,Rd}$  - Valor de cálculo do esforço normal resistente à encurvadura de um elemento comprimido

$N_{cr}$  - Valor crítico do esforço normal para o modo de encurvadura elástica considerado, determinado com base nas propriedades da secção transversal bruta

$W_{el}$  - Módulo de flexão elástico de uma secção transversal

$W_{pl}$  - Módulo de flexão plástico de uma secção transversal

$e_0$  - Amplitude de uma imperfeição de um elemento

$f_y$  - Tensão de cedência

$k_{yy}; k_{yz}; k_{zy}; k_{zz}$  - Fatores de interação

$r_1$  - Raio de concordância

$r_2$  - Raio de bordo

$t_f$  - Espessura do banzo

$t_w$  - Espessura da alma

$\alpha_h$  - Coeficiente de redução para tomar em consideração a altura  $h$  do pórtico

$\alpha_{LT}$  - Fator de imperfeição para a encurvadura lateral

$\alpha_{cr}$  - Fator pelo qual as ações de cálculo teriam que ser multiplicadas para provocar a instabilidade elástica num modo global

$\alpha_m$  - Coeficiente de redução para tomar em consideração o número de colunas num alinhamento

$\gamma_{M0}$  - Coeficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais de qualquer classe

$\gamma_{M1}$  - Coeficiente parcial de segurança para a resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura, avaliada através de verificações individuais de cada elemento

$\gamma_{M2}$  - Coeficiente parcial de segurança para a resistência à rotura de secções transversais tracionadas em zonas com furos de ligação

$\bar{\lambda}$  - Esbelteza normalizada

$\lambda_1$  - Valor da esbelteza de referência para determinar a esbelteza normalizada

$\chi_{LT}$  - Coeficiente de redução para a encurvadura lateral

$\chi_y$  - Coeficiente de redução associado à encurvadura por flexão em torno do eixo y-y

$\chi_z$  - Coeficiente de redução associado à encurvadura por flexão em torno do eixo z-z

$\phi_0$  - Valor de base da imperfeição inicial global associada à falta de verticalidade

$A$  - área de uma secção transversal

$b$  - Largura de uma secção transversal

$d$  - Altura da parte reta de uma alma

$E$  - Módulo de elasticidade

$G$  - Módulo de distorção

$h$  - Altura de uma secção transversal

$I$  - Momento de inércia

$t$  - Espessura

$x-x$  - Eixo longitudinal de um elemento

$y-y$  - Eixo de uma secção transversal

$z-z$  - Eixo de uma secção transversal

$L$  - Comprimento de um elemento

$\alpha$  - Fator de imperfeição

$\varepsilon$  - Fator que depende de  $f_y$

$\iota$  - Raio de giração relativo ao eixo considerado, determinado com base nas propriedades da secção transversal bruta

$\sigma$  - Tensão

$\chi$  - Coeficiente de redução associado ao modo de encurvadura considerado

$\phi$  - Imperfeição inicial global associada à falta de verticalidade

• **MADEIRAS**

$L_{v,y}$  - Comprimento de encurvadura para flexão em torno do eixo y-y

$L_{v,z}$  - Comprimento de encurvadura para flexão em torno do eixo z-z

$f_{c,0,d}$  - Valor de cálculo de resistência à compressão na direcção do fio

$f_{c,0,k}$  - Valor característico de tensão resistente à compressão paralela às fibras

$f_{m,y,d}$  - Valor de cálculo da resistência à flexão em relação ao eixo y principal

$f_{m,z,d}$  - Valor de cálculo da resistência à flexão em relação ao eixo z principal

$i_y$  - Raio de giração relativo ao eixo y-y

$i_z$  - Raio de giração relativo ao eixo z-z

$k_{c,y}$  - Fator de instabilidade relativo ao eixo z-z

$k_{c,z}$  - Fator de instabilidade relativo ao eixo z-z

$k_m$  - Parâmetro para ensaios de flexão a diversos teores de água

$k_{mod}$  - Fator de modificação de resistência

$k_y$  - Fator de correcção

$k_z$  - Fator de correcção

$\beta_c$  - Fator de retidão de um elemento de madeira

$\gamma_M$  - Coeficiente parcial de segurança para uma propriedade de um material

$\lambda_{rel,y}$  - Esbelteza relativa referente ao eixo y-y

$\lambda_{rel,z}$  - Esbelteza relativa referente ao eixo z-z

$\lambda_y$  - Esbelteza referente ao eixo y-y

$\lambda_z$  - Esbelteza referente ao eixo x-x

$\sigma_{c,0,d}$  - Valor de cálculo da tensão normal à compressão na direcção do fio

$\sigma_{m,y,d}$  - Valor de cálculo da tensão normal à flexão em relação ao eixo y principal

$\sigma_{m,z,d}$  - Valor de cálculo da tensão normal à flexão em relação ao eixo x principal

A - Área de uma secção transversal

E - Módulo de elasticidade

G - Módulo de distorção

I - Momento de inércia



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO DA TESE

Nesta dissertação final, referente ao Mestrado do Curso de Engenharia Civil na especialização de Estruturas, intitulada “*Dimensionamento de Pontes Metálicas com Contraventamentos de Madeira*”, é estudado o comportamento estrutural de uma ponte metálica com contraventamentos em madeira, tendo por base os Eurocódigos estruturais referentes a estes dois materiais.

A madeira é um material que acompanha a história da humanidade até aos dias de hoje. Mesmo antes da idade da pedra, do bronze e do ferro, a madeira já estava presente na vida do Homem, como material não só estrutural, mas também para diversas outras finalidades, entre as quais a produção de energia.

Segundo Calil[1], o sistema de vencer o vão pela força é marcado pela solução de usar madeira para atravessar um determinado obstáculo. Este sistema baseava-se numa peça de madeira retilínea onde a altura da secção garantia o suporte das cargas e do peso para a travessia de pessoas e animais. Com a necessidade de ultrapassar os referidos obstáculos o homem passou a utilizar passagens primitivas de madeira, sendo estas formadas por troncos de árvores que funcionavam como vigas. Para a continuidade da humanidade os obstáculos a ultrapassar começam a ser maiores, levando à necessidade de aperfeiçoar as técnicas de construção, motivando assim o aparecimento das pontes de madeira.

Com a evolução, o desenvolvimento de técnicas de construção mais ambiciosas permitem o aumento das dimensões destas estruturas. Consequentemente materiais mais nobres são introduzidos, tais como o metal, que tem uma grande capacidade de carga para além de permitir uma diminuição do peso próprio da estrutura e um melhor controlo e uma melhor facilidade construtiva.

A treliça é um bom exemplo no que se refere à diminuição de peso da estrutura, sendo esta formada por unidades triangulares permite uma diminuição do peso próprio da estrutura.

No entanto, as elevadas propriedades físicas e mecânicas do aço podem levar a que as estruturas metálicas sejam por vezes condicionadas por fenómenos de instabilidade e de deformação. No âmbito desta dissertação, é dada especial atenção aos fenómenos de encurvadura devida à compressão, ou seja aos elementos que sob esforços axiais instabilizam antes de esgotarem toda a capacidade do aço ( $f_{yd}$ ). Quando contraventados esta instabilidade deixa de condicionar ou é bastante diminuída. Neste contexto, a tese é direccionada para a aplicação da solução de contraventamentos em madeira a um caso particular de uma ponte metálica, avaliando a sua viabilidade técnica e o consumo de materiais.

## 1.2. OBJETIVOS

Com este trabalho pretende-se estudar o dimensionamento de uma ponte metálica com contraventamentos em madeira, utilizando as respetivas metodologias, especificações e disposições presentes nas Normas Europeias, mais concretamente os Eurocódigos 3 e 5.

Para tal é necessário também conhecer e compreender com maior detalhe uma estrutura em treliça, as suas interações internas e externas, para que seja possível um dimensionamento final dos elementos comprimidos, sejam eles em madeira ou em aço. É importante, também, a análise de soluções já concebidas para um melhor conhecimento do funcionamento conjunto destes dois materiais.

Deste modo, os objetivos a atingir na presente tese são os seguintes:

- Estudo de estruturas treliçadas metálicas;
- Enquadramento regulamentar de dimensionamento estabelecido no Eurocódigo;
- Análise de um caso de estudo;
- Identificação de elementos condicionados pela encurvadura;
- Dimensionamento de elementos metálicos comprimidos contraventados por elementos de madeira;
- Dimensionamento de elementos de madeira para contraventar a estrutura.

O “*Robot Structure Analysis Professional*” é usado como principal ferramenta no cálculo das diversas soluções e avaliação da sua viabilidade.

## 1.3. ESTRUTURA DA TESE

O presente documento está dividido em 7 capítulos, ordenados segundo uma sequência lógica e objetiva. Seguidamente, descrevem-se sumariamente os referidos capítulos.

No capítulo 1 são apresentadas as condições de enquadramento do tema desta tese, os seus objetivos e a sua estruturação.

O capítulo seguinte, capítulo 2, é iniciado por uma breve definição do conceito “treliça”, sendo de seguida apresentados alguns dos tipos de treliça mais usuais no projeto de pontes. Ainda neste capítulo são apresentados três tipos de pontes em treliça, dando especial atenção ao tipo “*Half-Through Truss*” que, como vai ser possível observar mais a frente, está diretamente relacionado com o caso de estudo da presente dissertação. Por fim é apresentado o estado de arte de estruturas mistas Aço-Madeira.

No capítulo 3 é apresentada somente a abordagem dos Eurocódigos a elementos estruturais sujeitos a fenómenos de encurvadura, quer para estruturas metálicas (EC3) quer para estruturas de madeira (EC5). Com efeito, tendo em consideração o âmbito da tese – contraventamento de elementos comprimidos em pontes metálicas através de elementos de madeira – neste capítulo são unicamente abordados os métodos presentes nestas Normas Europeias que servem de base para o dimensionamento à encurvadura de elementos comprimidos.

No capítulo 4 é apresentado o caso de estudo - Ponte modular metálica MB36 - que vence um vão de 36,4 metros. Neste capítulo são enumerados, quer os condicionalismos e requisitos técnicos a respeitar, quer os critérios de projeto definidos (ações, combinações e verificações de segurança) no cálculo da ponte. Ainda neste capítulo são identificados os elementos comprimidos condicionados pela encurvadura que estão na origem das soluções alternativas apresentadas no capítulo seguinte.

No capítulo 5 é feita uma apresentação de quatro soluções alternativas, fazendo referência a determinados aspetos e particularidades de cada uma delas. De seguida é apresentada a metodologia usada para o cálculo dos elementos da corda superior, na qual são efetuadas quatro análises progressivas e adicionalmente uma análise equivalente. Por fim é, de igual forma, apresentada a metodologia usada no dimensionamento dos elementos de madeira.

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos nas diferentes análises realizadas. Estes resultados são fruto do dimensionamento da corda superior e do dimensionamento dos elementos de contraventamento em madeira, apresentados no capítulo anterior. Finalizado o dimensionamento, são apresentadas e comparadas as quantidades de material (aço e madeira), obtidas em cada uma das soluções apresentadas. Por último é seleccionada a solução mais vantajosa tendo em conta os aspetos económicos (usando como base apenas o peso dos diferentes materiais), e os aspetos estruturais.

No último capítulo, capítulo 7, são apresentadas as diversas conclusões, não só da solução considerada como mais vantajosa, mas também das análises realizadas e decisões tomadas ao longo da modelação e dimensionamento dos diversos modelos. São também apresentados, neste capítulo, alguns desenvolvimentos futuros.



## 2

# ESTADO DA ARTE

### 2.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo é, inicialmente, de uma forma sintética e objetiva, abordado o conceito de treliça, assim como a sua configuração e terminologia. É também apresentada de uma forma expedita o método de cálculo desta configuração estrutural.

Esta abordagem inicial do conceito de treliça tem como objetivo o enquadramento estrutural dos diferentes tipos de pontes metálicas em treliça que se realiza na continuidade deste capítulo.

Considera-se fora do âmbito desta dissertação mencionar outro tipo de estruturas metálicas em treliça que não sejam pontes. Mencionando de seguida três configurações diferentes de pontes em treliça, dando maior relevância às “*Half-Through Truss*”, pois é nesta configuração que se insere o caso de estudo. Abordando aspetos, essencialmente, estruturais relevantes para o desenvolvimento do trabalho que se segue.

É na base destes aspetos estruturais, que surge a madeira neste capítulo, assim como algumas soluções já implementadas usando a combinação dos dois materiais.

### 2.2. ESTRUTURAS TRELIÇADAS METÁLICAS

#### 2.2.1. DEFINIÇÃO DE TRELIÇA

Uma treliça é uma estrutura composta por elementos triangulares com um comportamento muito semelhante a um elemento tipo viga. Este tipo de elementos na presença do esforço de flexão apresenta exclusivamente fibras comprimidas e fibras tracionadas. De acordo com o referido a Figura 2.1 compara o comportamento estrutural da viga versus treliça. Os elementos que limitam superiormente a treliça (corda superior) estão à compressão, ao contrário dos elementos inferiores (corda inferior) que apresentam um esforço de tração.

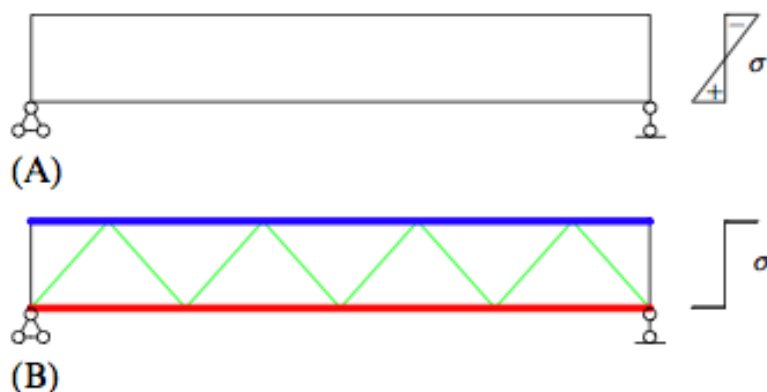


Figura 2.1 - (A) Viga. (B) Treliça.[2]

Estes elementos da treliça estão ligados entre si, através de nós, formando assim unidades triangulares.

As principais forças, numa treliça plana, correspondem às do peso próprio e às solicitações exteriores (p. ex. sobrecargas de utilização). Assim é possível admitir que as forças são aplicadas nos nós e que os momentos de flexão e torção, a que os elementos que a constituem possam estar sujeitos, são geralmente excluídos porque é comum assumir que uma treliça por simplificação é rotulada nos nós.[2]

São essencialmente as forças axiais que fazem com que a estrutura seja resistente às cargas aplicadas. Os momentos fletores são pequenos.

Deste modo, os elementos superiores e inferiores são dimensionados de forma a resistirem ao momento fletor, enquanto os elementos diagonais e/ou verticais são dimensionados para resistirem às forças de corte no plano.[3]

De forma a otimizar o desempenho estrutural, segundo Sechalo[4], deverá optar-se por um relação entre o vão livre e a flecha da treliça de 1/8 a 1/15.

Para uma disposição eficiente dos elementos de uma treliça Sechalo[4], recomenda, que seja considerado o seguinte:

- A inclinação das diagonais deve estar compreendida entre 35° e 55°.
- As cargas sejam pontuais e aplicadas nos nós.

A orientação das diagonais seja tal que os elementos mais longos estejam à tração (e as diagonais mais curtas fiquem à compressão).

### 2.2.2. TRELIÇA: CONFIGURAÇÃO GERAL E TERMINOLOGIA

As treliças, no caso de serem usadas para apoio de pisos ou em pontes apresentam usualmente as cordas paralelas. Nos casos em que a finalidade sejam coberturas, é vulgar a corda superior ser inclinada. Na presente tese serão apenas abordadas treliças com cordas paralelas.

A Figura 2.2 indica a terminologia dos diversos elementos que compõem uma treliça, nomeadamente banzos ou cordas superior e inferior, diagonais e montantes.

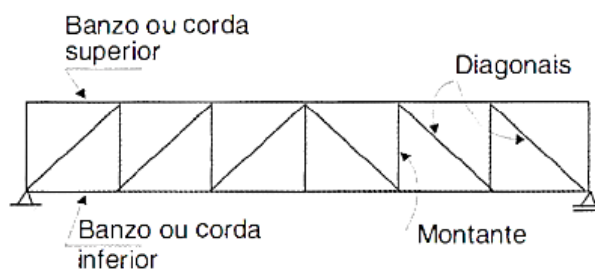


Figura 2.2 - Terminologia de uma treliça.[5]

Em resumo, o funcionamento estrutural destes elementos que compõem uma treliça é o seguinte:

- Corda superior – elemento superior que delimita uma treliça sujeito a esforços de compressão. Como referido pode ser horizontal ou inclinado.
- Corda inferior – elemento horizontal inferior sujeito a esforços de tração.
- Diagonal – membro de ligação entre as cordas superior e inferior, como tal, estabelece o conceito triangular de uma treliça. Estes elementos estão sujeitos a esforços axiais que dependendo da sua orientação poderão ser ou de compressão ou de tração.
- Montante – membro vertical que de igual forma está sujeito a forças axiais (compressão ou tração).

### 2.2.3. TIPOS DE TRELIÇA

Existem diferentes tipos de treliças. Na Figura 2.3 são apresentados os tipos de triangulação mais usuais, sendo que a grande maioria é denominado em homenagem aos engenheiros ferroviários que as conceberam.

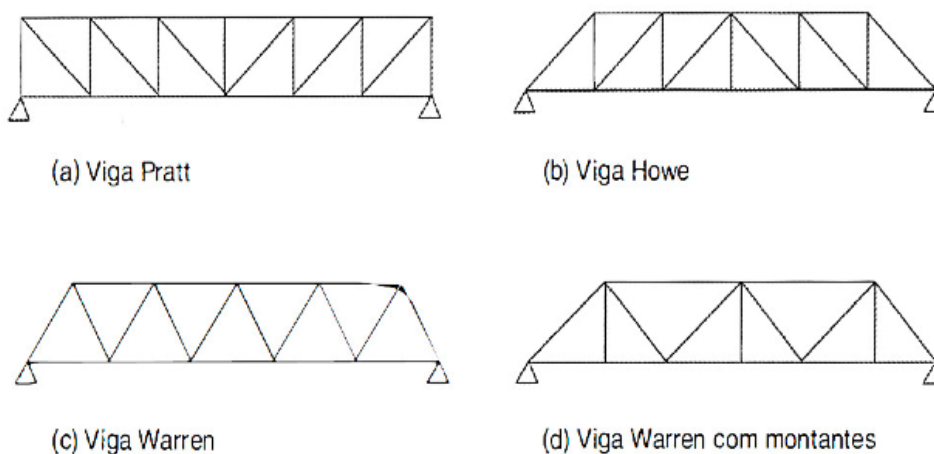


Figura 2.3 - Tipos de treliça com banzos paralelos.[5]

#### • Treliça Pratt

Desde o seu aparecimento no ano de 1844, este tipo de treliça passou a fazer parte de centenas de pontes projetadas até a Segunda Guerra Mundial. Como característica principal tinha a capacidade de atingir maiores vãos usando métodos simples de construção.

A treliça Pratt é uma treliça triangular em que todas as diagonais, com exceção das extremidades, se inclinam em direção ao meio vão da ponte. Quando submetida a um carregamento este tipo de configuração introduz nas diagonais esforços de tração e os montantes ficam sob o esforço axial de compressão.

- **Treliça Howe**

A treliça Howe foi patenteada com o nome do seu criador, William Howe, no ano de 1840.

Este tipo de treliça tem uma configuração muito semelhante à treliça Pratt, com exceção das suas diagonais que têm uma inclinação no sentido contrário às diagonais da treliça Pratt. Nesta configuração, as diagonais estão submetidas a esforços de compressão, enquanto os montantes estão submetidos a esforços de tração. (Figura 2.3 (b)) [6]

- **Treliça Warren**

A treliça Warren foi patenteada em 1848, pelas mãos de James Warren e Theobald Monzani. [7]

Este tipo de treliça caracteriza-se pelos seus membros longitudinais, as cordas, estarem ligados entre si através de diagonais que formam triângulos equiláteros. Este tipo de triangulação pode introduzir esforços de tração ou de compressão nas diagonais. Porém, quando comparada com a triangulação Pratt e Howe, estes esforços axiais nas diagonais são de uma grandeza inferior. À medida que a estrutura é sujeita a uma carga móvel os esforços nas diagonais alteram-se de compressão para esforços de tração introduzido pelo peso próprio é inferior. [7]

Com o aumento do vão, obrigatoriamente, a altura da treliça tem de aumentar conduzindo à necessidade de reforçar a corda superior de modo que seja controlada a encurvadura destes elementos na direção vertical. No sentido de impedimento de fenómenos de encurvadura da corda superior adotam-se elementos verticais, ou montantes, originando uma nova configuração denominada de treliça Warren Modificada, solução apresentada na estrutura da Figura 2.3 (d) [7]

#### 2.2.4. ANÁLISE DE UMA TRELIÇA

Como já foi referido anteriormente uma treliça plana, esta é, normalmente, é constituída por unidades triangulares. O triângulo é uma figura geométrica que por si só é estaticamente estável, mesmo sem restrição de rotação nos nós, ao contrário de uma estrutura retangular, que se comporta como um mecanismo submetida a um carregamento similar ao indicado. (ver Figura 2.4)

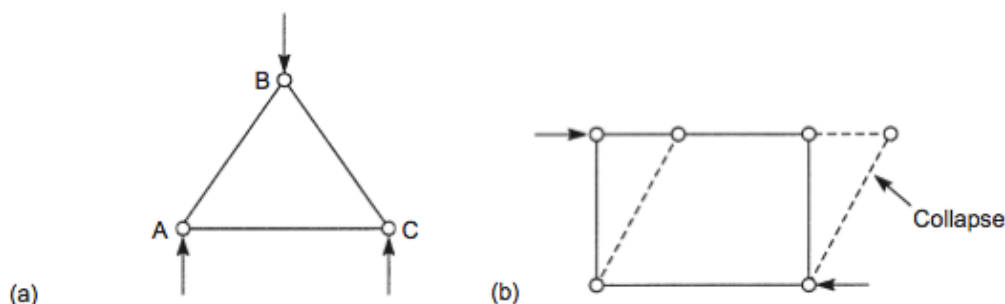


Figura 2.4 - Elemento básico de uma treliça. [8]

Esta configuração triangular, quando solicitada e apoiada nos nós, introduz esforços axiais nos elementos constituintes da treliça. Assim esta configuração conduz a que a estrutura seja estaticamente determinada.

A análise de uma treliça é baseada nos seguintes pressupostos:

- A treliça é solicitada e apoiada nos nós;
- Os esforços dos elementos que a constituem são unicamente axiais.

Os pressupostos são dependentes, pois caso uma carga seja aplicada numa posição do elemento que não seja a sua extremidade, este passa a estar sujeito a forças de corte e momentos fletores e, consequentemente, deixa de ser estaticamente determinada.

As ligações dos elementos que constituem uma treliça metálica são normalmente do tipo: aparafusadas, rebitadas, cavilhadas ou soldadas. As ligações cavilhadas garantem a articulação do nó. No caso das ligações com chapas de reforço, denominadas de *gusset*, estas apresentam-se como semirrígidas logo proporciona momentos fletores nos elementos.

Além disso, quando as cargas aplicadas não coincidem com os nós, conduz a que os elementos estejam sujeitos a forças de corte e momentos fletores.

No entanto, através de uma análise computacional verifica-se que as forças de corte e momentos fletores nos elementos são muito pequenos quando comparados com as forças axiais, e estas apresentam valores parecidos quando comparadas com os resultados de uma análise baseada no pressuposto de ligações rotuladas.[8]

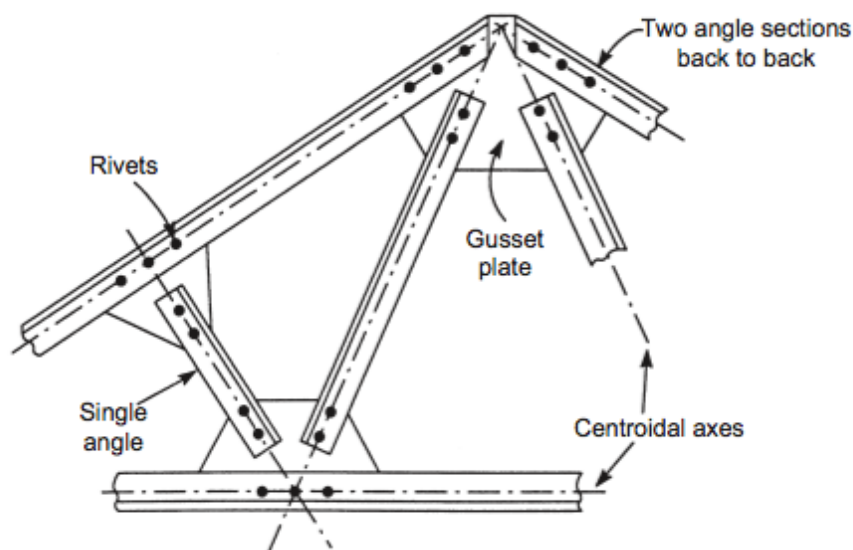


Figura 2.5 - Construção real de uma treliça.[8]

#### 2.2.4.1. Determinação estática

Como mencionado no subcapítulo anterior, a forma triangular permite que uma treliça seja estaticamente determinada e as forças instaladas sejam unicamente axiais desde que os apoios e o carregamento coincidam com os pontos de ligação (nós) entre os elementos. Na figura abaixo apresenta-se as forças de equilíbrio no nó de uma treliça.

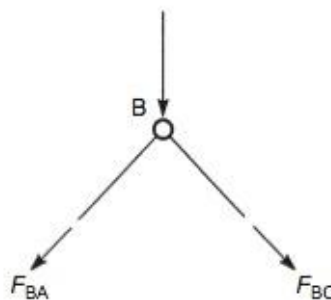


Figura 2.6 - Equilíbrio do nó de uma treliça.[8]

As forças que atuam no nó B da Figura 2.6 correspondem à carga aplicada externamente e às forças axiais de equilíbrio que surgem nos elementos BA e BC. Para que a ligação em B esteja em equilíbrio o somatório das forças em qualquer direção nesse ponto deve ser igual a zero. A equação dos momentos é satisfeita automaticamente desde que, como já mencionado anteriormente, os eixos dos elementos BA e BC sejam concorrentes.

Para efeitos de cálculo, é apenas necessário duas equações de equilíbrio de forma a obter os resultados das forças  $F_{BA}$  e  $F_{BC}$ . Da mesma forma e com o mesmo número de equações, e aplicando o mesmo raciocínio às ligações entre A e C, é possível determinar o esforço axial instalado no elemento AC.

Pode-se desta forma concluir que a unidade básica triangular é estaticamente determinável.

Na Figura 2.7, apresenta-se a construção de uma treliça simples, do tipo Warren. Observa-se que, começando com apenas um triângulo, um segundo é criado adicionando apenas dois elementos, BD e CD e uma única ligação, D. Da mesma forma é criada a terceira unidade triangular, e assim sucessivamente.

Conclui-se assim que o número de elementos é igual ao dobro do número de ligações. Assumindo que o número de elementos é traduzido por  $m$  e o número de ligações por  $j$ , e que inicialmente há três elementos e o mesmo número de ligações, podemos traduzir esta relação da seguinte forma:

$$m - 3 = 2(j - 3) \Rightarrow m = 2j - 3 \quad (2.1)$$

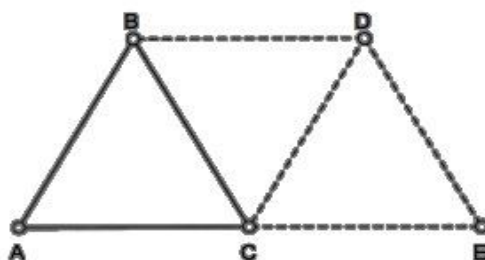


Figura 2.7 - Construção de uma treliça Warren.[8]

Deste modo, se a Equação 2.1 for satisfeita pode dizer-se que a treliça é estaticamente determinada. Por outro lado se  $m < 2j - 3$  diz-se que é uma estrutura instável, como é o caso da Figura 2.4 b, ou se  $m > 2j - 3$  diz que a estrutura é estaticamente indeterminada.

No entanto a Equação 2.1, não é infalível, isto é, a relação pode ser confirmada, mas a estrutura em determinados casos pode ser estaticamente indeterminada, ou mesmo ser um mecanismo, como é

possível ver na Figura 2.4 b. Isto é facilmente verificado na Figura 2.8, onde é possível ver que a metade esquerda da estrutura é um mecanismo e a parte direita da estrutura é estaticamente indeterminada.[8]

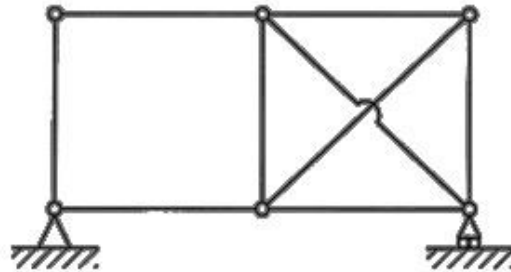


Figura 2.8 - Aplicação do teste de determinação estática.[8]

Duma forma semelhante, para treliças espaciais, é possível verificar se uma treliça é ou não estaticamente determinada, através da seguinte relação:

$$m = 3j - 6 \quad (2.2)$$

Após confirmar que a treliça em estudo é estaticamente determinada, segue-se a análise estática da mesma. Para isso pode-se usar dois métodos, nomeadamente:

- Método dos nós;
- Método de Ritter, ou método das secções.

○ **Método dos nós**

Como foi referido no início deste subcapítulo, as forças que se reúnem numa ligação de elementos de uma treliça são facilmente calculáveis através de duas equações de equilíbrio, são estas o somatório das forças verticais e o somatório das forças horizontais, calculando consequentemente as forças axiais instaladas nos elementos.

De acordo com o que foi mencionado, é possível alargar este raciocínio a toda a estrutura. Duma maneira simplista e resumida este raciocínio, designado de método dos nós, baseia-se nas seguintes três fases de cálculo:

- Isolar cada ligação e aplicar em cada um deles todos os esforços atuantes (cargas e reações nos apoios), e substituir cada elemento pelo esforço axial que nele ocorre, admitindo inicialmente que todos estão à tração;
- Aplicar, a cada uma das ligações, as equações de equilíbrio já referidas:  $\sum F_H = 0$ ,  $\sum F_V = 0$ ;
- Resolver o sistema de equações. Os resultados positivos indicam esforço de tração, ao contrário dos valores negativos que indicam compressão.

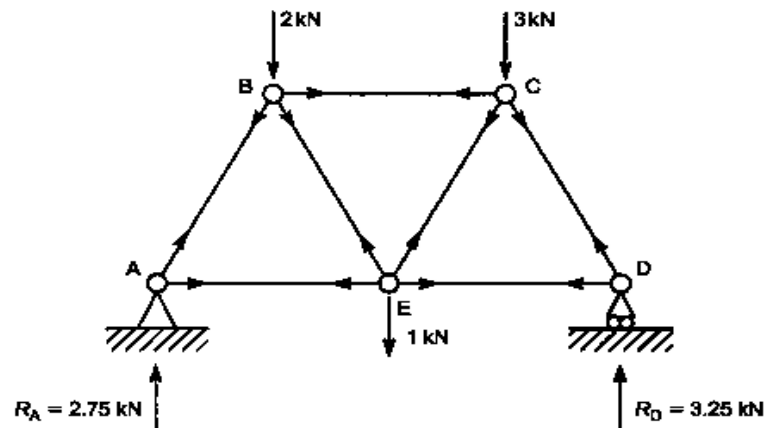


Figura 2.9 - Análise de uma treliça Warren.[8]

### ○ Método de Ritter

No seguimento do método anterior é de fácil observação que numa estrutura mais longa, como na maioria dos casos reais o é, é um método demorado e repetitivo, visto que é necessário começar por um dos apoios, onde só existem duas incógnitas para duas equações de equilíbrio, e percorrer toda a estrutura.

Então, numa situação onde seja apenas necessário calcular o esforço de um elemento central da treliça, existe a possibilidade de usar o método de Ritter resumido nas três seguintes fases de cálculo:

- Dividir a estrutura em duas partes através de uma secção qualquer (Figura 2.10) e, tal como no método dos nós, substituir os elementos cortados pelos esforços associados a estas barras (Figura 2.11) considerando igualmente à tração;
- Aplicar a uma das partes, as três equações de equilíbrio  $\sum F_H = 0$ ,  $\sum F_V = 0$  e  $\sum M = 0$
- Escolher uma nova secção e repetir os dois passos anteriores, até a conclusão do nosso objetivo de cálculo, seja ele total ou parcial dos elementos.

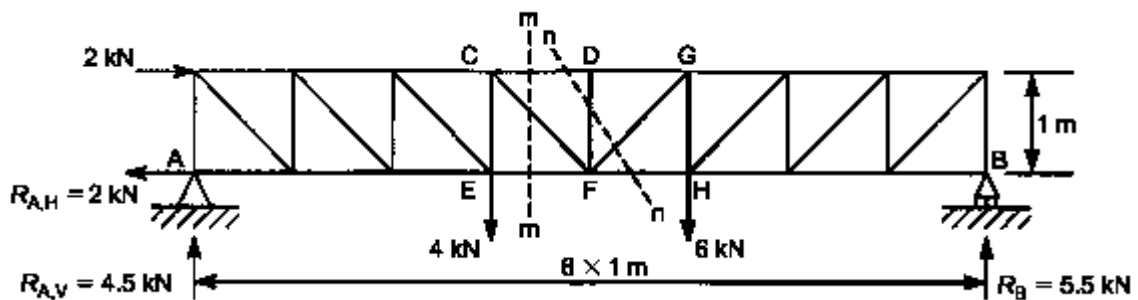


Figura 2.10 - Aplicação do método de Ritter.[8]

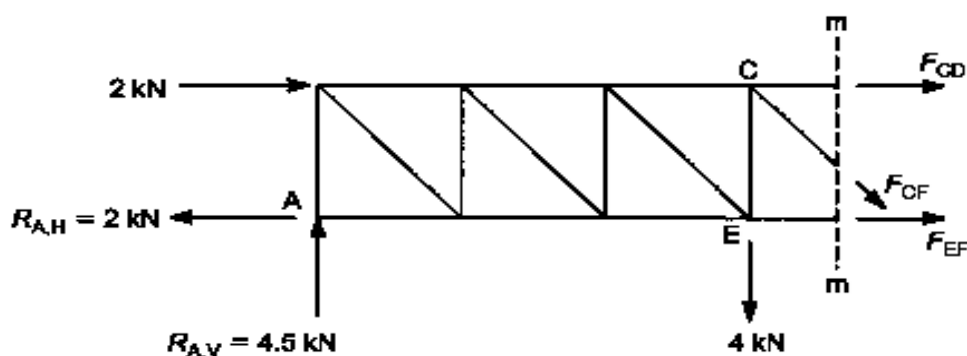


Figura 2.11 - Equilíbrio da seção de uma treliça.[8]

**Nota:** Deve ser tido em conta que cada seção deve incluir o corte de três elementos que não sejam nem paralelos nem concorrentes entre si.

## 2.3. PONTES TRELIÇADAS METÁLICAS

### 2.3.1. ENQUADRAMENTO

A engenharia de pontes é um ramo significativo da engenharia estrutural que lida com uma grande variedade de disciplinas tais como: levantamento, planeamento, projeto, análise, construção, gestão e manutenção deste tipo de obras de arte. Para tal diversidade é necessário conhecimento de engenharia de materiais, compósitos, metalurgia, mecânica estrutural, estática, dinâmica, estatística, hidráulica, solos, entre outros.[9]

A engenharia de pontes é baseada no conhecimento racional e empírico dos diversos materiais e estruturas geométricas. Um engenheiro de pontes necessita de fazer uma gestão eficaz de recursos financeiros, materiais, cálculo e tecnologias construtivas. Este é também responsável pela segurança estrutural, pelo desempenho e manutenção.[3]

Uma ponte, numa forma resumida é constituída por:

- Superestrutura – representa a parte que se localiza acima dos apoios;
- Apoios – componente que encaminha as cargas recebidas da superestrutura, até a subestrutura;
- Subestrutura – representa a parte abaixo dos apoios. Componente que encaminha as cargas até à fundação;
- Estruturas acessórias – pode-se dizer que são as chamadas “restantes cargas permanentes”.

[3]

Com a evolução das pontes simples de vigas para as modernas pontes suspensas a necessidade de classificar as pontes cresceu. A classificação de pontes é feita a nível da superestrutura e de acordo com as seguintes características, respetivamente:

- Materiais construtivos;
- Extensão;
- Finalidade:
  - Pontes Rodoviárias;
  - Pontes Ferroviárias;
  - Pontes Pedonais;
  - Etc.

- Forma estrutural:
  - Pontes em viga;
  - Pontes em caixão;
  - Pontes em treliça;
  - Pontes em arco;
  - Pontes de tirantes;
  - Pontes suspensas;
- Localização do Pavimento:
  - “*Deck Truss*” (Figura 2.12 (C));
  - “*Through Truss*” (Figura 2.12 (A));
  - “*Half-Through Truss*” ou “*Pony Truss*” (Figura 2.12(B));

Observando a lista classificativa supramencionada é do âmbito desta dissertação direcioná-la exclusivamente para as pontes rodoviárias em treliça metálica, com especial atenção para as “*Half-Through Bridges*”.

Na figura que se segue apresenta-se o alçado dos tipos de treliça para as diferentes posições do tabuleiro da ponte.

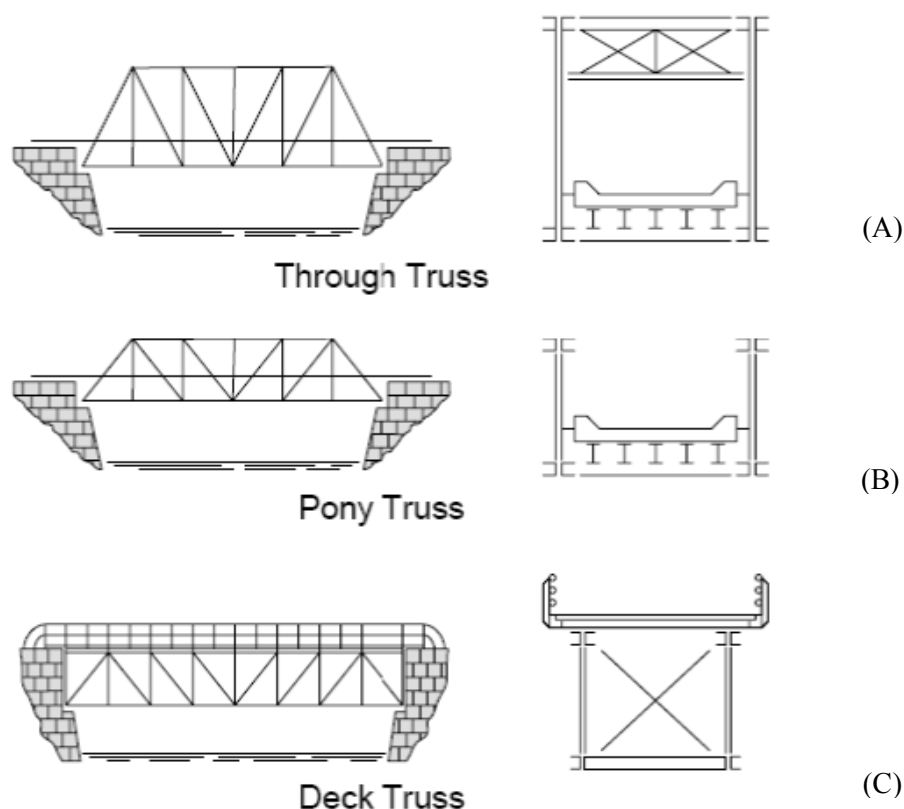


Figura 2.12 - Tipos de treliça de acordo com a posição do pavimento. (A) “*Through Truss*”. (B) “*Half-Through bridges*” ou “*Pony Truss*”. (C) “*Deck Truss*”.

### 2.3.2. FUNCIONAMENTO ESTRUTURAL

As pontes em treliça são dos tipos de pontes mais antigos da história de pontes modernas.[3]

Usualmente nas pontes em treliça modernas as ligações entre os seus elementos são feitas através de placas de reforço, desta forma os momentos fletores e as forças de corte nos membros devem ser consideradas para que seja possível avaliar o comportamento real da estrutura. O seu cálculo é conseguido recorrendo a software de elementos finitos.[3]

Na Figura - 2.13 mostra-se o funcionamento de uma ponte treliçada metálica do tipo “*Half-Through Truss*”, respetivamente, em treliça Pratt e em treliça Warren, submetida a forças gravíticas.

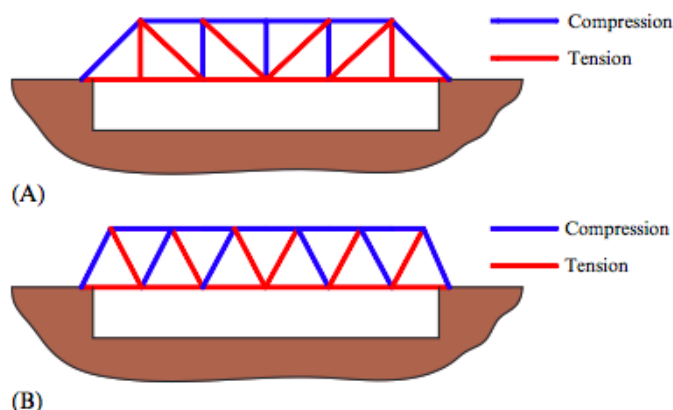


Figura 2.13 - Forças axiais numa ponte em treliça. (A) Treliça Pratt. (B) Treliça Warren.[3]

É neste tipo de treliça, “*Half-Through Truss*” – sem elementos a unir superiormente as cordas superiores, que se insere o caso de estudo deste trabalho. No subcapítulo seguinte é explicado o funcionamento estrutural deste tipo de pontes.

#### 2.3.2.1. Ponte treliçada do tipo “*Half-Through*”

Quando a conceção estrutural passa por uma “*Half-Through Truss*”, requer disposições especiais para combater as forças laterais às quais vai ficar sujeita, especialmente, a corda superior. Deve ser verificada a segurança em relação à encurvadura considerando a carga móvel.[2]

Uma ponte em treliça, que use a solução mencionada (Figura 2.12 (B)), é uma ponte, que como se pode depreender, não possui elementos que unam as cordas superiores, consequentemente, há que atender ao fenómeno adicional: a encurvadura lateral da corda superior.

Essencialmente, uma ponte “*Half-Through Truss*”, tal como outras soluções de pontes em treliça, é uma solução onde os seus elementos estão sujeitos a esforços de tração e compressão e no caso das travessas, suportam as forças de corte do sistema estrutural. Esta solução pode ter duas configurações, secção em U e secção em H. (Figura 2.14 e Figura 2.15)

- **Secção U:**

Esta secção é caracterizada por possuir o pavimento nivelado com a corda inferior. É usada, principalmente, quando o espaço sob a estrutura em treliça é reduzido.

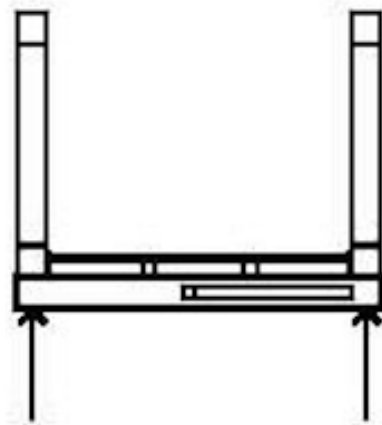


Figura 2.14 - Secção U de uma ponte treliçada “Half-Through”. [10]

- **Secção H:**

Nesta secção o pavimento está localizado acima da corda inferior. Esta localização estabiliza os elementos da treliça originando um dimensionamento mais estável e a uma redução de aço.

É a solução mais indicada para cargas maiores e durações de projeto mais alargadas. [11]

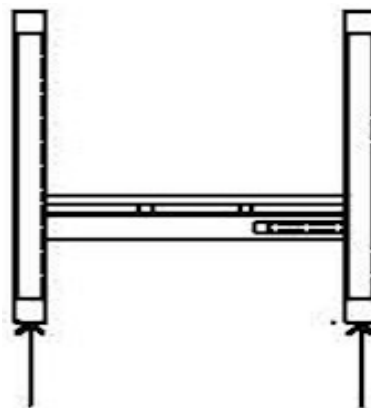


Figura 2.15 - Secção H de uma ponte treliçada “Half-Through”. [10]

A ponte “Half-Through” apresenta, normalmente, uma configuração retangular linear em U. O dimensionamento deste tipo de pontes tem em consideração a interação entre a ação transversal e o comprimento das vigas principais. Esta interação designa-se normalmente por pórtico em “U”.

Sendo esta configuração obtida através de uma viga transversal e dois elementos verticais ligados por ela. O objetivo é oferecer uma contenção lateral às cordas superiores em compressão. Desta forma é possível reduzir o comprimento de encurvadura das cordas superiores. (Figura 2.16)

A restrição imposta por esta interação depende dos elementos que a compõem, as vigas transversais, os elementos verticais e as ligações entre as vigas principais e as vigas longitudinais. [12]

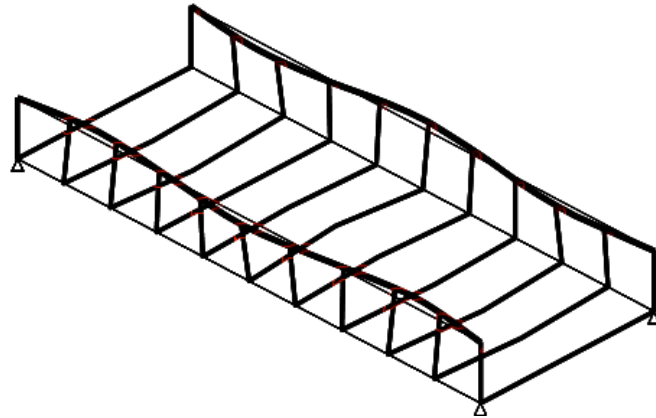


Figura 2.16 - Modo de encurvadura da corda superior de uma ponte treliçada “Half-Through Truss”. [12]

Aquando do cálculo da resistência das vigas longitudinais, deve ser tida uma atenção especial na resistência à encurvadura da corda superior comprimida. Deste modo, é muito importante verificar a eficiência da interação acima mencionada.

Nas imagens seguintes apresentam-se dois alçados de pontes metálicas deste tipo “Half-Through Truss”. A ponte metálica que liga Esposende a Fão insere-se na EN13 e atravessa o rio Cávado. Esta ponte foi construída em 1892 e transversalmente tem 2 faixas de circulação, com uma via cada, que se desenvolvem entre as treliças estruturais.



Figura 2.17 - Ponte treliçada metálica do tipo “Half-Through”. Clague Park in Westlake, OH [10]



Figura 2.18 - Ponte treliçada metálica do tipo “Half-Through”. Esposende - Fão, Portugal.

#### 2.3.2.2. Contraventamentos

O sistema de contraventamento é uma parte essencial de um projeto de uma ponte.

Este elemento estrutural tem por função o seguinte:

- Estabilizar as vigas principais durante a construção e em funcionamento;
- Distribuir os efeitos das cargas;
- Fornecer estabilidade de elementos, em compressão, expostos à encurvadura lateral.

No âmbito deste trabalho, é dada uma maior importância, ao sistema de contraventamento para estabilidade de elementos em compressão, ou seja, sujeitos a fenómenos de encurvadura.

Num contexto mais informativo, são feitas as devidas referências às restantes finalidades e tipos de contraventamentos.

As forças de compressão às quais um elemento principal não restringido lateralmente está sujeito, podem levar a problemas de resistência por encurvadura. Para tal, sistemas de contraventamento, podem ser usados para fornecer restrição lateral diretamente aos elementos comprimidos, ou restringir que o elemento tenha liberdade de torção.[12]

Uma pequena quantidade de material, comparativamente a um elemento principal de uma treliça, pode ser suficiente para um enorme aumento da resistência destes elementos principais.

De acordo com o fenómeno que pretendem restringir, os sistemas de contraventamento podem ser genericamente classificados em três tipos:

- Contraventamento lateral;
- Contraventamento torsional;
- Contraventamento em pórtico “U”.

##### ○ **Contraventamento lateral**

Este é o tipo de contraventamento que oferece restrição lateral do elemento, ou seja, impede que ele se desloque lateralmente.

É constituído por elementos diagonais que vistos em plano assumem uma forma de treliça. Esta configuração permite criar uma estrutura com elevada rigidez quando submetido a deslocamentos

laterais. Utilizando este tipo de contraventamento, estamos a reduzir o comprimento de encurvadura do elemento contraventado.[12]

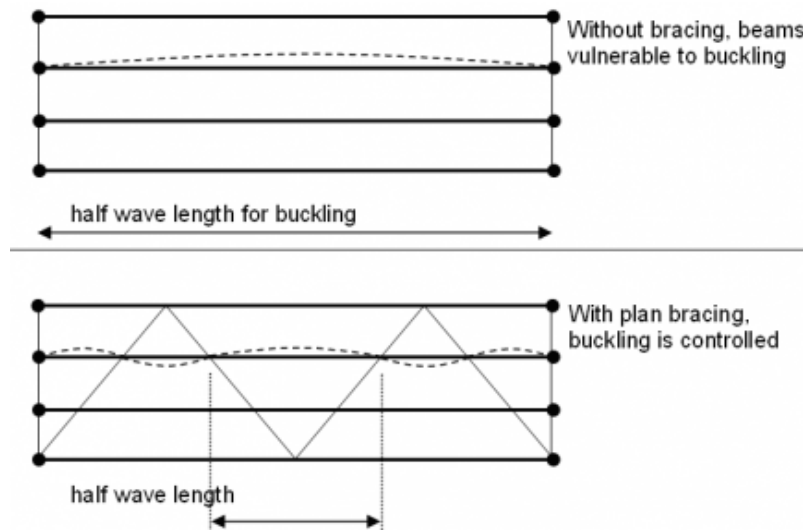


Figura 2.19 - Sistemas de contraventamento.[12]

#### ○ Contraventamento torsional

Este sistema de contraventamento utiliza, transversalmente, dois elementos que ligam as cordas, superior e inferior, de duas vigas paralelas entre si. É possível obter diferentes configurações como se pode observar na Figura 2.20.

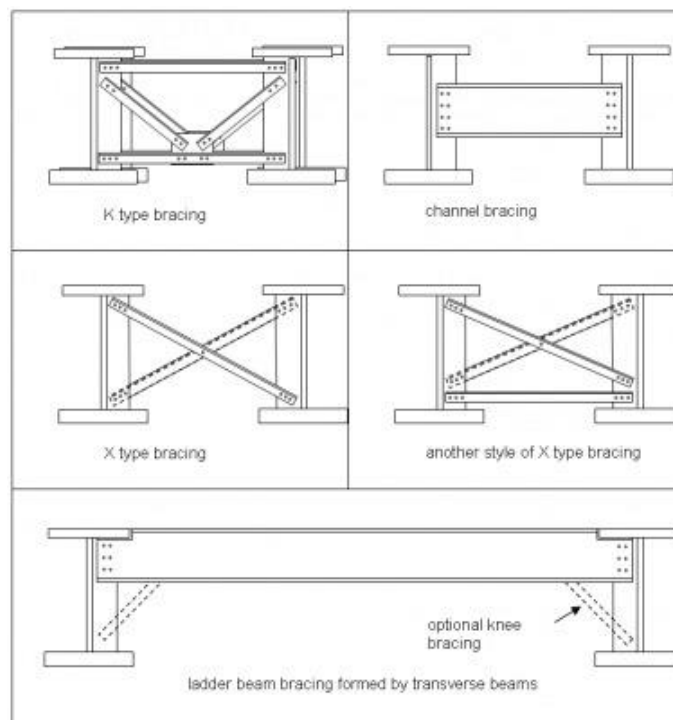


Figura 2.20 - Sistemas de contraventamento torsional.[12]

Este tipo de contraventamento não oferece restrições laterais, uma vez que, os deslocamentos impostos por uma das vigas serão consequentemente impostos na outra viga. No entanto a rigidez que o sistema

oferece obriga a que as duas vigas rodem em conjunto. Quando uma sobe a outra desce, isto é, agem como um único corpo. Desta forma é obtida a resistência à encurvadura.

O efeito do sistema é aumentar o esforço axial crítico elástico de ambas as vigas.[12]

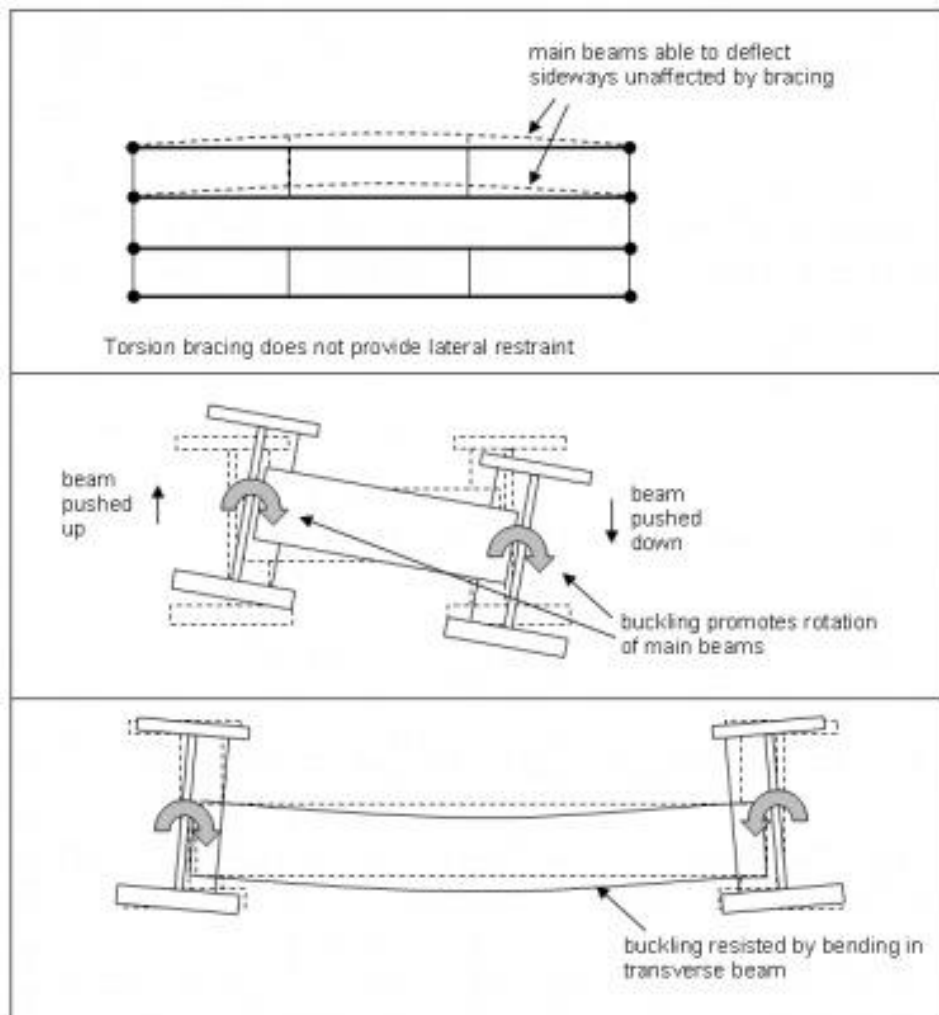


Figura 2.21 - Ação estrutural do contraventamento torsional.[12]

#### ○ Contraventamento em pórtico “U”

Neste tipo de contraventamento é a rigidez do pórtico em “U” que oferece a resistência à encurvadura lateral. Este é o tipo de contraventamento da corda superior presente no caso de estudo desta tese – ponte metálica treliçada do tipo “*Half-Through*”.

A restrição imposta por este tipo de contraventamento só ocorre se existir um pavimento na corda inferior, pois a rigidez da plataforma no plano vai evitar que ocorram deslocamentos nas cordas. Caso contrário, na ausência do pavimento o sistema funcionará como restrição à torção.[12]

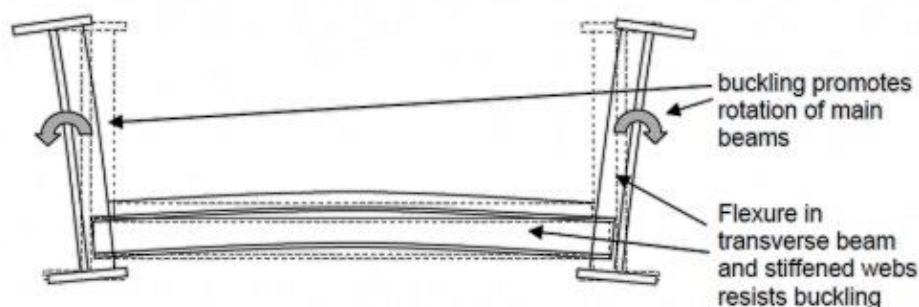


Figura 2.22 - Ação estrutural do sistema de contraventamento de uma seção U.[12]

## 2.4. ESTRUTURAS MISTAS AÇO-MADEIRA

### 2.4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

As estruturas mistas são uma solução muito usual mundialmente, em especial a solução aço-betão. A solução aço-madeira começou a ser mais usada nos últimos tempos, no entanto não existem normas que regulem esta solução estrutural.

Para projetar uma solução mista é importantíssimo que se conheça o máximo das propriedades de cada material que vai ser usado na combinação.

- **Aço**

É o mais resistente e mais dúctil de todos os materiais normalmente usados na construção. É um material isotrópico, ou seja, as suas características são iguais em todas as direções. Devido à sua alta resistência a maior dificuldade é o uso da menor quantidade possível do material, isto resulta numa maior suscetibilidade à encurvadura. Desta forma o aço é idealmente usado para suportar esforços de tração.

- **Madeira**

A madeira é um material anisotrópico, isto é, as suas características variam dependendo da orientação e localização da aplicação da carga. Possui diferentes resistências nos três eixos, sendo mais resistente na direção paralela ao eixo longitudinal e menor resistência no eixo perpendicular a este. Os eixos duma peça de madeira são denominados de longitudinal, radial e direção tangencial. (Figura 2.23)

“A madeira é um material que resiste muito melhor à compressão do que à tração, é também o material mais flexível entre todos os materiais de construção. Embora não tenha um rendimento muito bem definido possui uma rotura mais dúctil do que o betão, por exemplo, dependendo, claro está, da orientação do carregamento.”[13]

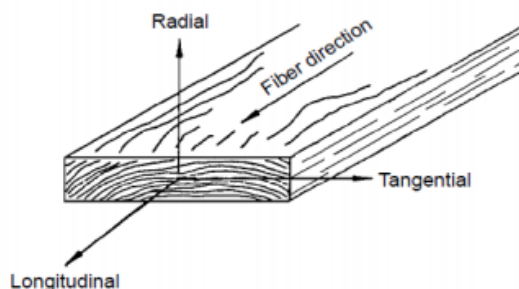


Figura 2.23 - Orientação e direções de uma peça de madeira.[13]

Na prática, as estruturas de madeira, acabam por ser estruturas mistas aço-madeira, pois as ligações dos elementos, são estabelecidas através de pregos ou parafusos de aço. As estruturas mistas aço madeira podem ser classificadas em dois grupos, nomeadamente:

- **Estrutura mista aço-madeira ao nível dos elementos**

Na Figura 2.24 é ilustrado um elemento que possui uma chapa de aço entre as peças de madeira. Este sistema tem várias vantagens. A viga de aço possui, obviamente, maior resistência. No entanto, tem problemas de encurvadura lateral. A madeira neste tipo de sistema fornece restrição lateral, previne a encurvadura lateral e a encurvadura local da chapa de aço.[13]

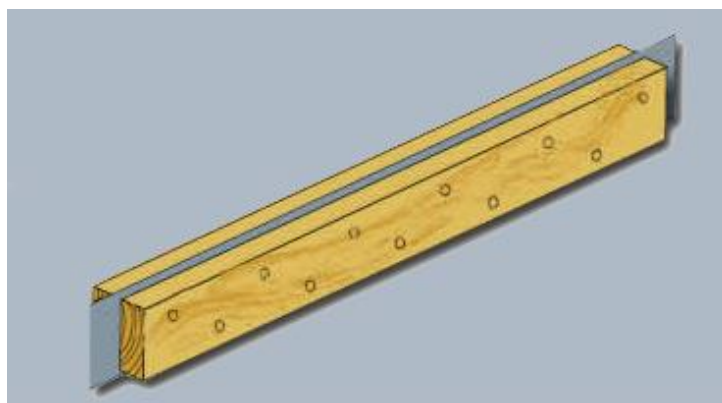


Figura 2.24 - Flitch Beam.[14]

- **Estrutura mista aço-madeira ao nível do sistema**

Sistema estrutural composto por elementos de madeira e por elementos de aço. Uma treliça pode ser um bom exemplo de aplicação deste sistema, uma vez que a madeira funciona melhor à compressão, tem-se a possibilidade de usar madeira na corda superior e o aço na corda inferior uma vez que este funciona melhor à tração.

Um outro exemplo de uma boa aplicação desta solução estrutural será uma estrutura com desenvolvimento em altura, edifício, onde os níveis mais baixos são construídos completamente em aço e os pisos superiores em madeira. O aço contribui para a sua elasticidade e a madeira reduz o peso total do edifício.[13]

O facto de a madeira ser um material cultivado faz com que esta possua valores de resistências menos fiáveis, pois a sua resistência rigidez e densidade variam muito dentro das espécies, dependendo das imperfeições locais e das condições de crescimento da planta.

Sendo um material higroscópico a madeira é um material que ganha e perde humidade causando um aumento ou uma diminuição de volume do elemento. Todos estes comportamentos e características especiais da madeira devem ser levados em conta aquando do projeto de uma estrutura mista aço-madeira.

A madeira e o aço são materiais com propriedades muito diferentes entre si, de tal forma que a sua combinação é uma tarefa desafiante. O aço é um produto resistente e com comportamento estrutural bem definido, ao contrário da madeira que sendo um produto natural é variável em termos de resistência e relativamente fraco, comparativamente ao aço. No entanto, o aço também apresenta problemas em contacto com a humidade, em que sofre oxidação. Para evitar este tipo de problemas é necessário um bom detalhe de projeto. Contudo, os cuidados com a humidade não ficam resolvidos evitando a humidade do meio ambiente. Existe uma enorme preocupação no contacto entre os dois materiais, devido a variação de humidade na madeira é necessário proteger o aço através da galvanização ou aplicar um revestimento através de uma pintura específica.[15]

Um dos pontos mais importantes é a diferença nos coeficientes de expansão e contração quando se combina os materiais. Não menos importante é o facto do aço se destacar pela sua resistência à tração enquanto que a madeira resiste melhor a esforços de compressão.[15]

No projeto de estruturas mistas aço-madeira, o importante é ter bem presentes os pontos fortes de cada material e em que situações cada material funciona melhor. A título de exemplo, aquando de um projeto de uma estrutura mista, deve ser evitada grande conexão com elementos de aço submetidos a força de alta tensão de forma a ser evitada essa transferência de forças para a madeira.

#### 2.4.2. EXEMPLOS DE ESTRUTURAS MISTAS AÇO-MADEIRA

Na pesquisa bibliográfica levada a cabo sobre a temática estruturas mistas de aço-madeira foi possível encontrar alguns exemplos que se apresentam de seguida. Porém, no que respeita a pontes aço-madeira não se descobriu esta conjugação de materiais.

Em 2001 no Canadá volta-se a introduzir a madeira em estruturas como é o exemplo de *Rupert Station – Vancouver, British Columbia* (Figura 2.25). Esta estrutura combina o aço e a madeira num único projeto, levando assim a uma estrutura híbrida, sustentável e esteticamente agradável. A força possuída pelo aço diminui o volume e leva a uma grande economia da estrutura. As colunas redondas em aço (colunas verticais, em cor branca presentes nas imagens que se seguem) suportam as vigas de madeira que suportam toda a cobertura sobre a plataforma. O seu contraventamento é feito através das diagonais em madeira, com ligações em aço, que se posicionam ao longo da parte exterior da estação.[16]



Figura 2.25 - Estrutura mista aço-madeira- Pilares em aço, vigas e contraventamentos em madeira, - *Rupert Station – Vancouver, British Colombia, Canada.*[16]

A combinação dos dois materiais, aço-madeira, pode ser feita em configurações estruturais mais simples, como é o caso da treliça. Nesta solução estrutural o aço é usado para trabalhar à tração, enquanto a madeira é usada para receber esforços de compressão.

Neste tipo de soluções estruturais o aço, normalmente, é usado como conector madeira-madeira, ou também usado como cabos ou perfis para receber as forças de tração em todo o sistema estrutural.

É possível encontrar exemplos desta aplicação em *The Jackson Triggs Estate Winery in Niagara-on-the-Lake, Ontario, Canada*.

- Para suportar as forças verticais são usados perfis em aço e um sistema em treliça que combina aço e madeira. É possível observar na Figura 2.26 essa união entre ambos os materiais.[15]



Figura 2.26 - Pormenor de ligação de uma treliça mista.[15]

- A ligação central da treliça é feita em aço, criando um forma em X onde se conectam os membros em madeira. Esta ligação à madeira é concretizada através de placas de metal que penetram em cortes feitos previamente nas secções de madeira. A ligação é finalizada com parafusos que atravessam toda a secção. (Figura 2.27)[15]



Figura 2.27 - Pormenor de ligação de uma treliça mista.[15]

- A tensão é introduzida na treliça através do sistema apresentado na Figura 2.28. O sistema roscado permite introduzir as forças de tensão no sistema.



Figura 2.28 - Pormenor do sistema roscado de introdução de tensão.[15]

# 3

## ENQUADRAMENTO REGULAMENTAR

### 3.1. INTRODUÇÃO

Na análise estrutural do caso de estudo proposto neste trabalho e correspondentes verificações de segurança foram estudados e usados os Eurocódigos, nomeadamente o Eurocódigo 3 e o Eurocódigo 5.

Os Eurocódigos são um conjunto de Normas Europeias (EN) que servem de orientação no dimensionamento de estruturas com diversas formas e constituídas por diversos materiais. Para a estrutura apenas foram tidas em conta as seguintes normas:

- EN 1993-1-1 Regras gerais e regras para edifícios.
- EN 1995-1-1 Regras gerais e regras para edifícios.

Tal como foi referido anteriormente, um dos objetivos deste trabalho passa pelo dimensionamento de elementos de madeira com a função de contraventar elementos metálicos submetidos a esforços de compressão. De facto, considera-se fora do âmbito do trabalho o dimensionamento de elementos sujeitos a outro tipo de esforços, tais como tração, flexão, etc., pelo que neste capítulo apresenta-se unicamente as verificações regulamentares referentes a elementos à compressão.

### 3.2. EUROCÓDIGO 3 - PROJETO DE ESTRUTURAS DE AÇO

O Eurocódigo 3 é aplicado em projetos de edifícios entre outras obras de aço na engenharia civil. Rege-se pelos princípios e requisitos de segurança e de utilização das estruturas e as bases para o seu projeto e verificação presentes na EN 1990.

Neste documento são considerados apenas as condições de utilização, resistência e durabilidade das estruturas de aço. Não tratando assim de outras condições referentes ao isolamento térmico ou acústico.[17]

“O Eurocódigo 3 destina-se a ser utilizado em conjunto com:

- EN 1990 Basis of structural design
- EN 1991 Action on structures
- ENs, ETAGs ETAs relativas aos produtos de construção relevantes para as estruturas de aço
- EN 1090 Execution of steel structures – Technical requirements
- EN 1992 a EN 1999 quando se faz referência a estruturas ou a componentes de aço”

[17]

O Eurocódigo 3: Projeto de Estruturas de Aço é dividido em 6 partes, que se apresentam da seguinte forma:

- EN 1993-1 Regras gerais e regras para edifícios.
- EN 1993-2 Pontes.
- EN 1993-3 Torres, mastros e chaminés.
- EN 1993-4 Depósitos, silos e oleodutos.
- EN 1993-5 Estacas.
- EN 1993-6 Estruturas de aparelhos de elevação.

Em que EN 1993-1, é dividida em 12 subpartes, ficando disposto do seguinte modo:

- EN 1993-1-1 Regras gerais e regras para edifícios.
- EN 1993-1-2 Verificação da resistência ao fogo.
- EN 1993-1-3 Elementos e chapas finas enformados a frio.
- EN 1993-1-4 Aço inoxidável.
- EN 1993-1-5 Estruturas constituídas por placas.
- EN 1993-1-6 Resistência e estabilidade de cascas.
- EN 1993-1-7 Estruturas constituídas por placas carregadas transversalmente.
- EN 1993-1-8 Ligações.
- EN 1993-1-9 Fadiga.
- EN 1993-1-10 Tenacidade dos materiais e propriedades no sentido da espessura.
- EN 1993-1-11 Dimensionamento de estruturas com componentes tracionadas em aço.
- EN 1993-1-12 Regras suplementares para aço de alta resistência.

[18]

Neste trabalho é dedicada atenção apenas à Parte 1-1.

### 3.2.1. ANÁLISE DE ESTRUTURAS METÁLICAS

A capacidade resistente dos elementos é muito importante para uma estrutura, mas para que ela funcione do ponto de vista estrutural é necessário também que os seus esforços sejam atentamente validados.

A análise global de esforços e deslocamentos de uma estrutura metálica depende da sua rigidez e deformabilidade, mas também da sua estabilidade global e da estabilidade dos seus elementos, das características das secções transversais, do tipo de ligações, das imperfeições e da deformabilidade dos apoios.[18]

### 3.2.1.1. Análise global de elementos comprimidos

A análise global pode ser de primeira ou segunda ordem. Na análise de primeira ordem os esforços internos e os respectivos deslocamentos obtêm-se com a geometria inicial da estrutura. Numa análise de segunda ordem os esforços internos são calculados tendo em conta a configuração da deformada da estrutura.

Os efeitos de segunda ordem, numa estrutura metálica, são maioritariamente resultantes do efeito do esforço axial.

- **Análise de 1ª ordem**

Segundo o EC3-1-1 5.2.1 (3), é possível fazer apenas uma análise de primeira ordem se for verificado que:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10, \quad \text{para análise elástica} \quad (3.1)$$

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15, \quad \text{para análise plástica} \quad (3.2)$$

Em que:

- $\alpha_{cr}$  - fator pelo qual as ações de cálculo teriam de ser multiplicadas para provocar a instabilidade elástica num modo global;
- $F_{Ed}$  - valor de cálculo do carregamento da estrutura;
- $F_{cr}$  - valor crítico do carregamento.

As estruturas podem ser classificadas de nós fixos, as que cumpram os limites acima mencionadas em relação ao  $\alpha_{cr}$ , caso contrário são classificadas de nós móveis. De forma a tornar a estrutura de nós fixos pode ser aumentada a rigidez da estrutura, ou então recorrer ao uso de sistemas de contraventamento.

O parâmetro  $\alpha_{cr}$  no presente caso, é avaliado usando de base uma análise de estabilidade global ou, de uma forma simplificada usando como base uma expressão do EC3 presente na cláusula 5.2.1(4)B. No entanto este cálculo não se enquadra no presente caso de estudo.

- **Análise global 2ª ordem**

Como indicado no EC3-1-1 ponto 5.2.1 (2), os efeitos de segunda ordem devem ser tidos em conta sempre que provoquem um aumento no efeito das ações ou alterem o comportamento da estrutura de forma significativa.

Uma análise de segunda ordem tem em consideração os seguintes efeitos:

- Imperfeições globais da estrutura - efeitos de segunda ordem globais (P- $\Delta$ );
- Imperfeições locais da estrutura - efeitos de segunda ordem locais (P- $\delta$ ).

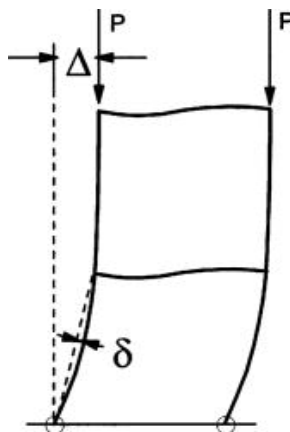


Figura 3.1 - Efeitos de segunda ordem.

### 3.2.1.2. Imperfeições

Por muito que se tente controlar a construção ocorrem sempre imperfeições, nomeadamente: falta de linearidade dos seus elementos, falta de verticalidade, excentricidade nas ligações e na aplicação das cargas, tensões residuais, etc. Este facto tem que ser atendido no cálculo visto ser responsável pela introdução de esforços secundários adicionais que, dependendo da sua grandeza e da suscetibilidade da estrutura, podem tomar valores elevados.

De acordo com o EC3-1-1, secção 5.3 as imperfeições geométricas podem ser traduzidas através de dois diferentes tipos de imperfeições:

- Imperfeições globais em estruturas e sistemas de contraventamento;
- Imperfeições locais em elementos considerados individualmente.

As imperfeições geométricas globais devem ser consideradas na análise global através de uma “imperfeição geométrica equivalente”.

Segundo o EC3-1-1, cláusula 5.3.2, o efeito das imperfeições acima referidas deve ser associado na análise global através de um conceito de imperfeição geométrica equivalente. No caso da imperfeição global de um pórtico este conceito traduz a falta de verticalidade global da estrutura que pode ser traduzida através do ângulo  $\phi$  calculado através da Equação 3.3:

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m \quad (3.3)$$

Em que:

- $\phi_0 = 1/200$
- $\alpha_h$  e  $\alpha_m$  são coeficientes de redução que dependem da altura da estrutura ( $h$ ), e do número de pilares ( $m$ ), respetivamente. Estes coeficientes são dados por:

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}, \text{ com } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0 \quad (3.4)$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5(1 + \frac{1}{m})} \quad (3.5)$$

Numa análise global é também importante ter em consideração as imperfeições locais dos elementos, traduzidas por  $e_0/L$ , onde  $e_0$  será o deslocamento máximo inicial lateralmente, e  $L$  o comprimento máximo do elemento. Os valores recomendados no EC3-1-1 estão presentes no Quadro 3.1:

Quadro 3.1 - Valores de cálculo das amplitudes das imperfeições locais  $e_0/L$  para elementos.[17]

| Curva de encurvadura | Análise elástica<br>$e_0/L$ | Análise plástica<br>$e_0/L$ |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $a_0$                | 1/350                       | 1/300                       |
| $a$                  | 1/300                       | 1/250                       |
| $b$                  | 1/250                       | 1/200                       |
| $c$                  | 1/200                       | 1/150                       |
| $d$                  | 1/150                       | 1/100                       |

Estas imperfeições iniciais globais acima mencionadas podem ser consideradas através de sistemas de forças horizontais equivalentes como é possível verificar na Figura 3.2:

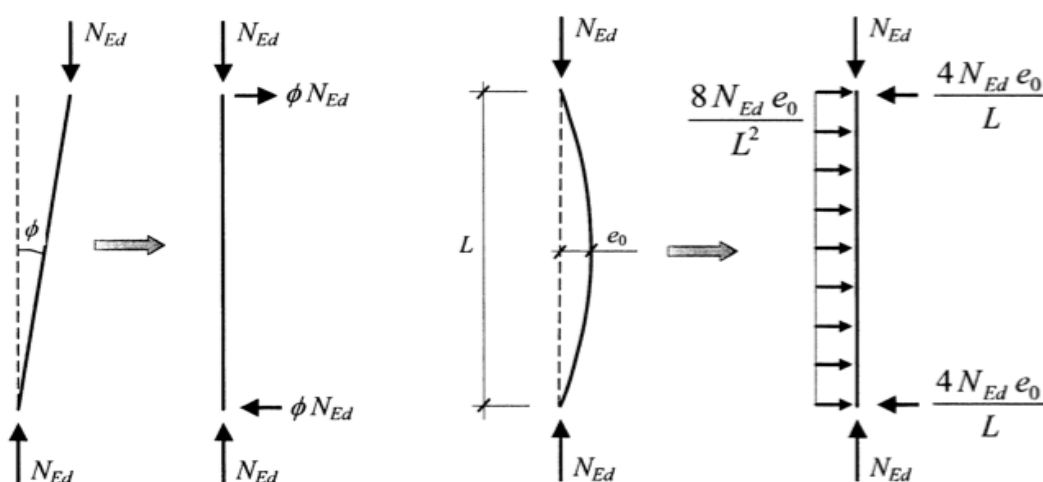


Figura 3.2 - Substituição das imperfeições iniciais por forças horizontais equivalentes.[17]

No entanto, como será possível confirmar posteriormente, no âmbito desta dissertação, as imperfeições geométricas foram consideradas através do método descrito na secção 5.3.3 do EC3-1-1, intitulada de “Imperfeições para análise dos sistemas de contraventamento”.

Apresenta-se da seguinte forma:

$$q_d = \sum N_{Ed} 8 \frac{e_0 + \delta q}{L^2}, \quad (3.6)$$

Onde:

- $q_d$  representa a força estabilizante equivalente que substitui os efeitos das deformadas iniciais dos elementos a travar por um sistema de contraventamento.
- $e_0$  corresponde à imperfeição geométrica de acordo com o Quadro 3.1, deste trabalho.

Esta força equivalente, de acordo com o EC3-1-1, apresenta-se:

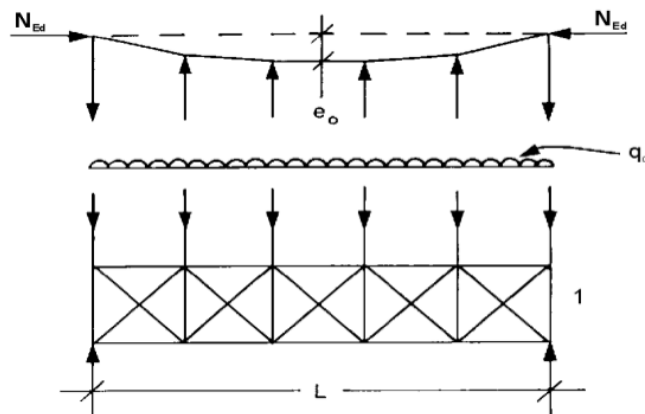


Figura 3.3 - Forças estilizadora equivalente.

### 3.2.1.3. Estabilidade das estruturas

Segundo Simões[18] e cláusula 5.2.2 (3) do EC3-1-1, os efeitos de segunda ordem e as imperfeições podem ser considerados na verificação da estabilidade de uma estrutura através de um dos seguintes métodos:

- Análise global de esforços considerando diretamente todas as imperfeições e todos os efeitos de segunda ordem;
- Análise global de esforços considerando as imperfeições globais da estrutura e os efeitos de segunda ordem globais, considerando as imperfeições locais e os efeitos de segunda ordem locais nas equações de dimensionamento à encurvadura, que será demonstrado no próximo subcapítulo e que vem definido no ponto 6.3 do EC3-1-1;
- Em alguns casos simples, verificando a estabilidade individual dos elementos através do ponto 6.3 do EC3-1-1 em que se considera os comprimentos de encurvadura que correspondem ao modo de instabilidade global da estrutura.

Perante a cláusula 5.2.2 (5) B do EC3-1-1 é permitido em estruturas porticadas que os efeitos de segunda ordem sejam incluídos nas cargas verticais, usando um processo simplificado. Este processo consiste, desde que o  $\alpha_{cr}$  correspondente da estrutura seja superior ou igual a 3, em usar o fator dado por (3.7) que majora os efeitos de primeira ordem correspondentes às cargas horizontais.

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \quad (3.7)$$

No presente trabalho é usado o segundo método acima referido.

O processo descrito no segundo item é, geralmente, o mais utilizado. Neste processo os elementos são dimensionados de acordo com a cláusula 6.3 do Eurocódigo 3, e considera os comprimentos de encurvadura iguais aos comprimentos reais. Os esforços de cálculo são obtidos através de uma análise global que tem em conta as imperfeições globais e os efeitos de segunda ordem.[18]

### 3.2.2. RESISTÊNCIA DOS ELEMENTOS À ENCURVADURA

#### 3.2.2.1. Análise local de elementos comprimidos

“A encurvadura é um fenómeno de instabilidade que se caracteriza pela ocorrência de grandes deformações transversais em elementos sujeitos a esforços de compressão.”[18]

O valor do esforço axial a partir do qual o elemento sofre deformações para além das axiais, denomina-se de carga crítica de Euler e esta baseia-se na teoria da estabilidade elástica.

A carga crítica de Euler é definida pela seguinte expressão:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_E^2} \quad (3.8)$$

Dividindo a carga crítica pela área da secção transversal do elemento é obtida uma tensão crítica, definida da seguinte forma:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{AL_E^2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (3.9)$$

Onde  $L_E$  é o comprimento de encurvadura de um elemento fictício com a mesma carga crítica.

Sendo  $\lambda = L_E/i$ , onde  $i$  é o corresponde raio de giração e é definido por  $i = \sqrt{I/A}$ .

Existem dois tipos de comportamento num elemento. Considerando um elemento sem imperfeições, este apenas irá colapsar por encurvadura em regime elástico-plástico, se a tensão crítica for inferior a tensão de cedência ( $\sigma_c$ ). Caso o elemento considerado seja pouco esbelto, este colapsa por plastificação da secção se a tensão que atua sobre ele igualar a tensão de cedência ( $\sigma_c$ ).

Assim é definido um limite entre estes dois comportamentos traduzido pelo coeficiente de esbelteza,  $\lambda_1$ .

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_1^2} = \sigma_c \Rightarrow \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_c}} \quad (3.10)$$

Tendo por base este coeficiente de esbelteza obtemos o coeficiente de esbelteza normalizada,  $\bar{\lambda}$ . Este coeficiente é definido por:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad (3.11)$$

Após o que foi anteriormente mencionado é possível mostrar, através do gráfico seguinte, o comportamento de um elemento comprimido considerado geometricamente perfeito.

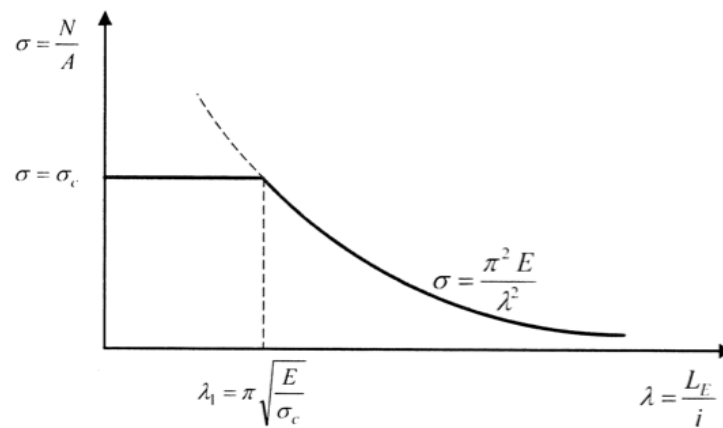


Figura 3.4 - Relação  $\sigma - \lambda$  de um elemento linear comprimido.[18]

O fenómeno de encurvadura por compressão não é o único fenómeno de encurvadura em que é possível ocorrer num elemento comprimido. Em elementos, essencialmente, constituídos por secções abertas, existe uma forte possibilidade de ocorrer encurvadura por torção e encurvadura por flexão-torção, como é demonstrado na Figura 3.4

Contudo, não se apresentará a sua formulação de dimensionamento visto nesta tese não ocorrer este fenómeno.

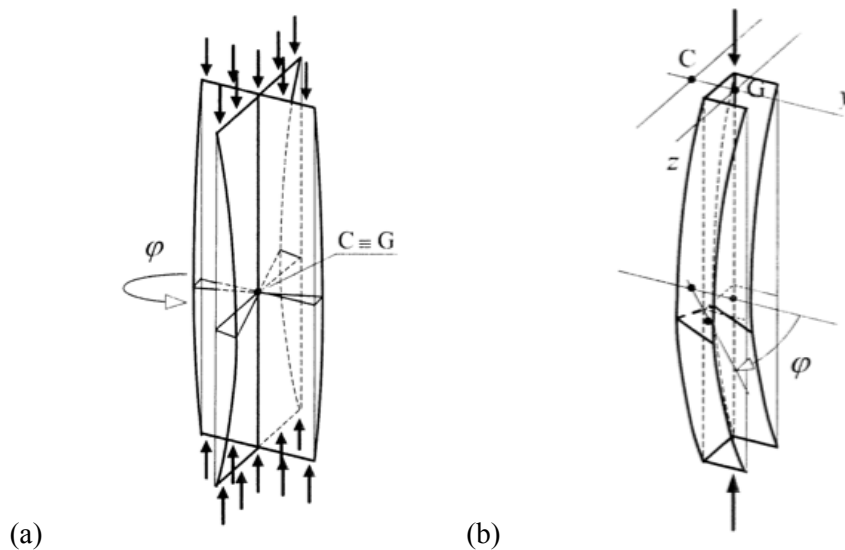


Figura 3.5 - (a)Encurvadura por torção. (b) Encurvadura flexão-torção. [18]

Como foi referido anteriormente, inerente à expressão da carga crítica, está o comprimento de encurvadura de um elemento fictício com a mesma carga crítica. Assim, a sua avaliação é um passo essencial no dimensionamento de elementos comprimidos. A seguir são apresentados comprimentos de encurvadura equivalentes em função do comprimento real do elemento para várias condições de apoio.

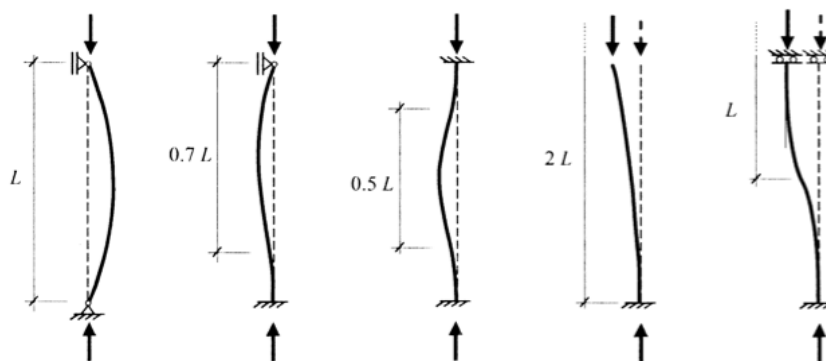


Figura 3.6 - Comprimento de encurvadura  $L_E$  em função do comprimento  $L$ . [18]

### 3.2.2.2. Verificação da resistência à encurvadura devido à compressão

A verificação da resistência de secções transversais à encurvadura de elementos comprimidos axialmente, de acordo com o EC3-1-1 cláusula 6.3.1.1, é feita usando a seguinte relação:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.12)$$

Na qual  $N_{Ed}$  representa o valor de calculo do esforço axial de compressão e  $N_{b,Rd}$  é o valor de cálculo da resistência à encurvadura do elemento comprimido, e que é definido por:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3.13)$$

Onde  $\chi$  corresponde ao fator de redução e é definido através da Equação (3.14):

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ com } \chi \leq 1,0 \quad (3.14)$$

Na qual está presente um parâmetro  $\phi$  que é calculado com:

$$\phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (3.15)$$

Na equação anterior, segundo a cláusula 6.3.1.2 (2) do Eurocódigo 3,  $\alpha$  é um factor de imperfeição que corresponde a uma das curvas de encurvadura, indicadas na Figura 3.8, que posteriormente é obtido através do Quadro 3.1.

Quadro 3.2 - Fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura. [17]

| Curva de encurvadura          | $a_0$ | $a$  | $b$  | $c$  | $d$  |
|-------------------------------|-------|------|------|------|------|
| Fator de imperfeição $\alpha$ | 0,13  | 0,21 | 0,34 | 0,49 | 0,76 |

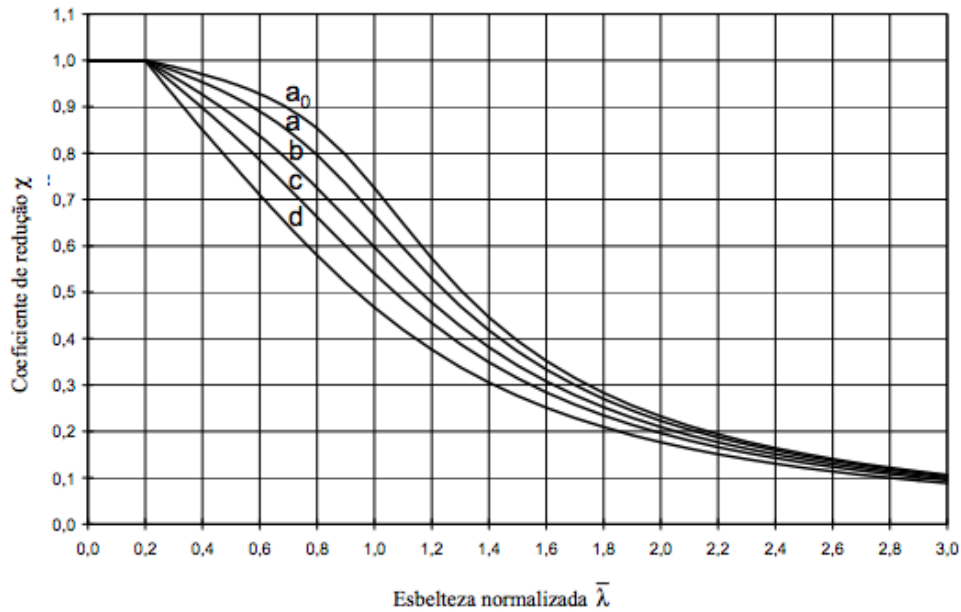


Figura 3.7 - Curvas de encurvadura.[17]

Apresenta-se na figura abaixo a rotina de cálculo da resistência de um elemento comprimido ( $N_{b,Rd}$ ). A segurança é verificada quando a relação esforço axial atuante e esforço axial resistente é inferior ou igual a 1,0 (ver Equação 3.12)

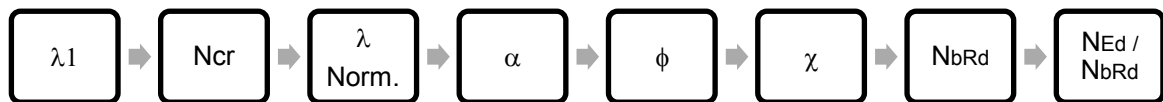


Figura 3.8 - Algoritmo para verificação da resistência à encurvadura por compressão.

### 3.2.2.3. Verificação da resistência à encurvadura devido à flexão

Num processo similar ao apontado no subcapítulo anterior, o EC3-1-1 cláusula 6.3.2 descreve como calcular a resistência à encurvadura de um elemento sem travamento lateral e solicitado à flexão em relação ao eixo principal através de:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.16)$$

Onde  $M_{Ed}$  é o valor de cálculo do momento fletor atuante e  $M_{b,Rd}$  o correspondente valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura, que se define através de:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3.17)$$

Em que:

- $W_y$  é o módulo de flexão e pode tomar valores diferentes de acordo com a Classe da secção transversal do perfil em causa:

$W_y = W_{pl,y}$  para secções transversais de classe 1 ou 2;

$W_y = W_{el,y}$  para secções transversais de classe 3;

$W_y = W_{eff,y}$  para secções transversais de classe 4;

De forma similar será calculado o fator de redução:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \text{ com } \chi_{LT} \leq 1,0 \quad (3.18)$$

É de fácil interpretação que a expressão do fator de redução é exatamente a mesma, no entanto o que varia e influencia diretamente esta expressão são os valores do fator de imperfeição,  $\alpha_{LT}$ , que é obtido através do Quadro 3.3, onde dependendo se trata de uma secção laminada ou de uma secção soldada equivalente. E o valor da esbelteza normalizada, que é apresentado de acordo com a Equação 3.18.[17]

Estes dois valores influenciam diretamente o parâmetro  $\phi$ , que por sua vez influencia o diretamente o denominador da Equação (3.19). Desta forma o parâmetro  $\phi$ , é definido por:

$$\phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (3.19)$$

Quadro 3.3 - Valores recomendados dos fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura lateral.[17]

| Curva de encurvadura                  | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Fator de imperfeição<br>$\alpha_{LT}$ | 0,21     | 0,34     | 0,49     | 0,76     |

Quadro 3.4 - Curvas de encurvadura lateral recomendadas para as secções transversais quando utilizada a Equação 3.19[17]

| Secção transversal          | Limites      | Curva de encurvadura |
|-----------------------------|--------------|----------------------|
| Secções em I laminadas      | $h/b \leq 2$ | <i>a</i>             |
|                             | $h/b > 2$    | <i>b</i>             |
| Secções em I soldadas       | $h/b \leq 2$ | <i>c</i>             |
|                             | $h/b > 2$    | <i>d</i>             |
| Outras secções transversais | -            | <i>d</i>             |

O valor da esbelteza normalizada, de acordo com a cláusula 6.3.2.2 (1) do EC3-1-1, é definido por:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (3.20)$$

$M_{cr}$  momento crítico elástico para encurvadura lateral.

- Momento crítico

“A encurvadura lateral consiste na deformação lateral da parte comprimida de uma secção.”[18]. A resistência de um elemento depende essencialmente do momento crítico,  $M_{cr}$ , sendo este o momento máximo que em condições ideais que o elemento suporta sem sofrer encurvadura lateral.

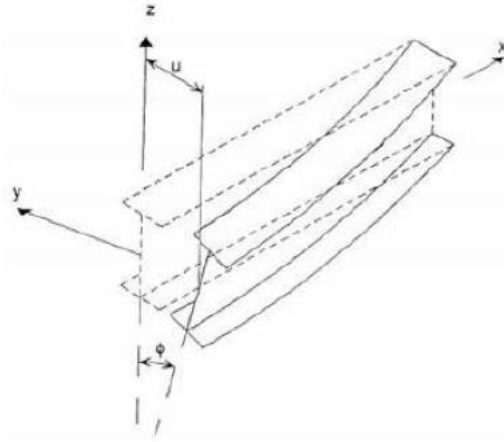


Figura 3.9 - Efeito da encurvadura lateral numa viga não restringida lateralmente.[19]

São vários os fatores dos quais o momento crítico esta dependente, sendo eles:

- carregamento;
- condições de apoio;
- comprimento do elemento entre secções lateralmente contraventadas;
- rigidez de flexão lateral;
- rigidez de torção;
- rigidez de empenamento.

Para o seu cálculo é usada a seguinte expressão:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z L)^2} \left\{ \left[ \left( \frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 G I_T}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right]^{0,5} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right\} \quad (3.21)$$

Onde:

- $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  são coeficientes que dependem da forma dos diagramas de momentos fletores e das condições de apoio. Estes coeficientes são obtidos a partir do Anexo A.4;
- $k_z$  e  $k_w$  são os factores correspondente ao comprimento efetivo que dependem das condições de apoio nas extremidades. Duma forma conservativa pode ser adotar  $k_z = k_w = 1,0$ ;

- $z_g = (z_a - z_s)$ , no qual  $z_a$  e  $z_s$  são as coordenadas do ponto de aplicação da carga e do centro de corte em relação ao centro de gravidade da secção em causa. São positivos quando localizados na zona comprimida e valores negativos na zona tracionada;
- $z_j$  é um parâmetro que traduz o grau de assimetria da secção em relação ao eixo y;
- $I_W$  corresponde à constante de empenamento;
- $I_T$  constante de torção uniforme;
- $I_z$  é o momento de inércia da respetiva secção em relação ao eixo z-z;
- $L$ ,  $E$  e  $G$  são, respetivamente, o comprimento entre secções da viga contraventadas lateralmente; Os módulos de elasticidade longitudinal e transversal.

Apresenta-se na figura abaixo a rotina de cálculo da resistência à encurvadura por flexão. A segurança é verificada quando a relação momento fletor atuante e momento fletor resistente é inferior ou igual a 1,0. (ver Equação 3.16)[17]

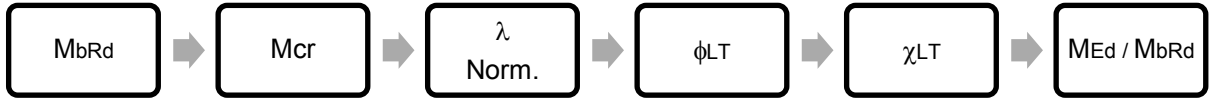


Figura 3.10 - Algoritmo para a verificação da resistência à encurvadura por flexão-torção.

#### 3.2.2.4. Verificação da resistência à encurvadura de elementos uniformes em flexão composta por compressão

Depois de verificada parcialmente a resistência à encurvadura devido à compressão e à flexão é, então por último, necessário a verificação da resistência à encurvadura de elementos em flexão composta por compressão.

De acordo com o EC3-1-1 cláusula 6.3.3 (4), os elementos devem satisfazer as seguintes condições:

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (3.22)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (3.23)$$

Onde:

- $N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$  e  $M_{z,Ed}$  - valores de cálculo do esforço de compressão e dos momentos máximos no elemento, respetivamente, em relação aos eixos y-y e z-z;
- $\Delta M_{y,Ed}$  e  $\Delta M_{z,Ed}$  - momentos devidos aos deslocamento do eixo neutro para as secções de classe 4, quadro presente no Anexo A.5;
- $\chi_y$  e  $\chi_z$  - coeficientes de redução devidos à encurvadura por flexão, calculados de acordo com a Equação 3.12;
- $\chi_{LT}$  - coeficiente de redução devido à encurvadura lateral, calculado de acordo com a Equação 3.16;

- $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$  e  $k_{zz}$  - fatores de interação que são determinados através das tabelas presentes no Anexo A.2.

De acordo com a cláusula 6.3.3 (5) do EC3-1-1, os fatores de interação dependem do método escolhido. Esta cláusula possui três que se transcreve a baixo.

*“NOTA 1: Os fatores de interação  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$  e  $k_{zz}$  foram deduzidos a partir de dois métodos alternativos. Os valores desses fatores poderão ser obtidos no Anexo A (método alternativo 1) ou Anexo B (método alternativo 2).”*

*“NOTA 2: O Anexo Nacional poderá definir a escolha entre o método alternativo 1 e o método alternativo 2.”*

*“NOTA 3: Como simplificação, as verificações poderão efetuar-se apenas no domínio elástico.”*

[17]

**Nota:** Os parâmetros considerados para a aplicação da EN 1993 estão resumidos nos pontos seguintes.

- $\gamma_{M0}$ (EN1993-1-1) = 1,0
- $\gamma_{M1}$  (EN1993-1-1) = 1,0
- $\gamma_{M2}$  (EN1993-1-1) = 1,25

Apresenta-se na figura abaixo a rotina de cálculo de elementos sujeitos a esforços de compressão e flexão.

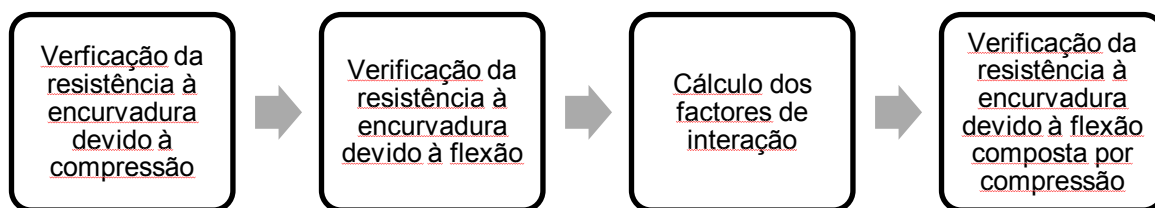


Figura 3.11 - Algoritmo para a verificação da resistência à encurvadura.

### 3.3. EUROCÓDIGO 5 - PROJETO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA

O Eurocódigo 5 é aplicado em projetos de estruturas de madeira, isto é, feitas de madeira ou de derivados de madeira sendo estes ligados por ligadores ou colagem.

Neste documento são considerados apenas as condições de utilização, resistência e durabilidade das estruturas de madeira. Não tratando assim de outras condições referentes ao isolamento térmico ou acústico.

Na Parte 1-1 do Eurocódigo 5 são fixados os termos de base para o projeto de edifícios entre outras obras da engenharia civil.

Esta parte trata apenas de regras detalhadas que são essencialmente aplicadas em edifícios correntes. Dito isto, esta Norma não contempla os princípios necessários para:

- o projeto de pontes,
- a resistência ao fogo,
- o projeto de estruturas submetidas a uma prolongada exposição a temperaturas superiores a 60 °C,
- aspetos particulares de estruturas especiais.

Este documento contém mais duas partes, que são elas:

- Parte 1-2 Regras complementares para o projeto sobre ação do fogo.
- Parte 2 Pontes

[20]

### 3.3.1. ENQUADRAMENTO

A madeira, entre outros materiais estruturais, é o material com maior capacidade de resistência à flexão, sendo também muito capaz na sua capacidade de resistência à compressão. A capacidade de um elemento de madeira, pode ser esgotada por falhas na secção ou por falhas de instabilização do elemento.

A encurvadura clássica de Euler é o modo de instabilidade mais típico associado a elementos comprimidos, ainda que, o bambeamento também pode ocorrer em casos onde a compressão é combinada flexão composta.

No âmbito deste trabalho, é mostrado nos subcapítulos seguintes as características físicas e mecânicas de elementos de madeira, sendo também apresentado o procedimento associado ao cálculo da instabilidade por encurvadura clássica de Euler, de acordo com Eurocódigo 5.

### 3.3.2. TIPOS E RESISTÊNCIAS DE MADEIRA

A madeira é um derivado de um organismo vivo, a Árvore. É tanta a diversidade deste organismo e as suas condições de crescimento são tão diversas que faz com que a madeira seja um material realmente complexo do ponto de vista estrutural e morfológico.

Em função das suas características anatómicas, tanto as árvores como a madeira comercial pode ser dividida em dois grupos vulgarmente denominados por Resinosas ou Folhosas.

É assim que de acordo com a norma europeia, EN 338:2003 “Structural Timber – Strength classes”, são definidas as classes de resistência.

As Resinosas são identificadas com a letra C do termo em inglês *Coniferous* e o número que segue a consoante indica o valor da resistência característica à flexão na direção do fio.

As Folhosas usam a letra D como identificação devido ao termo inglês *Deciduous* seguido do número que indica o valor da resistência característica à flexão na direção do fio.[21]

Nas tabelas que se seguem indicam-se as propriedades físicas e mecânicas das madeiras resinosas e folhosas.

Quadro 3.5 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira para estruturas (resinosas).[21]

|                                                     |               | C14  | C16  | C18  | C20  | C22  | C24  | C27  | C30  | C35  | C40  | C45  | C50  |
|-----------------------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Propriedades resistentes em N/mm <sup>2</sup> (MPa) |               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Flexão                                              | $f_{m,k}$     | 14   | 16   | 18   | 20   | 22   | 24   | 27   | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   |
| Tracção                                             | $f_{t,0,k}$   | 8    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 16   | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   |
| Tracção                                             | $f_{t,90,k}$  | 0,4  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  |
| Compressão                                          | $f_{c,0,k}$   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 25   | 26   | 27   | 29   |
| Compressão                                          | $f_{c,90,k}$  | 2,0  | 2,2  | 2,2  | 2,3  | 2,4  | 2,5  | 2,6  | 2,7  | 2,8  | 2,9  | 3,1  | 3,2  |
| Corte                                               | $f_{v,k}$     | 1,7  | 1,8  | 2,0  | 2,2  | 2,4  | 2,5  | 2,8  | 3,0  | 3,4  | 3,8  | 3,8  | 3,8  |
| Propriedades de rigidez em KN/mm <sup>2</sup> (GPa) |               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Módulo de Elasticidade                              | $E_{0,mean}$  | 7    | 8    | 9    | 9,5  | 10   | 11   | 11,5 | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   |
| Módulo de Elasticidade (5º percentil)               | $E_{0,05}$    | 4,7  | 5,4  | 6,0  | 6,4  | 6,7  | 7,4  | 7,7  | 8,0  | 8,7  | 9,4  | 10,0 | 10,7 |
| Módulo E                                            | $E_{90,mean}$ | 0,23 | 0,27 | 0,30 | 0,32 | 0,33 | 0,37 | 0,38 | 0,40 | 0,43 | 0,47 | 0,50 | 0,53 |
| Módulo de distorção                                 | G             | 0,44 | 0,50 | 0,56 | 0,59 | 0,63 | 0,69 | 0,72 | 0,75 | 0,81 | 0,88 | 0,94 | 1,00 |
| Massa volúmica em Kg/m <sup>3</sup>                 |               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Característica                                      | $\rho_k$      | 290  | 310  | 320  | 330  | 340  | 350  | 370  | 380  | 400  | 420  | 440  | 460  |
| Média                                               | $\rho_{mean}$ | 350  | 370  | 380  | 390  | 410  | 420  | 450  | 460  | 480  | 500  | 520  | 550  |

Quadro 3.6 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira para estruturas (folhosas).[21]

|                                                     |               | D30  | D35  | D40  | D50  | D60  | D70  |
|-----------------------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|
| Propriedades resistentes em N/mm <sup>2</sup> (MPa) |               |      |      |      |      |      |      |
| Flexão                                              | $f_{m,k}$     | 30   | 35   | 40   | 50   | 60   | 70   |
| Tracção                                             | $f_{t,0,k}$   | 18   | 21   | 24   | 30   | 36   | 42   |
| Tracção                                             | $f_{t,90,k}$  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  |
| Compressão                                          | $f_{c,0,k}$   | 23   | 25   | 26   | 29   | 32   | 34   |
| Compressão                                          | $f_{c,90,k}$  | 8,0  | 8,4  | 8,8  | 9,7  | 10,5 | 13,5 |
| Corte                                               | $f_{v,k}$     | 3,0  | 3,4  | 3,8  | 4,6  | 5,3  | 6,0  |
| Propriedades de rigidez em KN/mm <sup>2</sup> (GPa) |               |      |      |      |      |      |      |
| Módulo de Elasticidade                              | $E_{0,mean}$  | 10   | 10   | 11   | 14   | 17   | 20   |
| Módulo de Elasticidade (5º percentil)               | $E_{0,05}$    | 8,0  | 8,7  | 9,4  | 11,8 | 14,3 | 16,8 |
| Módulo E                                            | $E_{90,mean}$ | 0,64 | 0,69 | 0,75 | 0,93 | 1,13 | 1,33 |
| Módulo de distorção                                 | G             | 0,60 | 0,65 | 0,70 | 0,88 | 1,06 | 1,25 |
| Massa volúmica em Kg/m <sup>3</sup>                 |               |      |      |      |      |      |      |
| Característica                                      | $\rho_k$      | 530  | 560  | 590  | 650  | 700  | 900  |
| Média                                               | $\rho_{mean}$ | 640  | 670  | 700  | 780  | 840  | 1080 |

Da dificuldade em obter peças de madeira com secções e comprimentos projetados, surgiu um produto derivado da madeira, a madeira lamelada colada.

Este derivado é uma união de peças de madeira maciça, denominadas de lamelas que são unidas através de ligações do tipo *fingerjoint*, criando assim elementos mais compridos com características semelhantes às características da madeira maciça.

As lamelas podem ser compostas de duas formas, formando a madeira lamelada colada homogénea e combinada.

A madeira laminada colada homogénea é constituída por lamelas pertencentes à mesma espécie e/ou à mesma classe de resistência. Ao contrário da madeira laminada colada combinada, que por sua vez é constituída por lamelas de espécies e classes de resistência diferentes.

As classes de resistência deste derivado estão definidas na norma EN 1194:2003: Timber Structures – Glued laminated timber – Strength classes and determination of characteristic values.

Este tipo de madeira é identificado com as iniciais GL seguidas de um número que define a resistência característica à flexão na direção do fio e por último seguida de uma letra minúscula, *h* ou *c*. Estas letras indicam se trata de uma madeira laminada colada homogénea (*h*) ou de uma madeira laminada colada combinada (*c*).[21]

Quadro 3.7 - Propriedades mecânicas de madeira lamelada colada.[21]

| Propriedade                  | Símbolo         | Unidade           | GL24h | GL28h | GL32h | GL36h | GL24c | GL28c | GL32c | GL36c |
|------------------------------|-----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Flexão                       | $f_{m,g,k}$     | MPa               | 24    | 28    | 32    | 36    | 24    | 28    | 32    | 36    |
| Tracção                      | $f_{t,g,k}$     | MPa               | 16,5  | 19,5  | 22,5  | 26    | 14    | 16,5  | 19,5  | 22,5  |
| Tracção                      | $f_{t,90,g,k}$  | MPa               | 0,4   | 0,45  | 0,5   | 0,6   | 0,35  | 0,4   | 0,5   | 0,6   |
| Compressão                   | $f_{c,g,k}$     | MPa               | 24    | 26,5  | 29    | 31    | 21    | 24    | 29    | 31    |
| Compressão                   | $f_{c,90,g,k}$  | MPa               | 2,7   | 3,0   | 3,3   | 3,6   | 2,4   | 2,7   | 3,3   | 3,6   |
| Corte                        | $f_{v,g,k}$     | MPa               | 2,7   | 3,2   | 3,8   | 4,3   | 2,2   | 2,7   | 3,8   | 4,3   |
| Módulo de Elasticidade       | $E_{0,g,mean}$  | GPa               | 11,6  | 12,6  | 13,7  | 14,7  | 11,6  | 12,6  | 13,7  | 14,7  |
| Módulo Elast. (5º percentil) | $E_{0,g,k}$     | GPa               | 9,4   | 10,2  | 11,1  | 11,9  | 9,4   | 10,2  | 11,1  | 11,9  |
| Módulo Elast. perpendicular  | $E_{90,g,mean}$ | GPa               | 0,39  | 0,42  | 0,46  | 0,49  | 0,32  | 0,39  | 0,46  | 0,49  |
| Módulo de distorção          | $G_{0,mean}$    | GPa               | 0,72  | 0,78  | 0,85  | 0,91  | 0,59  | 0,72  | 0,85  | 0,91  |
| Massa Volúmica               | $P_{g,k}$       | Kg/m <sup>3</sup> | 380   | 410   | 430   | 450   | 350   | 380   | 430   | 450   |

### 3.3.3. VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA – ELEMENTOS COMPRIMIDOS

Apesar de uma peça em compressão pura instabilizar por flexão do eixo mais fraco, ou seja, no caso de uma secção retangular o eixo paralelo à sua menor dimensão, em geral o plano crítico de encurvadura depende de vários fatores, tais como o estado de tensão, condições de apoio e dimensões da secção, podendo assim a instabilidade ocorrer em qualquer direção.

Segundo o EC5-1-1, a verificação de segurança à encurvadura segundo os eixos principais de inércia é suficiente para assegurar a segurança e torna um problema de mais simples resolução.

Posto isto, e perante a regulamentação, começa-se por definir nos dois planos perpendiculares da peça as esbeltezas  $\lambda_y$  e  $\lambda_z$ . Sendo definidas da seguinte forma:

$$\lambda_y = \frac{L_{v,y}}{i_y} \quad (3.24)$$

$$\lambda_z = \frac{L_{v,z}}{i_z} \quad (3.25)$$

Sendo:

- $L_{v,y}$  e  $L_{v,z}$  os comprimentos de encurvadura para a flexão em torno do eixo y e do eixo z, correspondentemente;
- $i_y$  e  $i_z$  os correspondentes raios de giração em relação ao mesmos eixos.

Segundo o EC5-1-1, as curvas de encurvadura são definidas segundo as esbeltezas relativas que se apresentam da seguinte forma:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (3.26)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (3.27)$$

De uma forma conservativa do ponto de vista da segurança, de acordo com a cláusula 6.3.1 (2) do EC5-1-1, o valor característico da resistência à compressão na direção do fio e o quantilho de 5% do módulo de elasticidade deve ser usado nas expressões anteriores.

Segundo a cláusula 6.3.2 (2), não será necessário fazer uma verificação da encurvadura quando ambas as esbeltezas relativas forem inferiores a 0,3. Caso esta cláusula se verifique será então necessário verificar as relações presentes na cláusula 6.2.4 do EC5-1-1.

Caso os valores das respetivas esbeltezas sejam superiores ao limite acima referenciado deve se recorrer das seguintes expressões para verificação do risco de encurvadura.

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.28)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.29)$$

- Sendo  $\sigma_{c,0,d}$ ,  $\sigma_{m,y,d}$  e  $\sigma_{m,z,d}$  os valores das tensões normais de compressão e flexão em torno do eixo y e do eixo z, respetivamente.
- $f_{c,0,d}$ ,  $f_{m,y,d}$  e  $f_{m,z,d}$  são os valores de cálculo das resistências e são definidos pelas seguintes equações:

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{c,0,k} \quad (3.30)$$

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{m,k} \quad (3.31)$$

- Sendo  $k_{mod}$  um fator de modificação que tem em conta a classe de serviço da madeira, e o efeito da duração da carga. Valores para este coeficiente é são apresentados no Quadro 3.9, abaixo apresentado.

- O valor de  $k_m$  é o factor que considera a redistribuição dos esforços de flexão na secção do elemento. Este coeficiente assume o valor de 0,7 para secções quadradas e 1,0 para outros tipos de secção.
- Os valores de  $k_{c,y}$  e de  $k_{c,z}$  são os coeficientes de encurvadura, sendo calculados da seguinte forma:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (3.32)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad (3.33)$$

- Sendo os respetivos coeficientes  $k_y$  e  $k_z$  definidos da seguinte forma:

$$k_y = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,y} - 0,3)) + \lambda_{rel,y}^2 \quad (3.34)$$

$$k_z = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3)) + \lambda_{rel,z}^2 \quad (3.35)$$

- $\beta_c$  denominado por fator de retidão, que pode tomar um valor de 0,2 para madeira maciça e para madeira lamelada colada 0,1.

Quadro 3.8- Valores atribuídos ao  $k_{mod}$ .

| Material               | Standard                                                       | Service class | Load-duration class |                  |                    |                   |                      |
|------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|------------------|--------------------|-------------------|----------------------|
|                        |                                                                |               | Permanent action    | Long term action | Medium term action | Short term action | Instantaneous action |
| Solid timber           | EN 14081-1                                                     | 1             | 0,60                | 0,70             | 0,80               | 0,90              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 2             | 0,60                | 0,70             | 0,80               | 0,90              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 3             | 0,50                | 0,55             | 0,65               | 0,70              | 0,90                 |
| Glued laminated timber | EN 14080                                                       | 1             | 0,60                | 0,70             | 0,80               | 0,90              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 2             | 0,60                | 0,70             | 0,80               | 0,90              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 3             | 0,50                | 0,55             | 0,65               | 0,70              | 0,90                 |
| LVL                    | EN 14374, EN 14279                                             | 1             | 0,60                | 0,70             | 0,80               | 0,90              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 2             | 0,60                | 0,70             | 0,80               | 0,90              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 3             | 0,50                | 0,55             | 0,65               | 0,70              | 0,90                 |
| Plywood                | EN 636<br>Part 1, Part 2, Part 3<br>Part 2, Part 3<br>Part 3   | 1             | 0,60                | 0,70             | 0,80               | 0,90              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 2             | 0,60                | 0,70             | 0,80               | 0,90              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 3             | 0,50                | 0,55             | 0,65               | 0,70              | 0,90                 |
| OSB                    | EN 300<br>OSB/2<br>OSB/3, OSB/4<br>OSB/3, OSB/4                | 1             | 0,30                | 0,45             | 0,65               | 0,85              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 1             | 0,40                | 0,50             | 0,70               | 0,90              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 2             | 0,30                | 0,40             | 0,55               | 0,70              | 0,90                 |
| Particle-board         | EN 312<br>Part 4, Part 5<br>Part 5<br>Part 6, Part 7<br>Part 7 | 1             | 0,30                | 0,45             | 0,65               | 0,85              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 2             | 0,20                | 0,30             | 0,45               | 0,60              | 0,80                 |
|                        |                                                                | 1             | 0,40                | 0,50             | 0,70               | 0,90              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 2             | 0,30                | 0,40             | 0,55               | 0,70              | 0,90                 |
| Fibreboard, hard       | EN 622-2<br>HB.LA, HB.HLA 1 or 2<br>HB.HLA1 or 2               | 1             | 0,30                | 0,45             | 0,65               | 0,85              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 2             | 0,20                | 0,30             | 0,45               | 0,60              | 0,80                 |
| Fibreboard, medium     | EN 622-3<br>MBH.LA1 or 2<br>MBH.HLS1 or 2<br>MBH.HLS1 or 2     | 1             | 0,20                | 0,40             | 0,60               | 0,80              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 1             | 0,20                | 0,40             | 0,60               | 0,80              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 2             | —                   | —                | —                  | 0,45              | 0,80                 |
| Fibreboard, MDF        | EN 622-5<br>MDF.LA, MDF.HLS<br>MDF.HLS                         | 1             | 0,20                | 0,40             | 0,60               | 0,80              | 1,10                 |
|                        |                                                                | 2             | —                   | —                | —                  | 0,45              | 0,80                 |

# 4

## CASO DE ESTUDO

### 4.1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo o dimensionamento de pontes metálicas com contraventamentos em madeira, usando as devidas metodologias, especificações e disposições presentes nas Normas Europeias, sendo do âmbito desta tese, apenas, as verificações necessárias à estabilidade da encurvadura de elementos comprimidos.

Neste capítulo são apresentados os condicionamentos e requisitos que a ponte obedeceu, a solução estrutural, os critérios de projeto e por último e identifica-se os elementos condicionados pela encurvadura. Estes elementos serão a base para o desenvolvimento desta dissertação.

### 4.2. APRESENTAÇÃO GERAL DO CASO DE ESTUDO – PONTE MB36

O presente caso de estudo corresponde a uma ponte modular - Modular Bridge (MB36) – que permite vencer um vão simplesmente apoiado de 36,40 metros. Trata-se de uma estrutura modular pré-fabricada, constituída por 13 módulos de 2,80 metros que poderá ser adaptável a vãos de comprimentos inferiores e múltiplos de 2,80 m.

Este tipo de pontes está associado a estruturas provisórias de fácil e rápida construção com o propósito de permitir o atravessamento de vales ou rios e assim estabelecer vias de comunicação de extrema importância para as populações locais.

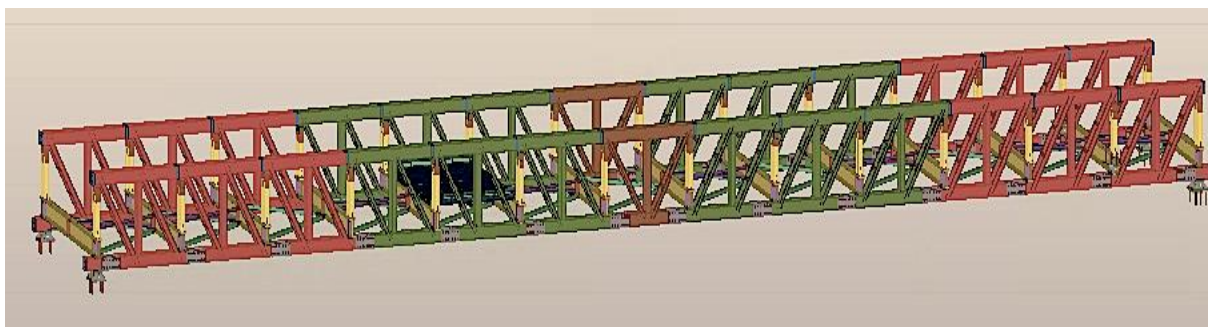


Figura 4.1 - Modelo 3D da ponte MB36.

#### 4.2.1. CONDICIONAMENTOS E REQUISITOS

O estudo e projeto desta ponte foram subordinados por vários tipos de condicionamentos e requisitos, tais como rodoviários, regulamentares e estruturais:

- Vão máximo de 36,4 m;
- Perfil longitudinal de alinhamento reto;
- Perfil transversal com largura livre de circulação de 4,20 metros e sem sobrelevação;
- Capacidade de carga da ponte para as cargas regulamentares AASHTO LFRD 2017 (HL-93);
- Estrutura metálica composta por módulos com um comprimento entre 2,80 m e 4,20 m;
- Ligações entre módulos: Parafusos e/ou Cavilhas;
- Acabamento da estrutura: galvanizado a quente;
- Tabuleiros metálicos com superfície anti deslizante;
- Equipamentos ou acessórios: guarda-rodas;

Face à especificidade da ponte e, tendo em conta o seu funcionamento, o seu fabrico e o seu transporte foram definidas algumas premissas a respeitar, salientando-se:

- Aço europeu da classe S355 MPa;
- Verificação estrutural de acordo com a norma europeia EN 1993;
- Requisitos técnicos para a execução da estrutura metálicas de acordo com a EN 1090;
- Ligações não pré-esforçadas com parafusos da classe 10.9;
- Classe de execução EXC3;
- Transporte em contentores;

Tendo por base os requisitos definiu-se uma solução estrutural para a ponte modular composta por duas treliças metálicas Pratt dispostas lateralmente à via e com o tabuleiro posicionado acima da corda inferior – treliça do tipo “*half-through*” ou “*pony truss*”.

Apresenta-se de seguida imagens do processo de fabrico e da pré-montagem da ponte em fábrica.



Figura 4.2 - Montagem do módulo.



Figura 4.3 - Inspeção de soldaduras.



Figura 4.4 - Vista geral do módulo central.



Figura 4.5 - Pré-montagem da ponte MB36 em fábrica.



Figura 4.6 - Vista da ponte MB36 após pré-montagem em fábrica.

#### 4.2.2. SOLUÇÃO ESTRUTURAL

O conceito estrutural da ponte modular MB36 consiste em dois planos de treliça do tipo Pratt longitudinais laterais ligados por vigas transversais, designadas por travessas, fixadas à corda inferior da treliça, e sobre as quais se apoia o pavimento de circulação dos veículos.

Os perfis dos módulos treliçados – cordas, diagonais e montantes - e a travessa de apoio do pavimento são do tipo comerciais europeus (HEA, HEB, UNP, IPE).

A estrutura de travamento horizontal responsável pela resistência às ações do vento é do tipo V estabelecido por diagonais em perfil tubular (SHSC). Com a função de estabilização das travessas e também de resistência às ações de frenagem definiram-se a meio vão das mesmas cantoneiras (CAE) dispostas em forma de cruz. (Figura 4.8)

O pavimento é constituído por módulos pré-fabricados em estrutura metálica com um acabamento na face superior do tipo epóxi com função de anti deslizante. A estrutura do pavimento consiste em nervuras em “U” dispostas longitudinalmente e a circulação dos rodados é feita sobre uma chapa disposta na face superior das nervuras. Os módulos de pavimento apresentam um funcionamento de simplesmente apoiados e têm por função a transmissão de carga rodoviária às travessas que, por sua vez, encaminham as ações às treliças.

Os alinhamentos de extremidade da ponte são compostos por peças locais especiais que permitem acomodar a concentração de tensões resultantes do funcionamento de apoio da ponte.

Apresenta-se na figura seguinte o alçado e o corte transversal tipo da ponte MB36.

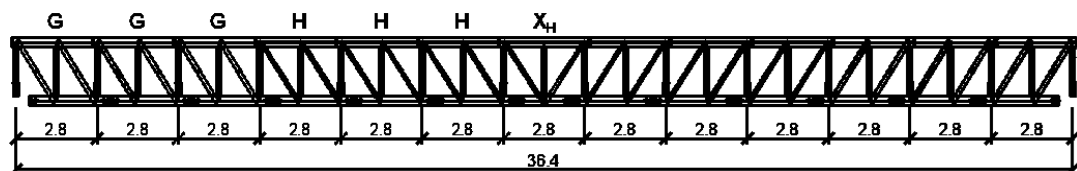


Figura 4.7 - Alçado da ponte MB36 e designação dos módulos que a constituem.

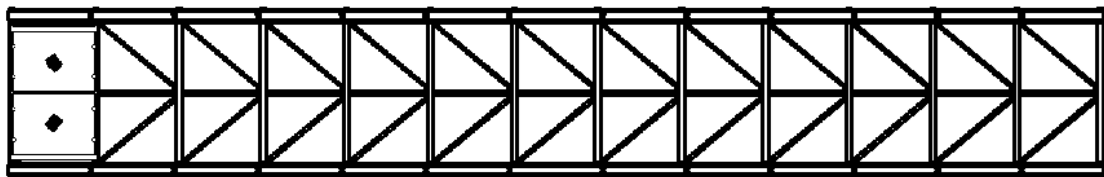


Figura 4.8 - Planta da ponte MB36.

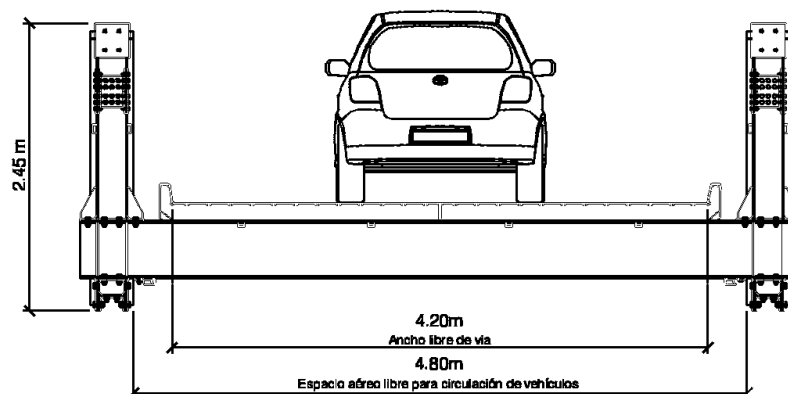


Figura 4.9 - Corte transversal tipo.

As ligações entre módulos são realizadas ao nível da corda superior através de ligações aparafusadas de topo, e ao nível da corda inferior através de uma ligação aparafusada do tipo cobre-juntas.

#### 4.2.3. PROCESSO E FASEAMENTO CONSTRUTIVO

As operações de montagem e desmontagem serão as usuais de ponte modulares, ou seja a montagem é realizada no local com o mínimo de equipamento pesado, limitado uso de ferramentas e realizado por operários não especializados.

A instalação desta ponte em específico será realizada por lançamento com recurso a uma estrutura auxiliar, nomeadamente um nariz de lançamento.



Figura 4.10 - Pré-montagem da ponte MB36 e do nariz de lançamento.

Muito resumidamente, o processo consiste na montagem da estrutura numa das margens, e posteriormente é deslocada em consola até à margem oposta recorrendo a apoios intermédios do tipo roletes (boggies). Como referido, no lançamento utiliza-se um “nariz de lançamento” e ainda, com a função de equilíbrio da ponte na fase de consola, são colocados contrapesos na extremidade da ponte na margem de lançamento. Por facilidade, os contrapesos a utilizar serão os pavimentos a instalar na ponte.

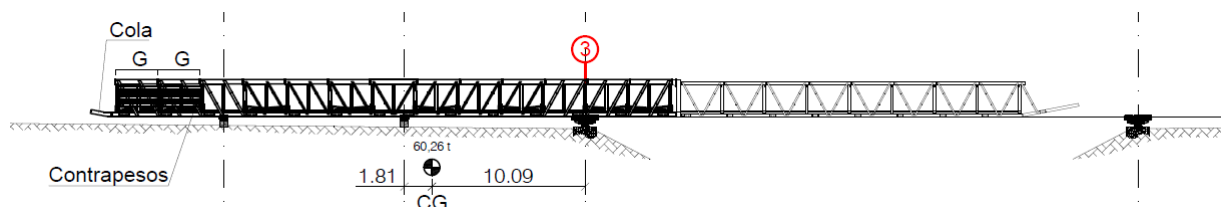


Figura 4.11 - Lançamento com recurso a estrutura auxiliar denominada de nariz de lançamento da ponte MB36.

O estudo do lançamento é englobado na fase de projeto, porém, dado âmbito desta dissertação excluiu-se a sua apresentação e o seu estudo detalhado.

### 4.3. CRITÉRIOS DE PROJETO

Neste ponto apresentam-se os critérios relativos à análise e dimensionamento estrutural, nomeadamente as ações e critérios de verificação de segurança utilizados no projeto da ponte MB36.

#### 4.3.1. AÇÕES E COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Como referido anteriormente, as ações e combinações de ações consideradas foram as preconizadas na norma americana – AASTHO LRFD Bridge Design Specifications, 8th Edition (2017), American Association of State Highway and Transportation Officials.

Esta norma define as seguintes ações a ter em consideração no dimensionamento das estruturas:

- Ações permanentes:
  - Peso próprio (DW);
  - Restantes cargas permanentes (DC).
- Ações variáveis:
  - Sobrecarga rodoviária (LL);
  - Frenagem (BR)
  - Vento na estrutura (WL) e nos veículos (WS);

##### 4.3.1.1. Ações permanentes

Peso próprio dos elementos metálicos estruturais ( $\gamma = 77 \text{ kN/m}^3$ ).

As restantes cargas permanentes (DC) nesta ponte correspondem à camada de acabamento dos módulos de pavimento, sendo que esta carga foi considerada no peso próprio do pavimento.

Considerou-se no modelo global da ponte MB36 o valor do pavimento através de uma carga distribuída aplicada na travessa.

##### 4.3.1.2. Ações variáveis

- Sobrecarga rodoviária (LL)

A ação das sobrecargas rodoviárias designada como HL-93 é caracterizada por 2 modelos de carga diferentes:

- Camião + carga distribuída (*Design truck + design lane load*)
- Cargas concentradas tandem (*Design tandem*)

Os valores das cargas por eixos assim como o espaçamento entre eixos do modelo **Camião** estão descritos na figura. A carga total é de 320,2 kN.

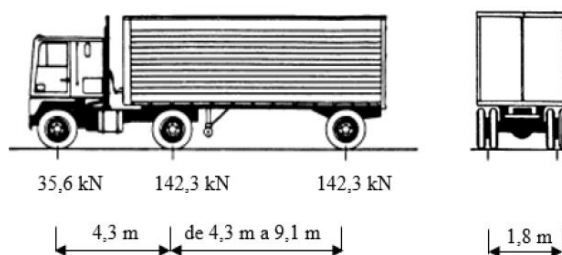


Figura 4.12 - Esquema da carga móvel.

A carga **Tandem** consiste em 4 cargas de 55 kN aplicadas em dois eixos afastados longitudinalmente de 1,2 m., e transversalmente é de 1,8 m. A carga total é de 220 kN.

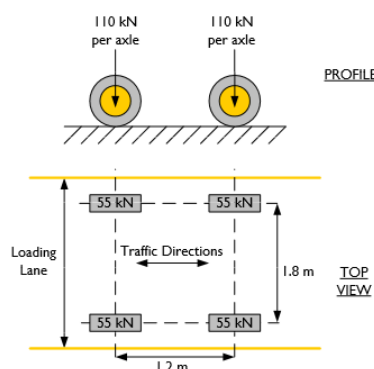


Figura 4.13 - Representação da carga "Tandem".

A *Lane Load* consiste numa **carga uniformemente distribuída** na direção longitudinal de 9,34 kN/m, em que transversalmente é distribuída numa largura de 3 m.

Para a aplicação dos modelos de carga, o primeiro conceito é a divisão da faixa de rodagem em Vias de Cálculo (*Design Lanes*). O número de vias de cálculo resulta do número inteiro da divisão da faixa de rodagem de 4,20 m (*w*) por 12ft (3,65 m), ou seja nesta ponte resulta 1 via de cálculo.

Associado a esta 1 via de cálculo resulta o **fator de presença múltipla**, *m*, de 1,20. Este fator é aplicado diretamente na majoração da sobrecarga rodoviária, com exceção da carga uniformemente distribuída.

Table 3.6.1.1.2-1—Multiple Presence Factors, *m*

| Number of Loaded Lanes | Multiple Presence Factors, <i>m</i> |
|------------------------|-------------------------------------|
| 1                      | 1.20                                |
| 2                      | 1.00                                |
| 3                      | 0.85                                |
| >3                     | 0.65                                |

Figura 4.14 - AASTHO Ponto 3.6.1.1.2 – Multiple Presence of Live Load.

Outro fator definido na norma americana é a majoração das sobrecargas Camião e Tandem para atender ao fenómeno de **amplificação dinâmica** aquando a passagem de veículos na ponte. Este fator de Amplificação Dinâmica (IM) para verificações de estado limite último toma o valor de 33%.

Table 3.6.2.1-1—Dynamic Load Allowance, *IM*

| Component                          | IM  |
|------------------------------------|-----|
| Deck Joints—All Limit States       | 75% |
| All Other Components:              |     |
| • Fatigue and Fracture Limit State | 15% |
| • All Other Limit States           | 33% |

Figura 4.15 - AASTHO Ponto 3.6.2 – Dynamic Load Allowance: IM

Transversalmente, de acordo com o prescrito na AASTHO, o veículo pode tomar qualquer posição até 0,60m da extremidade do pavimento. Teve-se em consideração esta excentricidade transversal na avaliação da posição que introduz mais esforços na treliça principal da ponte.

- Frenagem (BR)

A força longitudinal de travagem considerada é o máximo entre os dois seguintes valores:

- 25% da carga vertical de camião (truck) ou tandem;
- 5% da carga vertical do camião (truck) ou tandem + 5% da carga vertical uniformemente distribuída (lane load).

A ação de frenagem é aplicada conjuntamente com a carga vertical associada e ao nível do pavimento.

A esta ação é aplicado o fator de presença múltipla, *m*, porém não se aplica o fator de amplificação dinâmico, *IM*.

- Vento na Estrutura (WS)

O vento é aplicado à estrutura de acordo com a área exposta dos elementos que constituem a ponte.

Vento aplicável à fase de utilização da ponte, **sem veículos (WS<sub>1</sub>)**, com uma velocidade equivalente de 215km/h (134mph). Aplica-se na combinação Strength III.

Vento aplicável à fase de utilização da ponte, **com veículos (WS<sub>2</sub>)**, com velocidade de 130 km/h (80mph) na combinação Strength V e 112.5km/h (70mph) para a combinação Service I.

- Vento nos Veículos (WL)

Vento aplicado aos veículos em circulação aplicado transversalmente a 1,8 m acima do nível do pavimento.

- Friction (FR)

Considera-se uma força horizontal correspondente a  $0.5 \times (DC+DW)$ . Para forças superiores a este valor ocorrerá deslizamento de um dos apoios.

#### 4.3.1.3. Combinações de Ações

As combinações consideradas correspondem às mais relevantes indicadas na AASTHO LRFD 2017 para a ponte modular em causa, usando os fatores de majoração previsto na referida norma americana.

No ponto 3.4.1. – Load Factors and Load Combinations da AASTHO é apresentada uma tabela que resume as combinações e correspondentes fatores para as diferentes ações.

Em que os respetivos fatores para as ações permanentes são os seguintes:

Table 3.4.1-2—Load Factors for Permanent Loads,  $\gamma_p$ 

| Type of Load, Foundation Type, and Method Used to Calculate Downdrag                            |                                                 | Load Factor |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------|---------|
|                                                                                                 |                                                 | Maximum     | Minimum |
| DC: Component and Attachments                                                                   |                                                 | 1.25        | 0.90    |
| DC: Strength IV only                                                                            |                                                 | 1.50        | 0.90    |
| DD: Downdrag                                                                                    | Piles, $\alpha$ Tomlinson Method                | 1.40        | 0.25    |
|                                                                                                 | Piles, $\lambda$ Method                         | 1.05        | 0.30    |
|                                                                                                 | Drilled shafts, O'Neill and Reese (2010) Method | 1.25        | 0.35    |
| DW: Wearing Surfaces and Utilities                                                              |                                                 | 1.50        | 0.65    |
| EH: Horizontal Earth Pressure                                                                   |                                                 |             |         |
| • Active                                                                                        |                                                 | 1.50        | 0.90    |
| • At-Rest                                                                                       |                                                 | 1.35        | 0.90    |
| • AEP for anchored walls                                                                        |                                                 | 1.35        | N/A     |
| EL: Locked-in Construction Stresses                                                             |                                                 | 1.00        | 1.00    |
| EV: Vertical Earth Pressure                                                                     |                                                 |             |         |
| • Overall Stability                                                                             |                                                 | 1.00        | N/A     |
| • Retaining Walls and Abutments                                                                 |                                                 | 1.35        | 1.00    |
| • Rigid Buried Structure                                                                        |                                                 | 1.30        | 0.90    |
| • Rigid Frames                                                                                  |                                                 | 1.35        | 0.90    |
| • Flexible Buried Structures                                                                    |                                                 |             |         |
| o Metal Box Culverts, Structural Plate Culverts with Deep Corrugations, and Fiberglass Culverts |                                                 | 1.50        | 0.90    |
| o Thermoplastic Culverts                                                                        |                                                 | 1.30        | 0.90    |
| o All others                                                                                    |                                                 | 1.95        | 0.90    |
| ES: Earth Surcharge                                                                             |                                                 | 1.50        | 0.75    |

Figura 4.16 - Fatores de carga para cargas permanentes.

Tendo em consideração as siglas definidas para cada ação, as combinações consideradas para Estado Limite Último foram as seguintes:

- Strength - Combinação básica relativa à utilização da ponte, sem vento  
 $1,25 \text{ ou } 0,90 (DC+DW) + 1,75 (LL+IM+BR) + 1,00 FR$
- Strength III - Combinação referente à utilização da ponte com vento máximo e sem veículos  
 $1,25 \text{ ou } 0,90 (DC+DW) + 1,00 WS_1 + 1,00 FR$
- Strength V - Combinação relativa à utilização usual da ponte com veículos e vento de velocidade até 130km/h (80mph)  
 $1,25 \text{ ou } 0,90 (DC+DW) + 1,35 (LL+IM+BR) + 1,00 (WS_2 + WL + FR)$

#### 4.3.2. VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA

A análise dos elementos e ligações metálicas foi efetuada de acordo com as Normas Europeias – Eurocódigo 3 parte 1, considerando as ações e combinações referidas no subcapítulo anterior.

A verificação regulamentar europeia para elementos comprimidos foi abordada no capítulo anterior, pelo que dispensa a sua apresentação neste ponto.

Tendo em consideração o âmbito da dissertação – dimensionamento de elementos comprimidos contraventados com elementos de madeira – importa referir que apenas será analisada as secções críticas dos elementos à compressão para a combinação de estado limite último mais condicionante, que se revelou ser a Strength I (STR I) – ver subcapítulo 4.5- *Elementos condicionados pela encurvadura*.

#### 4.4. MODELAÇÃO ESTRUTURAL

A modelação da estrutura é muito importante para a caracterização e comportamento real. As características tais como, comportamento dos materiais, imperfeições e carregamentos devem ser incluídas corretamente no modelo.

A ponte foi modelada no programa *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*, versão 2019. O modelo global tridimensional é constituído por elementos de barra – Cordas, Diagonais, Montantes e Travessas, cujas características mecânicas e propriedades geométricas foram definidas de acordo com as dimensões dos elementos estruturais.

Importa referir que na modelação teve-se em conta as excentricidades resultantes das ligações entre elementos estruturais.

As figuras abaixo ilustram o modelo em vista 3D, alçado e corte transversal da ponte que se refere como modelo inicial, ou seja o modelo que serviu de base para o estudo de soluções alternativas.

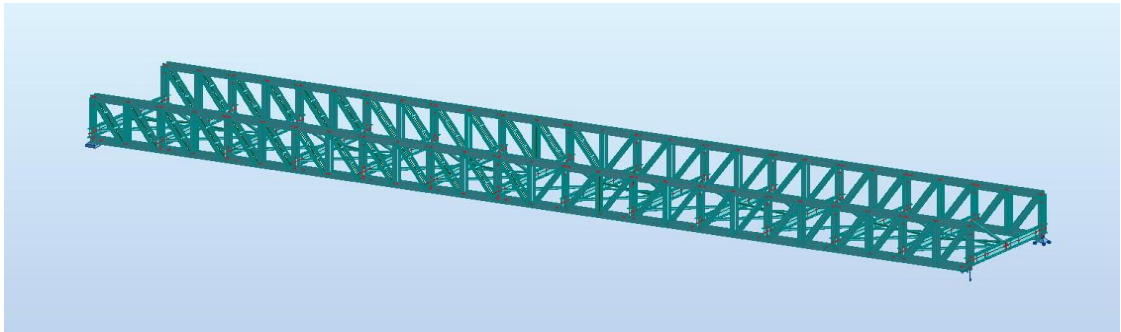


Figura 4.17 - Vista 3D do modelo inicial.

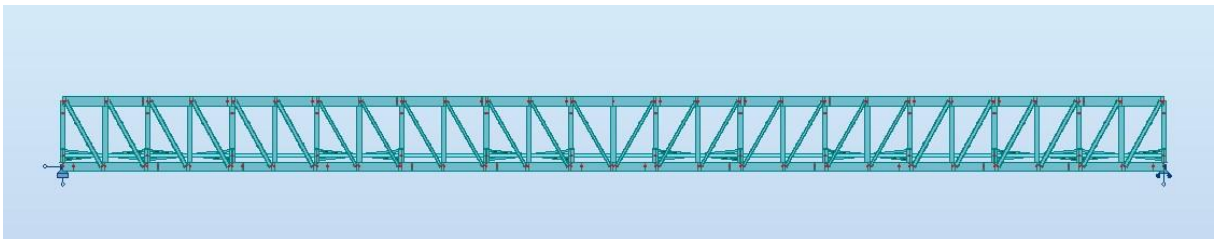


Figura 4.18 - Alçado do modelo inicial.

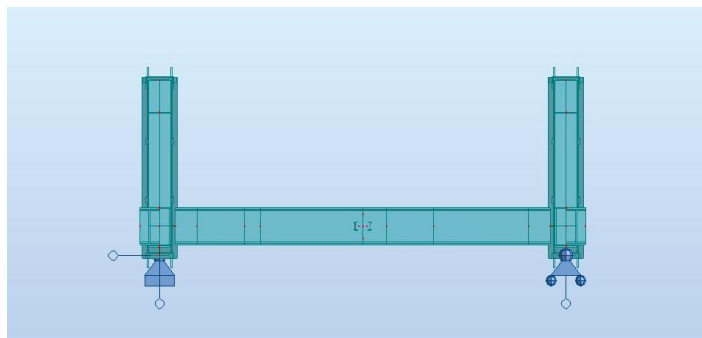


Figura 4.19 - Secção transversal do modelo inicial.

A modelação que é apresentada nas figuras anteriores, teve em conta as cláusulas 5.1.1 – Modelação estrutural e hipóteses fundamentais e 5.1.2 – Modelação das ligações do Eurocódigo 3 Parte 1-1.

O modelo estrutural reflete, com precisão adequada, o comportamento da estrutura, o tipo de comportamento previsto para as secções transversais, os elementos, as ligações e os apoios.

Segundo a cláusula 5.1.2 do EC.3 os efeitos do comportamento das ligações na distribuição dos esforços que atuam numa estrutura e nas deformações globais, podem em geral ser desprezados, contudo devem ser tidos em conta quando forem significativos.

De modo a avaliar a necessidade de consideração do comportamento das ligações na análise, o Eurocódigo 3 1-1 faz a seguinte distinção entre três modelos:

- “articulado, no qual se poderá admitir que a ligação não transmite momentos fletores;”
- “contínuo, no qual se poderá admitir que o comportamento da ligação não influencia a análise;”
- “semi-contínuo, no qual o comportamento da ligação tem que ser considerado na análise.”

Atendendo ao tipo de ligação, ligação das diagonais soldada a um gousset, apenas se libertou a rotação em torno de z-z, ou seja o gousset não confere rigidez fora do seu plano. Em todas as outras direções a ligação rígida.

Apresenta-se uma imagem das ligações das diagonais:

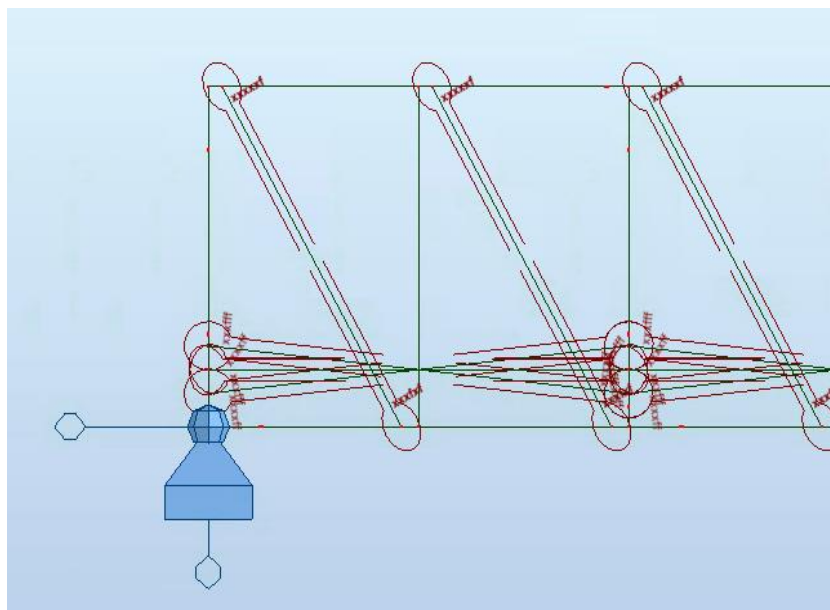


Figura 4.20 - Tipo de ligação usado nos elementos diagonais da estrutura.

O modelo estrutural reflete o vão de 36,4 metros apoiado em aparelhos de apoio. Os aparelhos de apoio entre a ponte e o encontro foram simulados através das seguintes condições de apoio:

- Uma extremidade com apoios deslizantes/móveis na direção longitudinal;
- A outra extremidade com apoios fixos.

#### 4.5. ELEMENTOS CONDICIONADOS PELA ENCURVADURA

No Capítulo 2 deste documento é dada a devida atenção ao tipo de treliça **Pratt**. Tendo sido mostrado a sua terminologia, o seu modo de funcionamento, e suas características.

Perceber de forma clara o seu funcionamento, é essencial, de forma a obter uma solução eficaz estrutural e economicamente. Relembrando a terminologia mencionada no subcapítulo 2.2.2 (Figura 2.2), é de seguida analisado o comportamento da treliça *Pratt* que compõe o modelo, fazendo se acompanhar de imagens ilustrativas dos elementos relacionados. (Figura 4.20 e Figura 4.21)

Na Figura 4.20 - são apresentados os elementos internos da treliça, onde os montantes (elementos verticais) estão sob esforços de compressão, (elementos que se fazem acompanhar de um diagrama de cor azul, sendo este o diagrama de esforços axiais do respetivo elemento). As diagonais (elemento, com diagrama de cor amarela) trabalham sob esforços de tração.

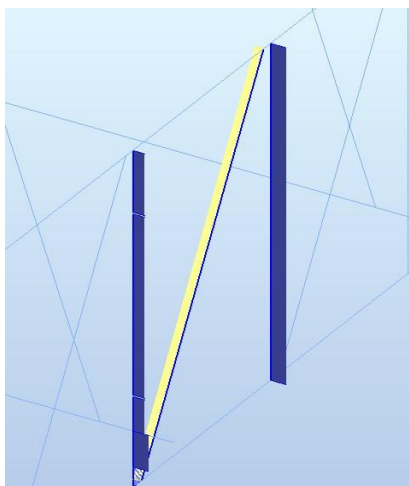


Figura 4.21 - Forças internas nos montantes e diagonais do modelo inicial.

Na Figura 4.21 - estão representados os elementos que constituem a corda superior (cor azul), estes elementos encontram-se sob esforços de compressão. Tal como era de esperar, após leitura do Capítulo 2.

Os elementos que constituem a corda inferior (cor amarela) estão submetidos a esforços de tração.

Os elementos da corda superior são quem dão sentido e importância a este trabalho e sobre os quais se focam as atenções no seguimento deste documento.

Os elementos mencionados encontram-se submetidos a esforços de compressão, no entanto, nestas condições e devido às propriedades físicas e mecânicas do aço, estes elementos instabilizam antes de esgotarem toda a capacidade do aço ( $f_{yd}$ ). De forma a solucionar este problema, seguem-se nos próximos subcapítulos, as soluções analisadas no presente caso de estudo.

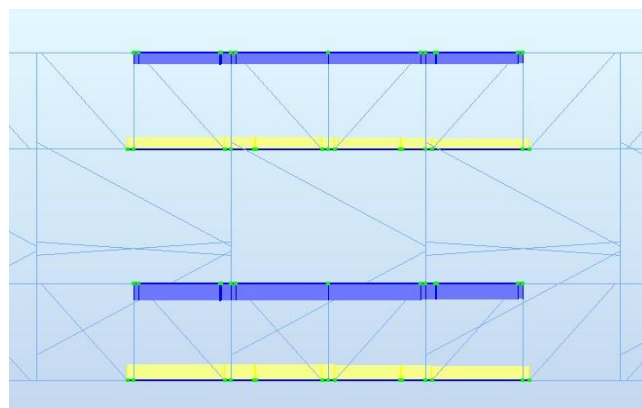


Figura 4.22 - Forças internas nas cordas, superior e inferior, do modelo inicial.

Apresenta-se na figura seguinte o 1.º modo de encurvadura global com um  $\alpha_{cr}$  correspondente de 6,65 onde é possível observar o comportamento da estrutura perante o carregamento submetido por uma carga móvel a meio vão da ponte.

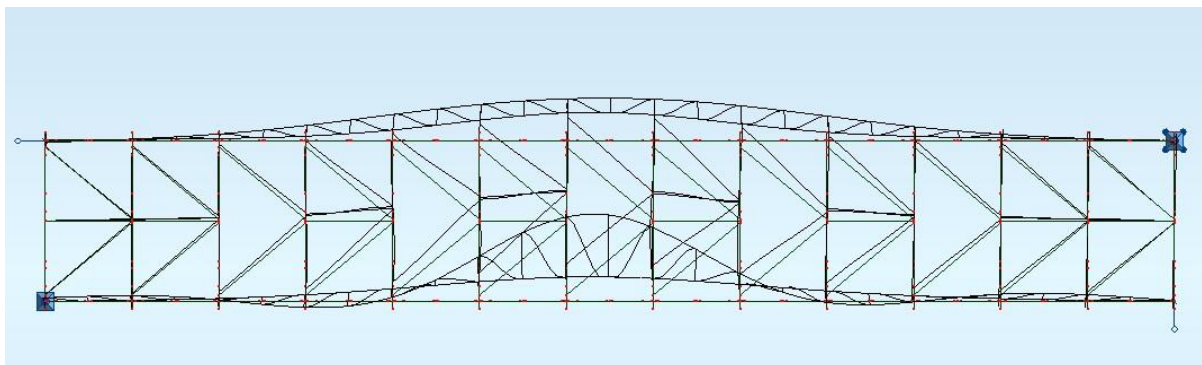


Figura 4.23 - 1.º Modo de encurvadura global do modelo V0.0 ( $\alpha_{cr} = 6,65$ ).

# 5

## ANÁLISE DE SOLUÇÕES ALTERNATIVAS

### 5.1. APRESENTAÇÃO DE SOLUÇÕES ALTERNATIVAS

No presente subcapítulo são apresentadas quatro soluções alternativas à concepção estrutural base da ponte MB36, com vista a avaliar uma solução estruturalmente viável utilizando contraventamentos em madeira. As soluções estudadas respeitam as seguintes premissas:

- Manter a altura de 2 m da treliça;
- Manter o comprimento da ponte de 36,4 m e módulos de 2,80 m;
- Perfis das cordas com o eixo de maior inércia na vertical (em oposição à solução do MB36);

Em cada uma das alternativas, a seu tempo, são indicadas as suas particularidades e o raciocínio que acompanha a sua conceção.

Para referência, as designações das soluções estudadas são as seguintes:

- V0.1 – modelo com as cordas rodadas (maior inércia na vertical);
- V1.0 – modelo com a corda superior contraventada em estrutura de madeira e com o prolongamento da travessa metálica;
- V1.1 – modelo com a corda superior contraventada em estrutura de madeira e com o prolongamento da travessa em madeira;
- V2.0 – modelo com a corda superiormente contraventada com diagonais em madeira ao nível da corda superior.

#### 5.1.1. V0.1 – MODELO COM CORDAS RODADAS

Tendo em consideração que há Cadernos de Encargo que limitam a orientação do perfil que constituem as cordas, o ponto de partida foi rodar as cordas superior e inferior e dimensionar a corda superior sem que fosse necessário recorrer a elementos de contraventamento, obtendo-se assim a solução abaixo apresentada (Figura 5.1). Esta solução designa-se como V0.1.

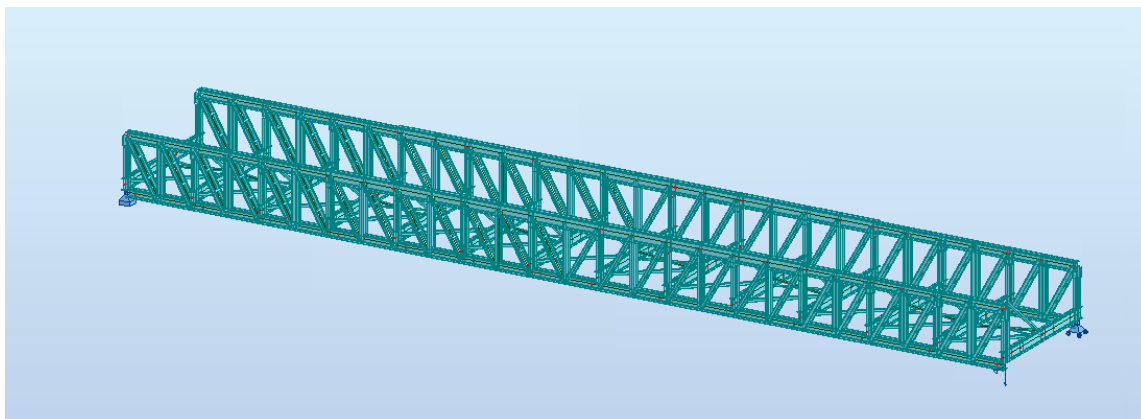


Figura 5.1 - Imagem 3D do modelo V0.1.

Na imagem apresentada é possível verificar que o modelo é em tudo semelhante com o modelo apresentado inicialmente, com as seguintes alterações:

- Perfis rodados nas cordas, inferior e superior;
- Perfil da corda superior a meio vão HEB320 → HEB450;
- Perfil da corda superior das extremidades HEA320 → HEA360;

Apresenta-se imagem da vista em secção do respetivo modelo:

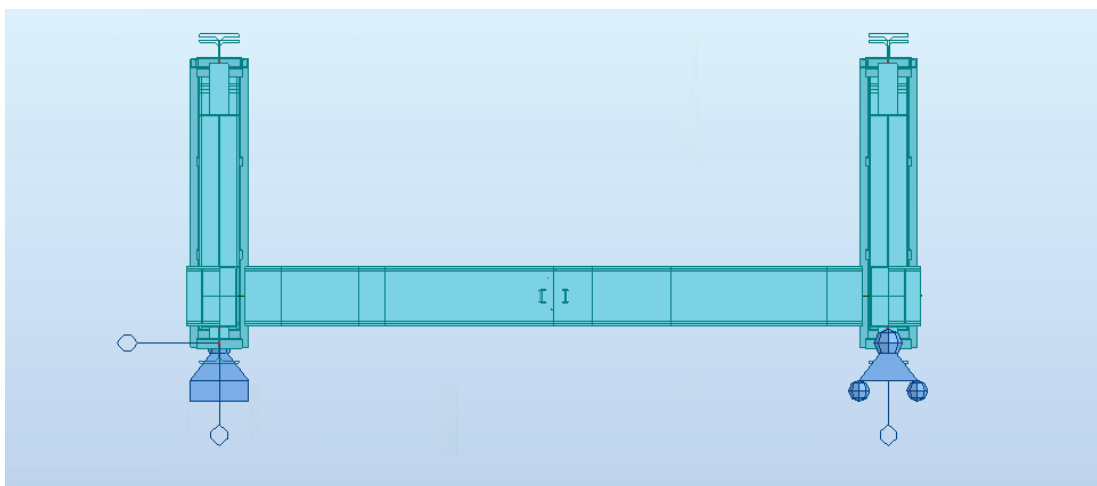


Figura 5.2 – Secção transversal do modelo V0.1.

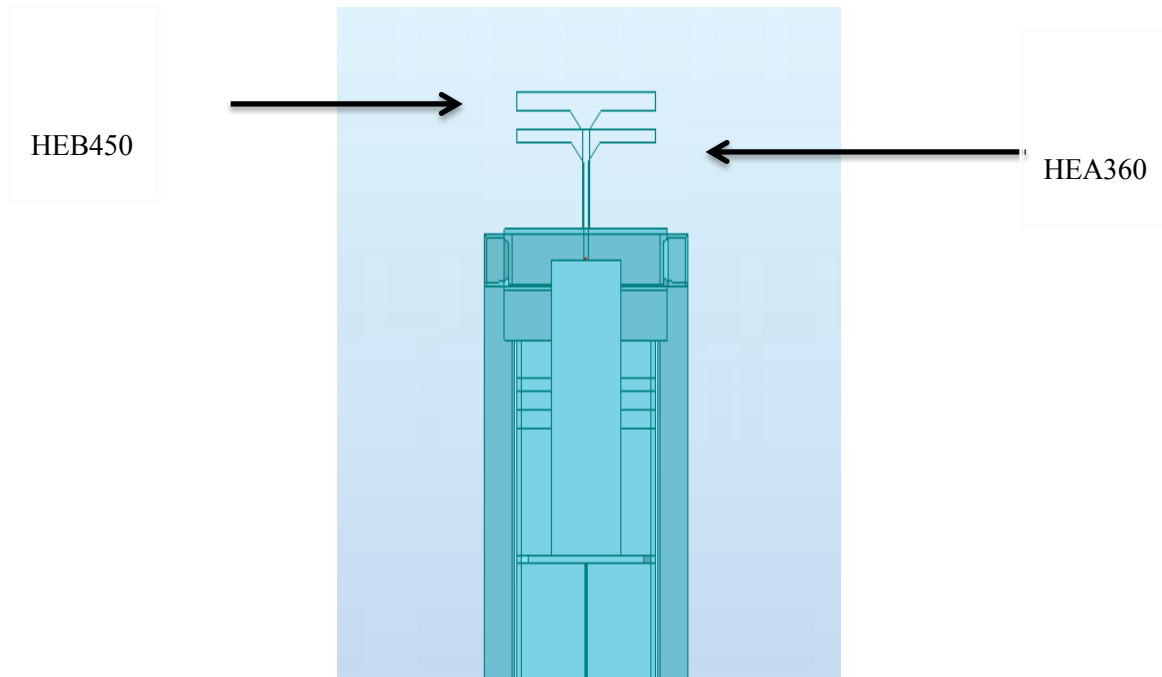


Figura 5.3 - Vista em pormenor dos perfis rodados e respetiva identificação. Modelo V0.1.

O facto de a corda ter sido rodada, leva a que o eixo exposto à instabilidade por encurvadura seja o eixo mais “fraco” do perfil. Isto obriga a que a secção tenha um aumento considerável para resistir ao fenómeno mencionado.

O aumento de secção origina uma particularidade na corda superior. No Capítulo 2, é descrito que uma treliça funciona tal como uma viga, possuindo esforços de compressão na corda superior e esforços de tração na corda inferior. No entanto, neste caso, além do sistema estrutural funcionar desta forma, também a corda superior, só por si, funciona de forma independente, as fibras superiores funcionam à compressão e as fibras inferiores funcionam à tração. É possível confirmar este acontecimento através do momento instalado na direção y-y, que deveria ser inexistente. (Figura 5.4)

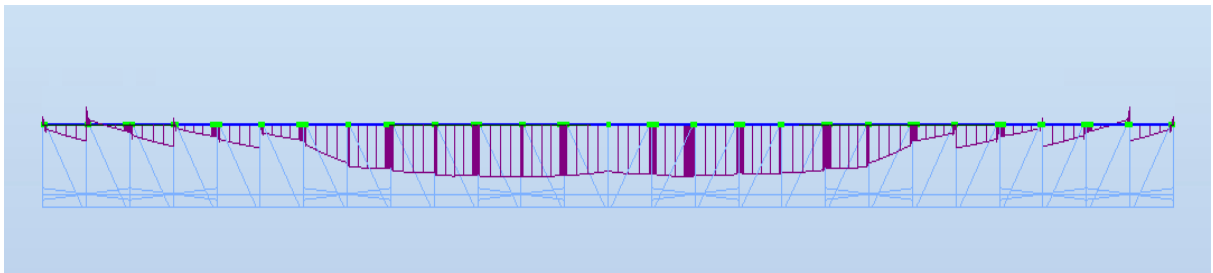


Figura 5.4 - Momento instalado na corda superior do modelo V0.1.

De forma a visualizar os efeitos desta solução estrutural apresenta-se de seguida a figura relativa ao 1.º modo de encurvadura global com um valor de  $\alpha_{cr} = 4,19$  quando esta é submetida a uma carga móvel localizada a meio vão da ponte. (Figura 5.5)

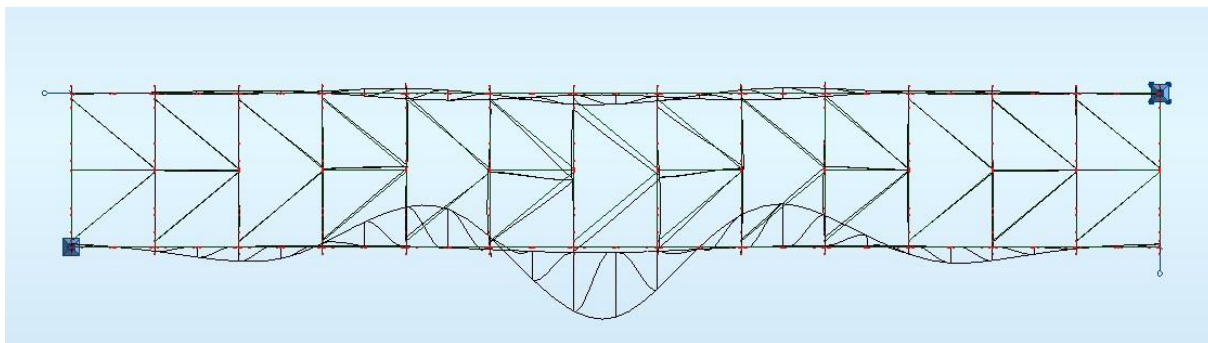


Figura 5.5 - 1.º Modo de encurvadura global do modelo V0.1 ( $\alpha_{cr} = 4,19$ ).

#### 5.1.2. V1.0 – MODELO CONTRAVENTADO (PROLONGAMENTO DA TRAVESSA METÁLICA)

A solução anterior, sendo muito robusta, leva à necessidade de procurar alternativas, mais esbeltas, mais leves e que funcionem com eficácia, em termos estruturais. Assim surge a solução apresentada neste subcapítulo.

A solução V1.0 é uma solução na qual é prolongada a travessa metálica que está posicionada de 2,8m em 2,8m ao longo do desenvolvimento da estrutura, e ligar estes prolongamentos à corda superior, através de elementos de madeira. (Figura 5.6)

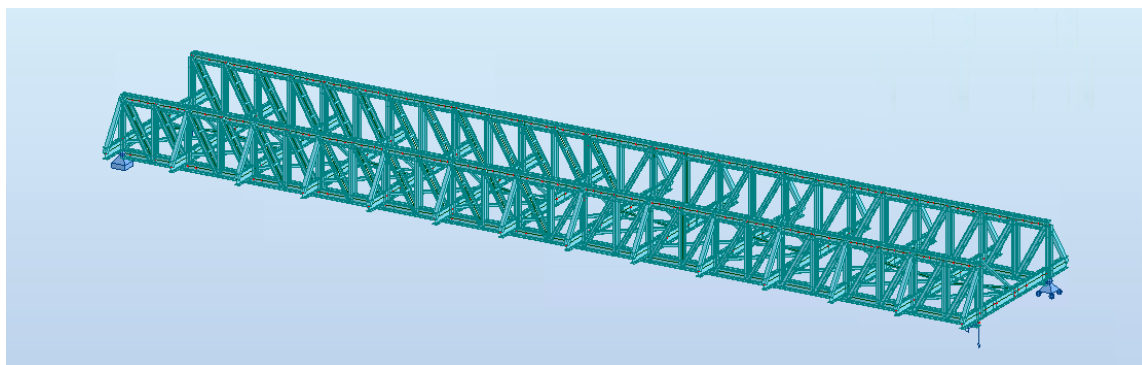


Figura 5.6 - Vista 3D do modelo V1.0.

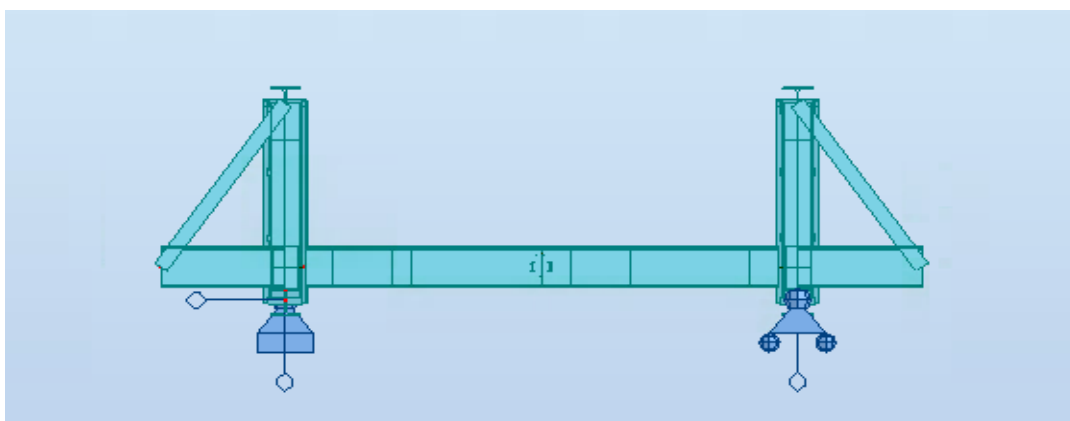


Figura 5.7 – Secção transversal do modelo V1.0.

A procura de soluções alternativas à robustez do modelo V0.1 origina, numa fase inicial uma solução simples de desenho e construção, adicionando um elemento diagonal em madeira ligado, articuladamente, ao prolongamento das travessas. O facto de as ligações serem articuladas origina uma solução eficaz perante o objetivo, que é reduzir a secção do perfil a usar e o peso total da estrutura. Isto comparativamente ao modelo sem contraventamentos. Este tipo de ligação reduz a rigidez que seria imposta na madeira, caso a ligação fosse fixa, obrigando os elementos de madeira a trabalhar em conjunto com a estrutura principal. Sendo articulados, os elementos funcionam apenas de suporte aos esforços axiais como pretendido e duma forma independente, ou seja, sendo apenas um elemento auxiliar de contraventamento, suportando apenas as forças de instabilidade impostas pela corda superior. (Figura 5.7 e Figura 5.8)

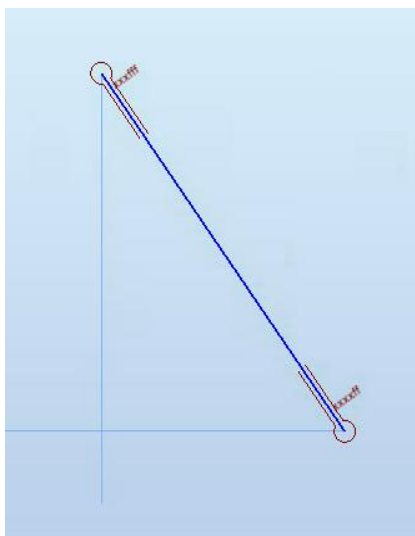


Figura 5.8 - Tipo de ligação, articulada, no elemento de madeira do modelo V1.0.

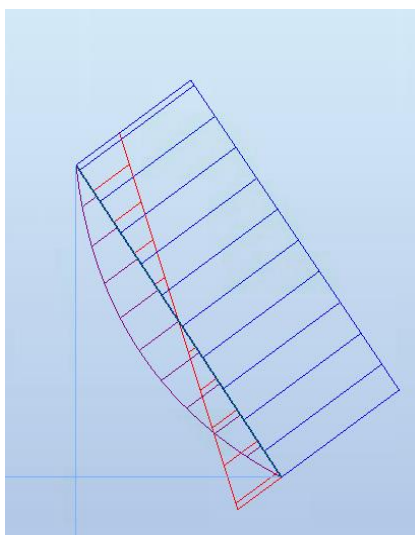


Figura 5.9 - Esforços impostos ao elemento de madeira. Modelo V1.0.

Durante a validação do modelo apresentado, verifica-se que o perfil usado na corda inferior ultrapassa o limite imposto pelas Normas Europeias. Esta instabilidade deve-se ao facto do prolongamento da travessa funcionar em consola quando recebe as forças transmitidas pela diagonal da madeira. A

interação entre a travessa e a corda inferior leva a que esta fique a funcionar em flexão desviada e deixe de verificar a segurança. (ver Figura 5.10)

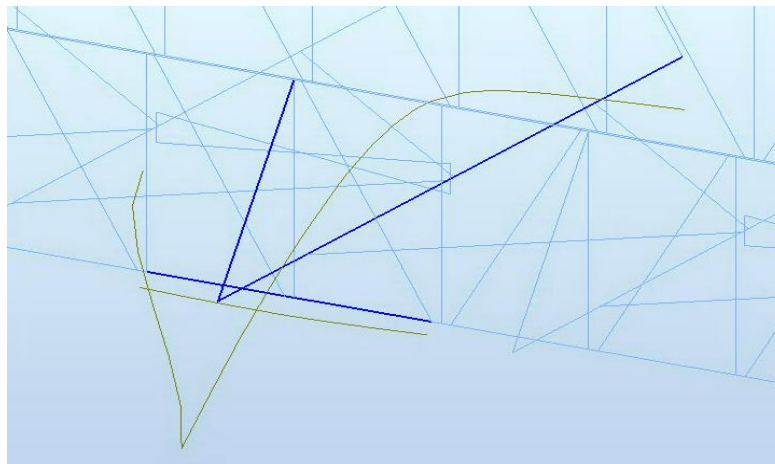


Figura 5.10 - Esquema do comportamento da travessa no modelo V1.0.

Para que a corda inferior verifique a segurança, ocorre a necessidade de aumentar a secção do perfil da corda inferior. Assim o modelo aqui apresentado sofre as seguintes alterações em relação ao modelo V0.1:

- Prolongamento da travessa mantendo o respetivo material;
- Diagonal em madeira ligada, articuladamente à corda superior e à travessa;
- Aumento da secção do perfil da corda inferior HEA320→HEA340;
- Diminuição da secção do perfil da corda superior HEB450→HEB340;
- Os elementos de madeira têm uma secção 15×15cm em madeira maciça de classe C35.

Na Figura 5.11 é possível observar o efeito da presença dos contraventamentos em madeira, onde estes apresentam uma contribuição positiva na diminuição do comprimento de encurvadura global da corda superior.

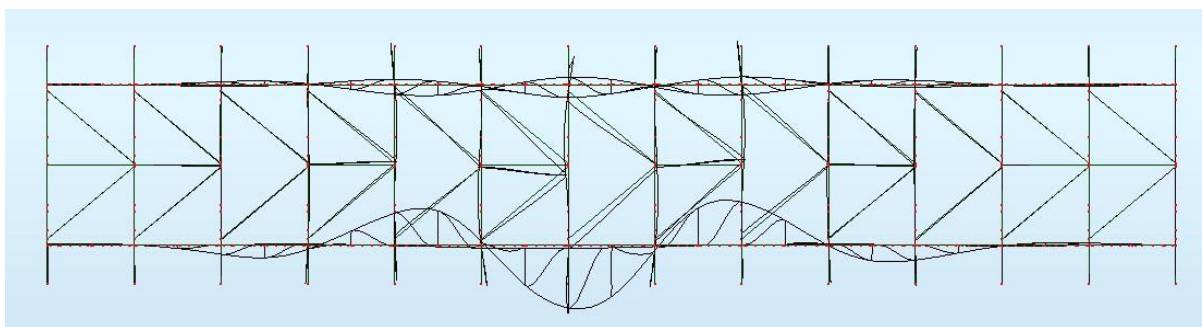


Figura 5.11 - 1.º Modo de encurvadura global do modelo V1.0 ( $\alpha_{cr} = 4,65$ ).

### 5.1.3. V1.1 – MODELO CONTRAVENTADO (MADEIRA)

A solução apresentada neste subcapítulo surge durante a análise do modelo anterior. Uma vez que na solução anterior os contraventamentos foram feitos, exatamente, no posicionamento dos montantes que coincidem com a posição das travessas, ou seja, nos pontos mais rígidos da estrutura. Estes pontos estão espaçados de 2,8m em 2,8m, é então com o objetivo de diminuir este comprimento, isto é, o comprimento de encurvadura local que é apresentado:

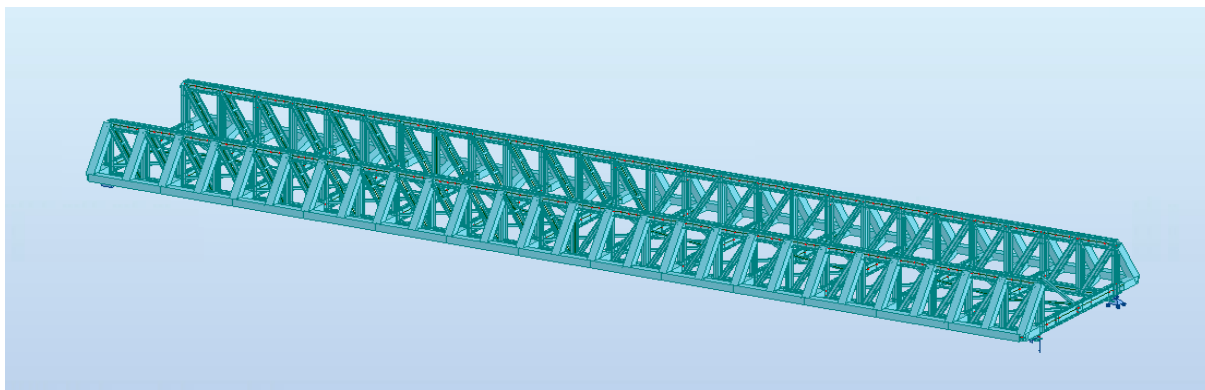


Figura 5.12 - Imagem 3D do modelo V1.1.

Este modelo é apresentado com as seguintes modificações, em relação ao modelo V0.1:

- Uma corda em madeira num plano paralelo à corda inferior;
- Diagonais em madeira posicionadas a cada 1,4 metros de desenvolvimento que ligam a corda de madeira à corda superior;
- Diagonais em madeira que ligam a corda inferior à corda de madeira espaçados de 2,8 metros em posição coincidente com os montantes não coincidentes com as travessas;
- Prolongamento das travessas, com elemento de madeira;
- Diminuição da secção do perfil da corda superior HEB450→HEB360;
- Todos os elementos de madeira possuem uma secção 30×30cm em madeira maciça de classe C35.

Apresenta-se a imagem em pormenor do sistema usado no modelo V1.1:

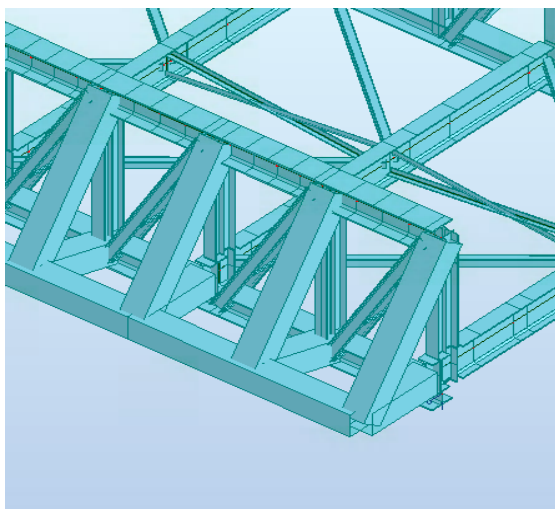


Figura 5.13 - Subestrutura, em madeira, usada no modelo V1.1.

De forma a manter o sistema articulado, tal como era inicialmente, e atendendo ao que é pretendido obter da madeira, adotaram-se as seguintes ligações:

- Ligações com rotação livre nas 3 direções, na conexão aço-madeira para que a madeira funcione, à compressão, e não lhe sejam transmitidos esforços, além dos esforços impostos pela instabilidade da corda superior.
- Ligações fixas, na conexão aço madeira, de forma a evitar que funcione como um mecanismo e também para dar a rigidez necessária à subestrutura de madeira.

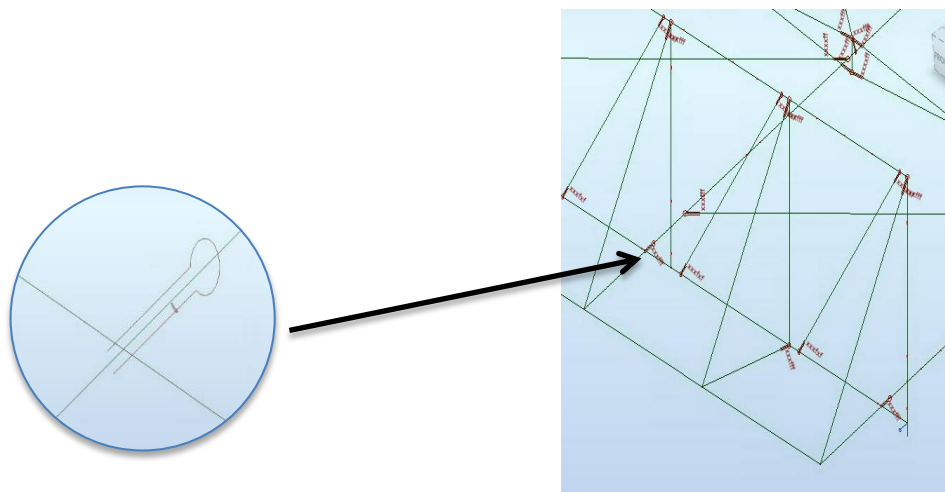


Figura 5.14 - Tipo de ligação usado e respetivo detalhe da ligação aço-madeira, com rotação livre.

Apesar da ligação aço-madeira acima indicada, verifica-se que, uma percentagem dos esforços que deviam ser absorvidos pela corda da estrutura principal é transmitida à corda em madeira devido à rigidez que o conjunto em madeira possui, não só pelas ligações madeira-madeira, mas também pelas características de resistência da madeira. Verifica-se este facto através da existência de momento fletor na corda em madeira. (Ver Figura 5.15)

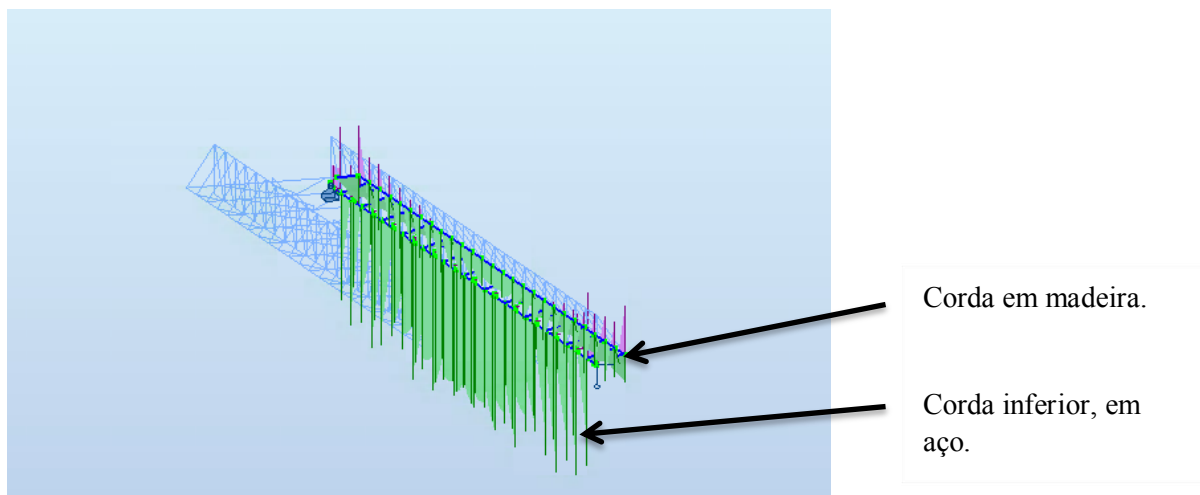


Figura 5.15 - Momento fletor nas cordas inferior, em aço, e na corda de madeira do modelo V1.1.

Apesar das ligações apresentadas, a ligação da madeira nas diagonais que se posicionam entre montantes não possui a rigidez suficiente para que o comprimento de encurvadura local seja reduzido em  $2,8/2$ , ou até mesmo, ter uma redução suficientemente favorável de modo a obter a melhoria pretendida. Os resultados serão apresentados no capítulo seguinte do presente documento.

Na Figura 5.16 são visíveis os efeitos dos elementos em madeira na solução aqui apresentada referente ao Modelo V1.1.

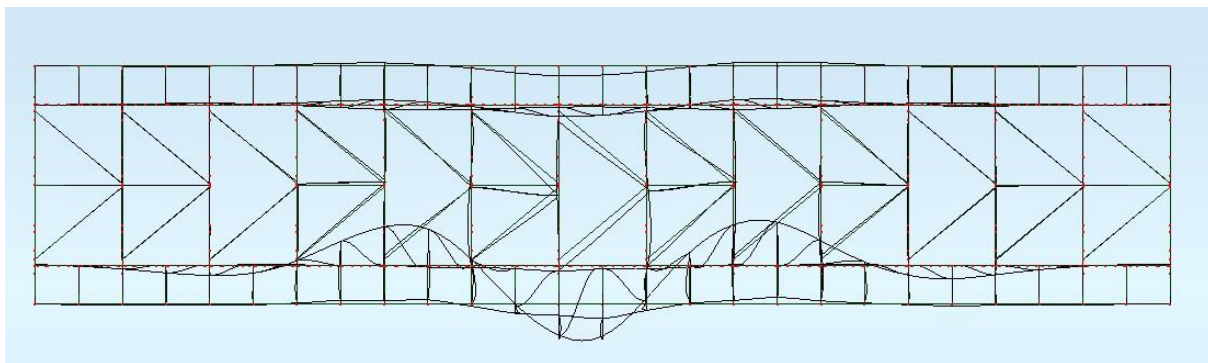


Figura 5.16 - 1.º Modo de encurvadura global do modelo V1.1 ( $\alpha_{cr} = 4,51$ ).

#### 5.1.4. V2.0 – MODELO CONTRAVENTADO (DIAGONAIS À CORDA SUPERIOR)

De acordo com o que foi referido anteriormente, é estudada uma nova alternativa, na tentativa de aproximar o comprimento de encurvadura local a 1,4 metros.

No modelo V2.0 é decidido, de certa forma, inverter o sistema anteriormente apresentado. A principal distinção é que não é usado qualquer elemento em madeira paralelo à corda metálica, não permitindo desta forma que a madeira receba esforços além dos que são impostos pela deformação da corda metálica.

Apresenta-se a imagem 3D do modelo V2.0:

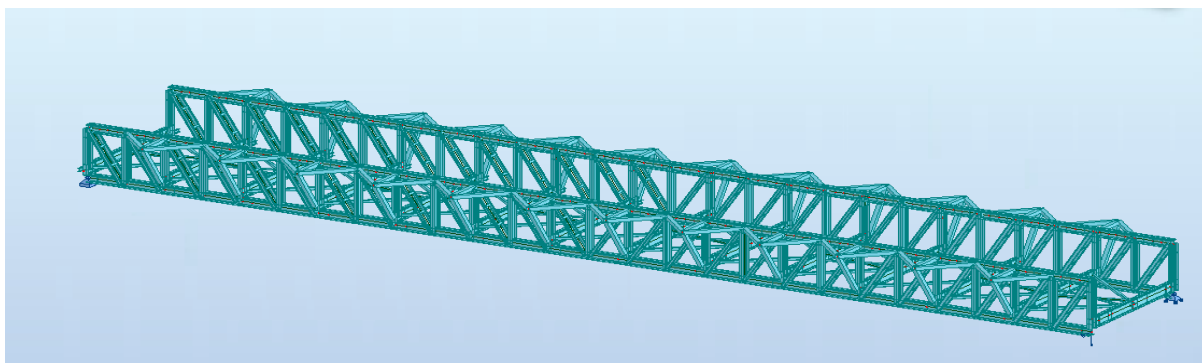


Figura 5.17 - Imagem 3D do modelo V2.0.

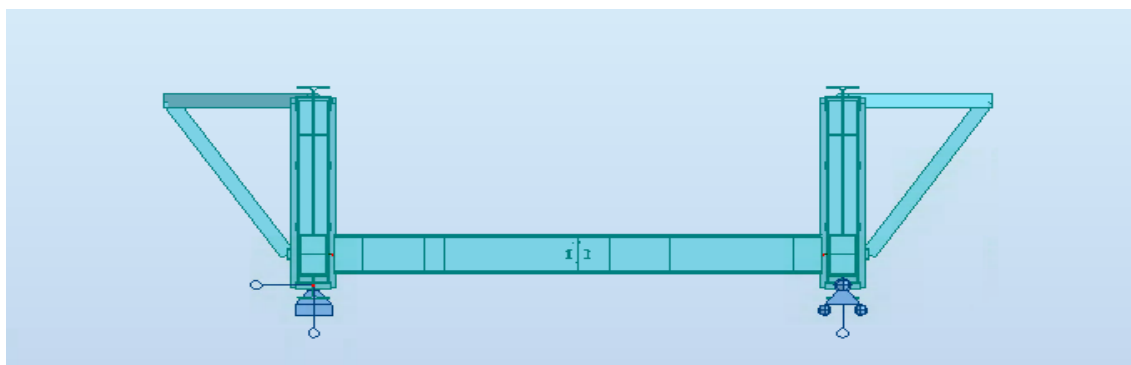


Figura 5.18 – Secção transversal do modelo V2.0.

O modelo apresentado neste subcapítulo, em comparação ao modelo V0.1, contém as seguintes modificações:

- Elemento em madeira, perpendicular à corda superior, ligado à corda superior na posição dos montantes coincidentes com a posição das travessas;
- Elemento em madeira diagonal e perpendicular à corda superior, ligado na posição dos montantes não coincidentes com as travessas;
- Elemento diagonal em madeira, com ligação superior no ponto de interseção dos elementos acima mencionados e ligação inferior nas travessas;
- Redução da secção do perfil metálico usado na corda superior, HEB450→HEB340;
- Todos os elementos em madeira possuem uma secção de 15×15cm em madeira maciça de classe C35.

Apresenta-se a imagem em pormenor do sistema usado no modelo V2.0:

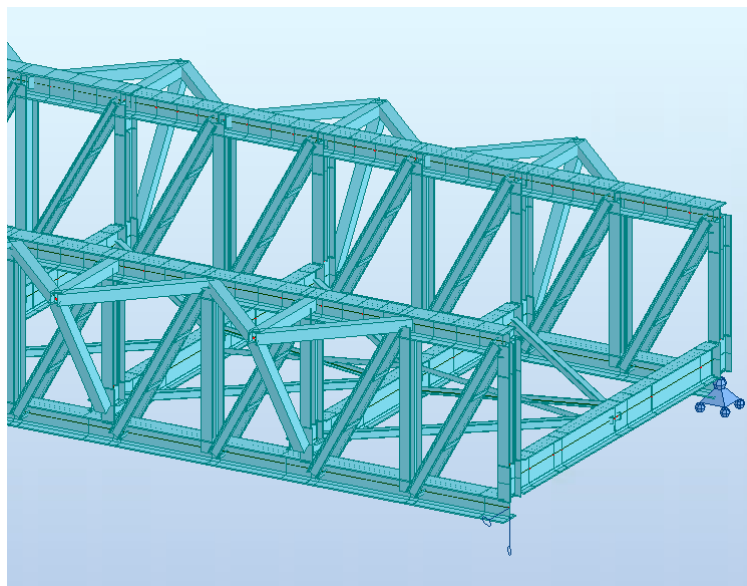


Figura 5.19 - Pormenor do sistema, em madeira, usado.

De forma a manter o sistema articulado e oferecer a rigidez necessária à subestrutura de madeira foram usados os seguintes tipos de ligação:

- Ligação com rotação livre na conexão aço-madeira, permitindo que o sistema continue articulado e que apenas sejam transmitidos esforços com origem nas deformações da corda superior, impondo desta forma apenas esforços axiais aos elementos de madeira.
- Ligação fixa, em todas as direções, no ponto de interseção dos elementos de madeira, oferecendo desta forma a rigidez necessária para o seu funcionamento, e impedir que origine um mecanismo no seu funcionamento.

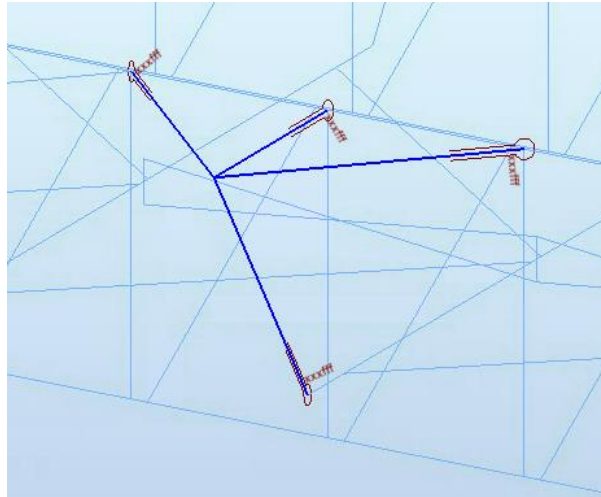


Figura 5.20 - Tipo de ligações usadas no modelo V2.0.

De forma a observar os efeitos desta solução apresenta-se na Figura 5.21 o 1.º modo de encurvadura global do modelo apresentado quando carregado a meio vão da estrutura.

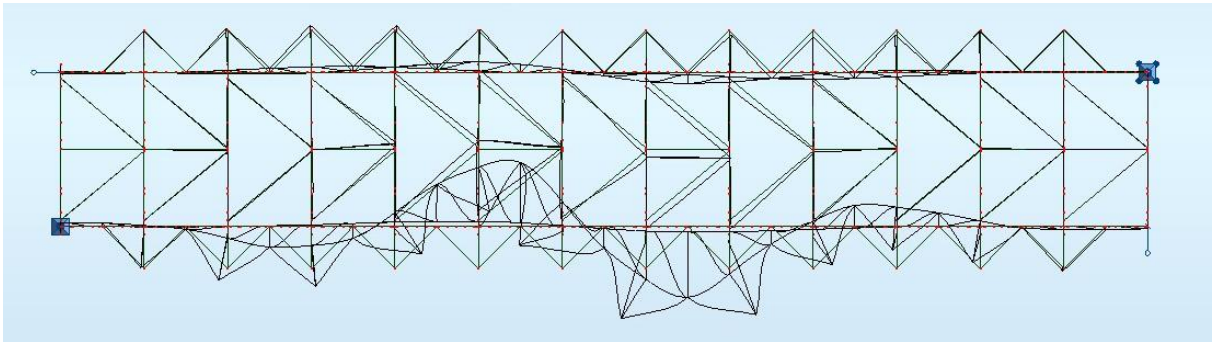


Figura 5.21 - 1.º Modo de encurvadura global do modelo V2.0 ( $\alpha_{cr} = 4,80$ ).

## 5.2. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DA CORDA SUPERIOR

Após a identificação do elemento condicionado pela encurvadura a estudar - a corda superior - segue-se então o processo de cálculo a ser executado, tendo como o objetivo o dimensionamento deste elemento. Neste capítulo apresenta-se a metodologia de cálculo do dimensionamento da corda superior.

### 5.2.1. ANÁLISES GLOBAIS ELÁSTICAS

O dimensionamento da corda superior é realizado com recurso ao programa de cálculo *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*. Foram realizadas quatro análises progressivas, onde é avaliado o incremento de esforços obtidos até à análise dita final – análise não linear de 2ª ordem com encurvadura global da corda, respetivamente:

1. Análise de 1ª ordem;
2. Análise de 1ª ordem com “*buckling*” – nesta análise linear é acrescido o cálculo com a estrutura pré-deformada tendo em consideração a imperfeição geométrica global (ver 5.2.2.1).

3. Análise não linear de 2ª ordem considerando o acréscimo de esforços através de uma análise não linear geométrica.
4. Análise não linear de 2ª ordem com “*buckling*” – nesta análise não linear é acrescido o cálculo com a estrutura pré-deformada tendo em consideração a imperfeição geométrica global (ver 5.2.2.1).

Adicionalmente realizou-se uma quinta análise, nomeadamente:

5. Análise de 2ª ordem com base numa análise de forças equivalentes.

A análise apresentada no ponto 5 foi calculada, exclusivamente, para o caso de carga que representa o veículo no centro da ponte (L. Case 223). Todas as restantes foram realizadas para 8 casos de carga, considerados mais críticos, porque representam o veículo nas zonas mais próximas do meio vão. Todas as análises foram realizadas tendo em conta os dois primeiros modos de encurvadura, devido ao valor muito próximo que apresentavam.

Apresentam-se de seguida as análises:

- **Análise de 1ª ordem (Anexo B.4)**

Em anexo está presente a imagem da caixa de diálogo, do programa de cálculo, usada para realizar esta e as restantes análises aqui apresentadas. No entanto, como já foi mencionado anteriormente, a análise de 1ª ordem é uma análise linear, deste modo não é definido nenhum parâmetro de não linearidade geométrica.

- **Análise de 1ª ordem com “*buckling*”**

Na presente análise é considerada a deformação da estrutura de acordo com o modo de encurvadura considerado. Com efeito, com recurso à caixa de diálogo apresentada no Anexo B.5 é gerado um modelo estrutural que inclui deformações induzidas por um modo de encurvadura selecionado. Estas deformações não causam forças ou tensões iniciais na estrutura, quando consideradas, apenas resulta na alteração da sua geometria.

As deformações são escalonadas com a definição de um valor no campo “Maximum displacement”. Os valores a definir neste campo estão presentes no Quadro 5.8 apresentado no subcapítulo 5.2.2.1 do presente documento

- **Análise de 2ª ordem não linear (Anexo B.6)**

A presente análise consiste na aplicação incremental de cargas. Durante o cálculo as forças são gradualmente aumentadas e são executadas soluções para estados de equilíbrio sucessivos.

A não linearidade geométrica é provocada por uma relação de força-deformação não linear na estrutura. As opções de esta não linearidade geométrica, do programa de cálculo, aqui apresentadas, levam em conta os efeitos reais e normalmente melhoram a convergência do processo de cálculo que inclui elementos não lineares.

A análise “P-Delta”, aqui apresentada, considera os efeitos de segunda ordem, tais como a alteração da rigidez do elemento sob a influência do estado de tensão no elemento. Tem em consideração, também, a geração de momentos resultantes da ação de forças impostas na direção perpendicular aos deslocamentos horizontais dos nós.

- **Análise de 2ª ordem não linear, com “*buckling*”**

Esta análise é feita com recurso às funcionalidades do programa de cálculo, apresentadas anteriormente, usadas em conjunto. Deste modo é tido em consideração a não linearidade geométrica

numa estrutura pré-deformada de acordo com o modo de encurvadura considerado de modo a atender a imperfeição geométrica global.

Concluindo, o efeito das imperfeições e a amplificação resultante da análise de 2ª ordem não linear com “buckling” tem que ser tal que não comprometa a verificação de resistência da corda superior.

As análises acima mencionadas são repetidas para todos os casos de carga considerados e para cada modo de encurvadura. Para cada análise realizada é necessário fazer a verificação à encurvadura local dos elementos (cláusula 6.3 do EC3-1-1). Esta análise é realizada com recurso ao programa *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*, presente no Anexo B.7.

Após o cálculo da análise global pretendida, usando a funcionalidade apresentada no Anexo B.7, é selecionado o caso de carga corresponde a essa análise, e os elementos para os quais se pretende obter os resultados da análise local.

Após efetuar o cálculo é obtido uma tabela com os resultados de todos os elementos selecionados, onde é possível selecionar individualmente e verificar os resultados detalhados dessa análise. (Anexo B.8)

Desta forma serão obtidos os resultados detalhados da análise de encurvadura local, e todos os coeficientes e verificações associadas a essa análise, de acordo com a cláusula 6.3 do EC3-1-1. (Anexo B.9)

Adicionalmente, realizou-se a seguinte análise:

- **Análise estática equivalente**

O EC3-1-1 define que uma análise estrutural deve contemplar o efeito das imperfeições, sejam elas geométricas ou materiais. Estas imperfeições podem ser definidas através das imperfeições geométricas equivalentes, que traduzem o efeito da totalidade das imperfeições.

É realizada uma análise global baseada no conceito de “imperfeição geométrica equivalente” de acordo com a cláusula 5.3 do Eurocódigo 3-1-1, tendo em conta as imperfeições dos sistemas de contraventamento, designada como análise estática e equivalente.

A metodologia de cálculo é a que se passa a apresentar.

Para esta análise é usada uma tabela Excel como auxílio ao cálculo das forças equivalentes a impor na estrutura.

Quadro 5.1 - Exemplo da folha de cálculo das forças equivalentes.

| Modelo | $e_0(m)$      | $\alpha_{cr}$ | F. Ampl.      |
|--------|---------------|---------------|---------------|
| ...    | ...           | ...           | ...           |
| x(m)   | $N_{Ed}$ (kN) | $\delta_q(m)$ | $F_{EQ}$ (kN) |
| 0,0    |               |               |               |
| 1,4    |               |               |               |
| 2,8    |               |               |               |
| ...    |               |               |               |
| 36,4   |               |               |               |

Onde:

- $N_{Ed}$  corresponde às forças axiais na corda superior de 1,4m em 1,4m;
- $\delta_q$  corresponde aos deslocamentos horizontais dos nós de 1,4m em 1,4m;
- $e_0$  é a amplitude máxima da imperfeição geométrica global da corda superior de acordo com o Quadro 3.1 apresentado anteriormente. Considerou-se o comprimento total da ponte ( $L=36,4\text{m}$ ) como sujeita à imperfeição desta forma são obtidos os seguintes valores:

Quadro 5.2 - Valores da amplitude máxima do deslocamento inicial da corda superior  $e_0$ .

| Modelo | L/  | $e_0(\text{m})$ |
|--------|-----|-----------------|
| V0.0   | 250 | 0,146           |
| V0.1   | 250 | 0,146           |
| V1.0   | 200 | 0,182           |
| V1.1   | 200 | 0,182           |
| V2.0   | 200 | 0,182           |

- $F.Ampl.$  corresponde ao factor de amplificação que se traduz através de  $1/(1 - 1/\alpha_{cr})$ , tomando os seguintes valores para os diferentes modelos:

Quadro 5.3 - Valores do fator de amplificação a tomar para os diferentes modelos.

| Modelo | $\alpha_{cr}$<br>(1.º modo) | $1/(1 - 1/\alpha_{cr})$ |
|--------|-----------------------------|-------------------------|
| V0.0   | 6,65                        | 1,18                    |
| V0.1   | 4,19                        | 1,31                    |
| V1.0   | 4,65                        | 1,27                    |
| V1.1   | 4,51                        | 1,29                    |
| V2.0   | 4,80                        | 1,26                    |

- $F.Eq.$  é o resultado da força equivalente a aplicar de 1,4m em 1,4m nos nós da corda superior. Estes resultados são apresentados no capítulo seguinte.

Após o cálculo das forças equivalentes, define-se um caso de carga onde, através do qual, são aplicadas na estrutura de forma a serem consideradas no dimensionamento. Este caso de carga apresenta se esquematicamente da seguinte forma:

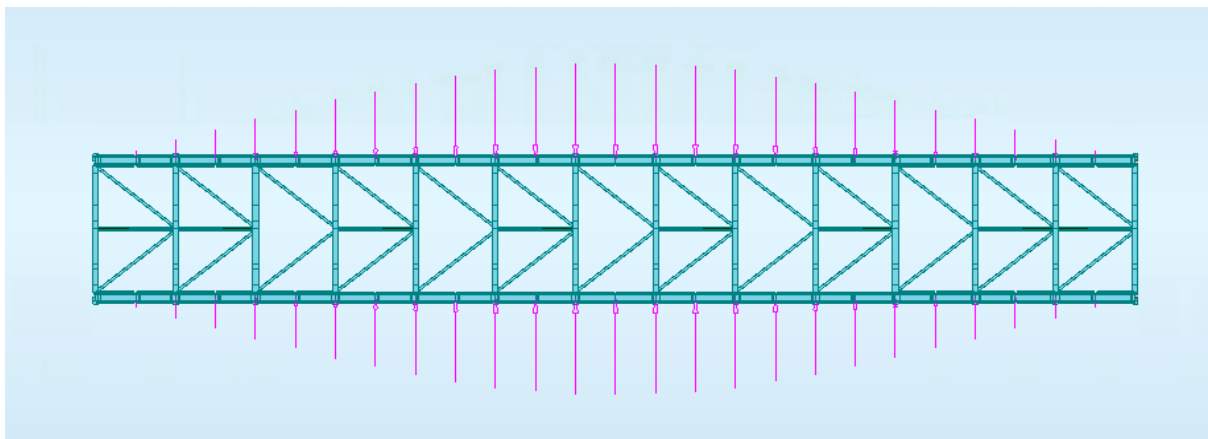


Figura 5.22 - Representação das forças equivalentes aplicadas nos nós da corda superior de 1,4m em 1,4m no programa de cálculo.

Por fim, é feita a combinação do caso de carga das forças equivalentes com o caso de carga das forças que representam a carga móvel, para que o conceito de “imperfeição geométrica equivalente” esteja validado. Nesta combinação, e uma vez que a ponte apresenta um parâmetro  $\alpha_{cr}$  inferior a 10, é necessário que as forças equivalentes sejam afetadas através do fator de amplificação  $1/(1 - 1/\alpha_{cr})$  de modo a incluir os efeitos de segunda ordem globais (efeitos P- $\Delta$ ). A forma de atribuir este fator, é aplicá-lo como fator de carga no caso em que estão contidas as forças equivalentes calculadas anteriormente.

Os resultados das análises apresentadas neste subcapítulo são devidamente apresentados e discutidos no capítulo 6.

### 5.2.2.CÁLCULO DAS IMPERFEIÇÕES

Para dar seguimento às análises supramencionadas é necessário o cálculo das imperfeições globais e do elemento a impor no programa, de forma a definir as condições fronteira do processo de cálculo.

Ao longo do corrente capítulo é apresentado o processo de cálculo e os respectivos resultados destes parâmetros, tendo por base o Eurocódigo 3-1-1.

Apresenta-se abaixo o Quadro com as características das respetivas secções da corda superior dos diversos modelos:

Quadro 5.4 - Características geométricas dos perfis usados na corda superior nos diferentes modelos.

| Modelo | Perfil | h (mm) | b (mm) | $t_w$ (mm) | $t_f$ (mm) | A (cm <sup>2</sup> ) | h/b  |
|--------|--------|--------|--------|------------|------------|----------------------|------|
| V0.0   | HEB320 | 320    | 300    | 11,5       | 20,5       | 161,30               | 1,07 |
| V0.1   | HEB450 | 450    | 300    | 14,0       | 26,0       | 218,00               | 1,50 |
| V1.0   | HEB340 | 340    | 300    | 12,0       | 21,5       | 170,90               | 1,13 |
| V1.1   | HEB360 | 360    | 300    | 12,5       | 22,5       | 180,60               | 1,20 |
| V2.0   | HEB340 | 340    | 300    | 12,0       | 21,5       | 170,90               | 1,13 |

## 5.2.2.1. Imperfeição geométrica global da estrutura

O dimensionamento da corda superior é feito de acordo com o procedimento do Eurocódigo 3-1-1, e com o auxílio do software *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*.

O procedimento que leva ao dimensionamento dos elementos da corda superior começa pelo cálculo do fator  $\alpha_{cr}$ . Este fator é obtido através de uma análise de estabilidade global, tal como tinha sido mencionado anteriormente.

No robot, usando o tipo de análise “*Buckling Analysis*”, é calculado o fator correspondente aos diferentes modos de encurvadura. (Anexo B.1 e B.2)

Apresenta-se os casos de carga críticos com os correspondentes fatores  $\alpha_{cr}$ :

Quadro 5.5 - Fator  $\alpha_{cr}$  correspondente aos casos de carga críticos.

| Modelo | Load Case | Buckling | $\alpha_{cr}$ |
|--------|-----------|----------|---------------|
| V0.0   | 226       | Mode 1   | 6,64          |
|        |           | Mode 2   | 6,75          |
| V0.1   | 227       | Mode 1   | 4,24          |
|        |           | Mode 2   | 4,31          |
| V1.0   | 226       | Mode 1   | 4,77          |
|        |           | Mode 2   | 4,81          |
| V1.1   | 227       | Mode 1   | 4,56          |
|        |           | Mode 2   | 4,62          |
| V2.0   | 221       | Mode 1   | 4,86          |
|        |           | Mode 2   | 4,90          |

Associados a estes modos de encurvadura, estão os respetivos comprimentos de encurvadura globais. (Quadro 5.6)

Quadro 5.6 - Comprimentos de encurvadura globais, dos diferentes modelos.

| Modelo | L. Case | Buckling | L (m) |
|--------|---------|----------|-------|
| V0.0   | 226     | Mode 1   | 14,00 |
|        |         | Mode 2   | 10,65 |
| V0.1   | 227     | Mode 1   | 6,66  |
|        |         | Mode 2   | 6,69  |
| V1.0   | 226     | Mode 1   | 5,62  |
|        |         | Mode 2   | 5,49  |
| V1.1   | 227     | Mode 1   | 6,34  |
|        |         | Mode 2   | 6,30  |

| Modelo | L. Case | Buckling | L (m) |
|--------|---------|----------|-------|
| V2.0   | 221     | Mode 1   | 7,43  |
|        |         | Mode 2   | 7,40  |

Sendo o material S355 e a partir da Quadro 3.1 e da Figura 5.19 entende-se que as imperfeições globais das diferentes soluções são as seguintes:

Quadro 5.7 - Curvas de encurvadura e fator de imperfeição de acordo com a respetiva direção.

| Modelo | Curva de encurvadura | Direção | $e_0/L$<br>(Análise Elástica) |
|--------|----------------------|---------|-------------------------------|
| V0.0   | b                    | y-y     | $I/250$                       |
| V0.1   | b                    | z-z     | $I/250$                       |
| V1.0   | c                    | z-z     | $I/200$                       |
| V1.1   | c                    | z-z     | $I/200$                       |
| V2.0   | c                    | z-z     | $I/200$                       |

Tendo por base os comprimentos de encurvadura (Quadro 5.6) e juntamente com a informação do Quadro 5.7, são calculados os deslocamentos horizontais máximos dos nós correspondentes a cada modo de encurvadura (Quadro 5.8).

Estes deslocamentos representam as imperfeições globais estruturais, que serão incluídas oportunamente no dimensionamento à encurvadura.

Quadro 5.8 - Deslocamento máximo horizontal

| Modelo | L. Case | Buckling | Max. Displ. (mm) |
|--------|---------|----------|------------------|
| V0.0   | 226     | Mode 1   | 56               |
|        |         | Mode 2   | 43               |
| V0.1   | 227     | Mode 1   | 27               |
|        |         | Mode 2   | 27               |
| V1.0   | 226     | Mode 1   | 28               |
|        |         | Mode 2   | 27               |
| V1.1   | 227     | Mode 1   | 32               |
|        |         | Mode 2   | 32               |
| V2.0   | 221     | Mode 1   | 37               |
|        |         | Mode 2   | 37               |

### 5.2.2.2. Imperfeição geométrica local do elemento

Para dar início à análise de encurvadura local com base nas curvas de encurvadura definidas na cláusula 6.3 do EC3-1-1, é necessário introduzir alguns parâmetros de entrada no programa de cálculo: (Ver Anexo B.10)

- Comprimento de encurvadura;
- A curva de encurvadura correspondente;
- Coeficiente de comprimento de encurvadura.

Estes parâmetros estão associados às imperfeições locais dos elementos a considerar. Estas imperfeições são traduzidas por uma imperfeição do tipo de encurvadura, definida por  $e_0/L$ , em que  $e_0$  corresponde à amplitude máxima do deslocamento inicial e  $L$  é o comprimento do elemento. O Quadro 5.1 do EC3-1-1 (apresentado como Quadro 3.1 deste documento) apresenta os valores de cálculo das amplitudes das imperfeições locais dos elementos, sendo a análise plástica ou elástica.

Desta forma, o fator de imperfeição (Quadro 3.2) é obtido em função do tipo de análise e da curva de encurvadura da secção transversal.

Sendo o material S355 e a partir da Figura 5.19 entende-se que as curvas de encurvadura para a respetiva direção para as diferentes soluções, apresentadas no subcapítulo 5.1, são as seguintes:

Quadro 5.9 - Curvas de encurvadura e fator de imperfeição.

| Modelo | Curva de encurvadura | Direção | Fator de imperfeição |
|--------|----------------------|---------|----------------------|
| V0.0   | b                    | y-y     | 0,34                 |
| V0.1   | b                    | z-z     | 0,34                 |
| V1.0   | c                    | z-z     | 0,49                 |
| V1.1   | c                    | z-z     | 0,49                 |
| V2.0   | c                    | z-z     | 0,49                 |

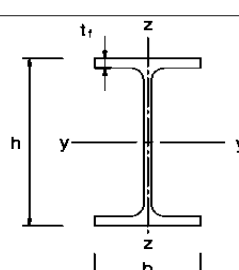
| Secção transversal |                                                                                     | Limites        |                                           | Encurva-<br>dura em<br>relação<br>ao eixo | Curva de<br>encurvadura          |                                  |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                    |                                                                                     |                |                                           |                                           | S 235<br>S 275<br>S 355<br>S 420 | S 460                            |
| Perfis laminados   |  | $h/b > 1,2$    | $t_f \leq 40 \text{ mm}$                  | y - y<br>z - z                            | a<br>b                           | a <sub>0</sub><br>a <sub>0</sub> |
|                    |                                                                                     |                | $40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$ | y - y<br>z - z                            | b<br>c                           | a<br>a                           |
|                    |                                                                                     | $h/b \leq 1,2$ | $t_f \leq 100 \text{ mm}$                 | y - y<br>z - z                            | b<br>c                           | a<br>a                           |
|                    |                                                                                     |                | $t_f > 100 \text{ mm}$                    | y - y<br>z - z                            | d<br>d                           | c<br>c                           |

Figura 5.23 - Escolha da curva de encurvadura em função da secção transversal para perfis laminados.

De forma a introduzir estes parâmetros no programa de cálculo, procede-se da seguinte forma:

- A curva de encurvadura, é deixado na opção auto, para que sejam atribuídas pelo programa de cálculo, já que este aplica as regras presentes da correspondente Norma Europeia.
- O coeficiente de comprimento de encurvadura foi introduzido manualmente e corresponde ao comprimento total entre nós travados na respetiva direção. Introduce-se manualmente o comprimento de encurvadura a considerar considerando-se sempre um coeficiente unitário.

O comprimento de encurvadura do elemento é um parâmetro, muito importante, a definir no programa *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*. De forma a obter o valor destes comprimentos é usada a seguinte folha de cálculo:

Quadro 5.10 - Cálculo dos comprimentos de encurvadura para os casos mais críticos de cada modelo.

| Comprimentos de encurvadura local da respetiva direção |           |      |               |               |               |                 |             |                |                        |
|--------------------------------------------------------|-----------|------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|----------------|------------------------|
| Modelo                                                 | Load case | Modo | $\alpha_{cr}$ | $N_{Ed}$ (kN) | $N_{cr}$ (kN) | $\bar{\lambda}$ | $\lambda_1$ | $L_{cr,z}$ (m) | $L_{cr,z}$ (m) Adotado |
| V0.0                                                   | 226       | 21   | 25,0          | 3649,13       | 91248,91      | 0,25            | 76,1        | <b>2,63(*)</b> | <b>2,80</b>            |
| V0.1                                                   | 226       | 30   | 22,2          | 2171,76       | 48224,93      | 0,40            | 76,1        | <b>2,23</b>    | <b>2,80</b>            |
| V1.0                                                   | 226       | 17   | 12,4          | 3656,01       | 45250,07      | 0,37            | 76,1        | <b>2,10</b>    | <b>2,60</b>            |
| V1.1                                                   | 226       | 27   | 23,3          | 2782,85       | 64774,38      | 0,31            | 76,1        | <b>1,79</b>    | <b>1,80</b>            |
| V2.0                                                   | 226       | 50   | 22,2          | 3639,54       | 80783,39      | 0,27            | 76,1        | <b>1,57</b>    | <b>1,57</b>            |

(\*) No modelo V0.0 o valor indicado corresponde ao  $L_{cr,y}$  devido ao perfil se apresentar com a maior inércia na horizontal.

Os correspondentes coeficientes de redução associado ao comprimento de encurvadura aferido para cada modelo são os seguintes:

Quadro 5.11 - Cálculo do coeficiente de redução.

| Modelo | $\bar{\lambda}$ | $\lambda_1$ | $L_{cr,z}$ (m) | Curva | $\alpha$ | $\phi$ | $\chi$      | $\chi_{adoptado}$ |
|--------|-----------------|-------------|----------------|-------|----------|--------|-------------|-------------------|
| V0.0   | 0,25            | 76,06       | <b>2,63</b>    | b     | 0,34     | 0,54   | <b>0,98</b> | <b>0,98</b>       |
| V0.1   | 0,40            | 76,06       | <b>2,23</b>    | b     | 0,34     | 0,61   | <b>0,93</b> | <b>0,88</b>       |
| V1.0   | 0,37            | 76,06       | <b>2,10</b>    | c     | 0,49     | 0,60   | <b>0,92</b> | <b>0,87</b>       |
| V1.1   | 0,31            | 76,06       | <b>1,79</b>    | c     | 0,49     | 0,57   | <b>0,95</b> | <b>0,95</b>       |
| V2.0   | 0,27            | 76,06       | <b>1,57</b>    | c     | 0,49     | 0,56   | <b>0,97</b> | <b>0,97</b>       |

Os comprimentos de encurvadura  $L_{cr}$  aferidos são inferiores aos adotados e correspondentemente os parâmetros de redução adotados  $\chi$  resultam em valores inferiores. Desta forma, os comprimentos de encurvadura adotados são do lado da segurança.

No Anexo C são apresentadas as imagens do ROBOT referentes aos valores do correspondente modo de encurvadura apresentados no Quadro 5.10.

Os modos indicados no Quadro 5.10 são os modos onde graficamente, através da deformada da estrutura, é visível o modo de encurvadura local dos elementos. Com o  $\alpha_{cr}$  correspondente ao caso de

carga e respetivo modo, e com o esforço imposto nesse elemento, é obtido o esforço axial crítico no elemento. Este cálculo é traduzido pela Equação (3.8)

De acordo com a cláusula 6.3.1.2 do EC3-1-1, tendo as características mecânicas dos materiais e o respetivo esforço crítico obtém-se as respetivas esbeltezas normalizadas (Equação (3.11), de seguida é possível calcular o comprimento crítico.

O comprimento de encurvadura obtido para as respetivas direções, apresentadas nos Quadros 5.10 e 5.11 é o comprimento real, tal como é mencionado na cláusula 6.3 do EC3-1-1.

Na direção contrária à indicada considerou-se o comprimento de encurvadura a distância entre montantes, ou seja de 1,4m.

### 5.3.METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS EM MADEIRA

Tal como os elementos da corda superior, acima apresentados, os elementos de madeira também são dimensionados para resistirem à instabilidade provocada pela encurvadura.

Nesta secção é descrito o processo de análise dos elementos de contraventamento em madeira usados nos diferentes modelos.

Da mesma forma, foram dimensionados com auxílio do programa, *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*, seguindo a metodologia apresentada no subcapítulo 3.3.3 que está de acordo com o Eurocódigo 5.

O dimensionamento, destes elementos, segue o mesmo processo apresentado para a corda superior, isto é, as análises globais são igualmente realizadas. Após cada análise é verificada a resistência de encurvadura local. No entanto, para a madeira, apenas foi realizada análise local durante a análise de 2ª ordem com “buckling”, uma vez que, é durante esta análise que são consideradas todas as imperfeições impostas na estrutura, e consecutivamente, é quando o esforço imposto sobre os elementos de madeira é maior. (Anexo B.10)

O material definido para a execução destes elementos de contraventamento foi madeira maciça com classe de resistência C35, por apresentar boas características de resistência à compressão.

Apresentam-se os valores característicos à classe de resistência C35:

Quadro 5.12 - Valores característicos dos elementos de madeira.

| Valores característicos: | Modelos |      |      |
|--------------------------|---------|------|------|
|                          | V1.0    | V1.1 | V2.0 |
| $f_{c,o,k}$              | 25      | 25   | 25   |
| $f_{m,o,k}$              | 35      | 35   | 35   |

Neste seguimento demonstram-se as características seccionais dos elementos usados nos diferentes modelos:

Apresenta-se as propriedades da secção:

Quadro 5.13 – Propriedades seccionais.

| Propriedades: | Modelos |          |         |
|---------------|---------|----------|---------|
|               | V1.0    | V1.1     | V2.0    |
| $A_x (cm^2)$  | 225     | 900      | 225     |
| $A_y (cm^2)$  | 150     | 600      | 150     |
| $A_z (cm^2)$  | 150     | 600      | 150     |
| $I_x (cm^4)$  | 6243,7  | 99900,00 | 6243,70 |
| $I_y (cm^4)$  | 4218,75 | 67500,00 | 4218,75 |
| $I_z (cm^4)$  | 4218,75 | 67500,00 | 4218,75 |
| $W_y (cm^3)$  | 562,50  | 4500,00  | 562,50  |
| $W_z (cm^3)$  | 562,50  | 4500,00  | 562,50  |
| $h (cm)$      | 15      | 30       | 15      |
| $b (cm)$      | 15      | 30       | 15      |

Para o cálculo ser efetuado no programa de cálculo automático é necessário introduzir alguns parâmetros iniciais.

É na caixa de diálogo apresentada no Anexo B.10, na zona assinalada a vermelho, onde são definidos os seguintes parâmetros:

- Comprimento de encurvadura;
- Coeficiente de comprimento de encurvadura;
- Classe de serviço da madeira.

O comprimento de encurvadura é definido de acordo com o comprimento de cada elemento usado em cada um dos diferentes modelos. Estes comprimentos são definidos como sendo os comprimentos reais de cada elemento.

Quanto ao coeficiente de comprimento de encurvadura, este seria variável de acordo com o que foi mencionado acerca das ligações aço-madeira e madeira-madeira. No entanto, devido à imprecisa rigidez dos nós resultante da dificuldade que existe em tornar uma ligação fixa madeira-madeira foi adotado o coeficiente 1, estando este pelo lado da segurança, uma vez que o comprimento máximo de encurvadura será o comprimento real do elemento.

Na parte inferior da caixa de diálogo apresentada, é definida a classe de serviço que depende da humidade do material e da humidade relativa do ar.

A classe de serviço foi definida como classe 3. Segundo o Eurocódigo 5, a Classe 3 corresponde a um ambiente exposto, e é nestes moldes que se enquadra o presente caso.

De forma a prosseguir com o cálculo, é necessário definir o tempo de duração da carga, na opção de configuração assinalada no Anexo B.12.

De acordo com o Eurocódigo 5, uma carga móvel é considerada uma carga de curta duração. No seguimento da definição do tempo de carga e da classe de serviço, é esperado que de uma forma automática o programa de cálculo atribua um  $k_{mod}=0,7$ . (Quadro 3.9)

Após a definição dos parâmetros, é seguido o cálculo da encurvadura local dos elementos. De forma semelhante ao exposto aquando da análise dos elementos metálicos, o programa de cálculo possui um recurso em tudo semelhante ao já apresentado para o aço (Anexo B.13), onde é possível seleccionar individualmente e verificar os resultados detalhados dessa análise. (Anexo B.14)

Desta forma serão obtidos os resultados detalhados da análise de encurvadura local, e todos os coeficientes e verificações associadas a essa análise, de acordo com o método descrito no capítulo 3, estando este baseado no Eurocódigo 5.

Os resultados das análises apresentadas neste subcapítulo serão devidamente apresentados e discutidos no capítulo 6.

# 6

## APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 6.1.INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos referentes ao estudo das diferentes soluções referidas no capítulo anterior. Os cálculos foram feitos com base no programa ROBOT, como é possível verificar durante a apresentação do dimensionamento, sendo que, no entanto, serão demonstrados fazendo-se acompanhar pelo cálculo aritmético presente na metodologia definida nas Normas Europeias.

Serão apresentados, com o detalhe anteriormente mencionado, os resultados referentes à análise não linear de 2ª ordem com “buckling” associados ao modo e caso de carga mais condicionante, fazendo-se acompanhar pelos devidos comentários e observações.

Volta-se a referir as soluções estudadas:

- V0.0 – modelo inicial (maior inércia na horizontal);
- V0.1 – modelo com as cordas rodadas (maior inércia na vertical);
- V1.0 – modelo com a corda superior contraventada em estrutura de madeira e com o prolongamento da travessa metálica;
- V1.1 – modelo com a corda superior contraventada em estrutura de madeira e com o prolongamento da travessa em madeira;
- V2.0 – modelo com a corda superiormente contraventada com diagonais em madeira ao nível da corda superior.

### 6.2.DIMENSIONAMENTO DA CORDA SUPERIOR

Neste subcapítulo são exibidas as verificações estruturais da corda superior para as soluções alternativas estudadas relativamente aos esforços resultantes da análise de 2ª ordem não linear com “buckling”.

#### 6.2.1.VERIFICAÇÕES ESTRUTURAIS

##### 6.2.1.1.Verificação da resistência à encurvadura por compressão

Seguindo o método apresentado no Capítulo 3, apresenta-se os seguintes resultados para o dimensionamento à encurvadura por compressão.

Quadro 6.1 - Resistência à encurvadura por compressão.

| Encurvadura por compressão | Modelo V0.0(*) | Modelo V0.1 | Modelo V1.0 | Modelo V1.1 | Modelo V2.0 |
|----------------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $L_{cr,y}(m)$              | 2,8            | 1,4         | 1,4         | 1,4         | 1,4         |
| $\lambda_y$                | 0,27           | 0,10        | 0,13        | 0,12        | 0,13        |
| $\Phi_y$                   | 0,55           | 0,49        | 0,50        | 0,49        | 0,50        |
| $\chi_y$                   | 0,98           | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 1,00        |
| $N_{b,Rd,y}(kN)$           | 5086,06        | 7034,74     | 6066,88     | 6412,47     | 6066,88     |
| $L_{cr,z}(m)$              | 1,4            | 2,8         | 2,6         | 1,80        | 1,57        |
| $\lambda_z$                | 0,24           | 0,50        | 0,45        | 0,31        | 0,27        |
| $\Phi_z$                   | 0,54           | 0,68        | 0,66        | 0,57        | 0,55        |
| $\chi_z$                   | 0,98           | 0,88        | 0,87        | 0,95        | 0,97        |
| $N_{b,Rd,z}(kN)$           | 5095,38        | 6221,08     | 5275,20     | 6066,24     | 5862,02     |

(\*) Devido ao facto do Modelo V0.0 ter a sua maior inércia na horizontal para efeitos de comparação são usados os valores relativos ao eixo y-y em comparação com os valores do eixo z-z dos restantes modelos e consequentemente os valores do eixo z-z do Modelo V0.0 são comparados com os valores do eixo y-y dos restantes modelos.

Os comprimentos de encurvadura obtidos através do cálculo manual apenas foram usados nos casos do Modelo V1.1 e do Modelo V2.0. Nos restantes modelos, é decido usar os comprimentos de 2,8m nos modelos V0.0 e V0.1, e no caso do modelo V1.0 é usado um comprimento de 2,6m, uma vez que a diferença para o valor obtido é considerável.

Dos valores apresentados no quadro anterior, os valores de cálculo do modelo V0.0, são relativos ao eixo y-y, por outro lado os valores de cálculo dos restantes modelos correspondem ao eixo z-z, devido à posição que o perfil apresenta no modelo V0.0.

Após serem obtidos os valores anteriores, estão reunidas todas as condições para proceder ao cálculo do rácio de resistência à encurvadura por compressão, através da Equação 3.12.

Quadro 6.2 - Rácios de resistência à encurvadura por compressão.

| Resistência à Encurvadura | Verificação                        | Modelo V0.0 | Modelo V0.1 | Modelo V1.0 | Modelo V1.1 | Modelo V2.0 |
|---------------------------|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Compressão                | $\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$ | 0,72        | 0,57        | 0,70        | 0,62        | 0,60        |

Todos os modelos cumprem o parâmetro de resistência à encurvadura por compressão, perante a cláusula 6.3.1.1 do Eurocódigo 3.

#### 6.2.1.2. Verificação da resistência à encurvadura por flexão

Apesar do cálculo da resistência à encurvadura por flexão não ser do âmbito deste trabalho, é necessário fazê-lo para a verificação final à encurvadura, Equação 3.22 e Equação 3.23.

Desta forma apresenta-se de seguida os valores do momento crítico e do respetivo coeficiente C1:

Quadro 6.3 - Coeficientes C1 e Momento Crítico.

| C1 e Momento Crítico | Modelo V0.0 | Modelo V0.1 | Modelo V1.0 | Modelo V1.1 | Modelo V2.0 |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $C_1$                | 1,00        | 1,06        | 1,03        | 1,02        | 1,03        |
| $M_{cr}$             | 15277,83    | 7853,60     | 5520,39     | 12504,40    | 14638,33    |

Como os valores do momento crítico, procede-se ao cálculo da resistência à encurvadura por flexão, apresentando os seguintes resultados:

Quadro 6.4 - Resistência à encurvadura por flexão.

| Encurvadura por flexão | Modelo V0.0 | Modelo V0.1 | Modelo V1.0 | Modelo V1.1 | Modelo V2.0 |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\bar{\lambda}_{LT}$   | 0,22        | 0,42        | 0,39        | 0,28        | 0,24        |
| $\Phi_{LT}$            | 0,49        | 0,57        | 0,56        | 0,51        | 0,49        |
| $\chi_{LT}$            | 1,00        | 0,99        | 1,00        | 1,00        | 1,00        |
| $M_{b,Rd} (kN.m)$      | 693,66      | 1285,28     | 854,93      | 952,51      | 854,93      |

Com os resultados apresentados no Quadro 6.4, estão reunidas as condições para calcular os rácios relativos à verificação de resistência à encurvadura por flexão.

Quadro 6.5 - Rácios de resistência à encurvadura por flexão.

| Resistência à Encurvadura | Verificação                        | Modelo V0.0 | Modelo V0.1 | Modelo V1.0 | Modelo V1.1 | Modelo V2.0 |
|---------------------------|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Flexão                    | $\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$ | 0,13        | 0,20        | 0,16        | 0,17        | 0,14        |

Observando os valores do quadro apresentado, resulta que o momento atuante é na ordem dos 10% do momento resistente. Desta forma verifica-se que os elementos da estrutura apresentada estão, essencialmente, sob o efeito de esforços axiais.

De forma a dar seguimento ao processo de cálculo é necessário obter, por último, os valores dos coeficientes de momentos uniformes equivalentes, de forma a calcular os fatores de interação necessários. Tal como se apresenta através do Anexo A.9.

Quadro 6.6 - Coeficientes de momentos uniformes equivalentes.

| Coeficientes | Modelo V0.0 | Modelo V0.1 | Modelo V1.0 | Modelo V1.1 | Modelo V2.0 |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $C_{my}$     | 0,90        | 0,90        | 0,99        | 0,99        | 0,99        |
| $C_{mz}$     | 0,99        | 0,98        | 1,03        | 1,00        | 1,00        |
| $C_{mLT}$    | 0,90        | 0,90        | 1,00        | 1,00        | 1,00        |

Com auxílio do Anexo A.7, apresenta-se:

Quadro 6.7 - Fatores de interação  $k_{ij}$ .

| Fatores de interação | Modelo V0.0 | Modelo V0.1 | Modelo V1.0 | Modelo V1.1 | Modelo V2.0 |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $k_{yy}$             | 0,94        | 0,90        | 0,93        | 0,91        | 0,90        |
| $k_{yz}$             | 0,60        | 0,72        | 0,55        | 0,48        | 0,47        |
| $k_{zy}$             | 0,56        | 0,96        | 0,49        | 0,47        | 0,47        |

|          |      |      |      |      |      |
|----------|------|------|------|------|------|
| $k_{zz}$ | 0,99 | 1,20 | 0,83 | 0,72 | 0,71 |
|----------|------|------|------|------|------|

### 6.2.1.3. Verificação da resistência à encurvadura por flexão composta com compressão

De forma a fechar a rotina de cálculo exibida no Capítulo 3, é calculado o rácio final de encurvadura de elementos uniformes em flexão composta com compressão, apresentando-se os seguintes resultados para os diferentes modelos calculados:

Quadro 6.8 - Rácios finais de resistência à encurvadura.

| Resistência à Encurvadura      | Verificação                                                                                                                                                                                       | V0.0 | V0.1 | V1.0 | V1.1 | V2.0 |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Flexão composta com compressão | $\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$ | 0,92 | 0,83 | 0,87 | 0,82 | 0,88 |
|                                | $\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$ | 0,93 | 1,00 | 0,96 | 0,83 | 0,92 |

### 6.2.1.4. Resumo da verificação da resistência à encurvadura por flexão composta com compressão para as diferentes análises

A verificação de segurança que se revelou condicionante no dimensionamento da corda superior foi a resistência por flexão composta com compressão (ver 6.2.1.3). No quadro seguinte resume-se os esforços axiais e momento fletor na direção y-y e o respetivo rácio da verificação de segurança para as análises realizadas.

Quadro 6.9 – Resumo da verificação da resistência à encurvadura para as diferentes análises.

| Resumo do Cálculo - Corda Superior (CS) para o Load Case mais condicionante |                        |       |               |                                     |               |                   |                |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------|---------------|-------------------------------------|---------------|-------------------|----------------|-------|
| Modelo                                                                      | Tipo de análise        | Mod o | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$ (kN) | $M_{y,Ed}$ (kN.m) | Verif. Amplifi | Ratio |
| V0.0                                                                        | 1ª Ordem               |       |               |                                     | 3621,56       | 25,17             |                | 0,88  |
|                                                                             | 1ª Ordem c/ Buckling   |       |               |                                     | 3591,18       | 77,42             |                | 0,92  |
|                                                                             | 2ª Ordem NL            | 2     | 6,75          | 1,17                                | 3648,81       | 28,08             | 90,88          | 0,89  |
|                                                                             | 2ª Ordem NL c/Buckling |       |               |                                     | 3612,96       | 90,64             |                | 0,93  |
| V0.1                                                                        | 1ª Ordem               |       | 4,31          | 1,30                                | 3435,67       | -20,97            |                | 0,82  |
|                                                                             | 1ª Ordem c/ Buckling   |       |               |                                     | 3511,94       | -56,65            | -73,74         | 0,93  |

| Resumo do Cálculo - Corda Superior (CS) para o Load Case mais condicionante |                       |      |               |                                     |               |                   |                |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------|---------------|-------------------------------------|---------------|-------------------|----------------|-------|
| Modelo                                                                      | Tipo de análise       | Modo | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$ (kN) | $M_{y,Ed}$ (kN.m) | Verif. Amplifi | Ratio |
|                                                                             | 2ªOrdem NL            | 2    |               |                                     | 3460,31       | -26,76            |                | 0,89  |
|                                                                             | 2ªOrdem NL c/Buckling |      |               |                                     | 3536,30       | -77,58            |                | 1,00  |
| V1.0                                                                        | 1ª Ordem              |      |               |                                     | 3574,81       | -25,66            |                | 0,82  |
|                                                                             | 1ª Ordem c/ Buckling  |      |               |                                     | 3570,13       | -50,23            |                | 0,88  |
|                                                                             | 2ªOrdem NL            | 2    | 4,80          | 1,27                                | 3602,21       | -28,59            | -63,61         | 0,83  |
|                                                                             | 2ªOrdem NL c/Buckling |      |               |                                     | 3596,79       | -63,73            |                | 0,96  |
| V1.1                                                                        | 1ª Ordem              |      |               |                                     | 3732,08       | -19,16            |                | 0,76  |
|                                                                             | 1ª Ordem c/ Buckling  |      |               |                                     | 3723,87       | -53,33            |                | 0,80  |
|                                                                             | 2ªOrdem NL            | 2    | 4,62          | 1,28                                | 3751,53       | -21,11            | -68,06         | 0,77  |
|                                                                             | 2ªOrdem NL c/Buckling |      |               |                                     | 3742,16       | -65,82            |                | 0,83  |
| V2.0                                                                        | 1ª Ordem              |      |               |                                     | 3566,97       | 35,70             |                | 0,76  |
|                                                                             | 1ª Ordem c/ Buckling  |      |               |                                     | 3475,85       | 105,02            |                | 0,87  |
|                                                                             | 2ªOrdem NL            | 2    | 4,90          | 1,26                                | 3594,50       | 38,44             | 131,95         | 0,77  |
|                                                                             | 2ªOrdem NL c/Buckling |      |               |                                     | 3494,68       | 125,49            |                | 0,92  |

### 6.2.2. ANÁLISE EQUIVALENTE

Sendo um estudo menos moroso, fazer uma análise equivalente é um ponto de partida aquando da verificação da estabilidade de uma estrutura, pois permite obter uma estimativa da ordem de grandeza dos esforços que é obtida através de uma análise não linear.

No Anexo D apresentam-se os valores que resultam duma análise que se baseia na substituição das “imperfeições geométricas equivalentes”, anteriormente apresentadas, por sistemas de forças horizontais equivalentes.

Apresentam-se respetivamente no Anexo D:

- Anexo D.1 – Resultados das forças equivalentes do modelo V0.0;
- Anexo D.2 – Resultados das forças equivalentes do modelo V0.1;
- Anexo D.3 – Resultados das forças equivalentes do modelo V1.0;
- Anexo D.4 – Resultados das forças equivalentes do modelo V1.1;
- Anexo D.5 – Resultados das forças equivalentes do modelo V2.0.

De forma a obter estas forças foram calculados, com auxílio do programa de cálculo, os deslocamentos horizontais dos nós da corda superior, assim como os esforços axiais nesses pontos. De seguida, enunciando a cláusula 5.5.5 (2) do Eurocódigo 3, procede-se ao cálculo da força estabilizante equivalente.

Na norma, a força estabilizante é apresentada como uma força distribuída ao longo de toda a estrutura, no entanto, no caso apresentado, esta força foi transformada em forças pontuais aplicadas nos nós, tendo como objetivo de representar de uma forma mais exata a deformação estrutural equivalente a estas forças.

Verifica-se que as forças equivalentes têm uma ordem de grandeza bastante reduzida.

Esta análise foi realizada apenas para a posição da carga móvel a meio vão, sendo esta a posição, expectável, mais desfavorável a considerar neste tipo de análise.

#### 6.2.2.1. Resumo dos resultados das análises (1º modo de encurvadura)

Fazendo as análises descritas no capítulo anterior considerando a imperfeição da estrutura de acordo com o primeiro modo, resultam os seguintes resultados:

Quadro 6.10 – Resultados das várias análises (1ª modo de encurvadura).

| Resumo do Cálculo - Corda Superior (CS) para o Load Case mais condicionante |                        |      |            |               |                   |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------|------|------------|---------------|-------------------|-------|
| Modelo                                                                      | Tipo de análise        | Modo | LC e Barra | Resultados    |                   |       |
|                                                                             |                        |      |            | $N_{Ed}$ (kN) | $M_{y,Ed}$ (kN.m) | Ratio |
| V0.0                                                                        | 1ª Ordem               | --   | 223 / 1984 | 3649,93       | 2,19              | 0,83  |
|                                                                             | 1ª Ordem c/ Buckling   | 1    | 223 / 1984 | 3594,70       | 50,42             | 0,86  |
|                                                                             | 2ª Ordem NL            | --   | 223 / 1984 | 3677,30       | 2,66              | 0,84  |
|                                                                             | 2ª Ordem NL c/Buckling | 1    | 223 / 1984 | 3614,01       | 59,40             | 0,87  |
|                                                                             | Análise Equivalente    | --   | 223 / 1984 | 3649,92       | 2,92              | 0,83  |
| V0.1                                                                        | 1ª Ordem               | --   | 223 / 1984 | 3506,74       | 14,27             | 0,78  |
|                                                                             | 1ª Ordem c/ Buckling   | 1    | 223 / 22   | 3609,22       | -42,06            | 0,87  |
|                                                                             | 2ª Ordem NL            | --   | 223 / 1393 | 3531,80       | 16,97             | 0,79  |
|                                                                             | 2ª Ordem NL c/Buckling | 1    | 223 / 22   | 3638,88       | -56,93            | 0,92  |
|                                                                             | Análise Equivalente    | --   | 223 / 1393 | 3506,73       | 15,63             | 0,78  |
| V1.0                                                                        | 1ª Ordem               | --   | 223 / 157  | 3563,95       | 18,62             | 0,79  |
|                                                                             | 1ª Ordem c/ Buckling   | 1    | 223 / 151  | 3655,87       | -45,54            | 0,87  |
|                                                                             | 2ª Ordem NL            | --   | 223 / 157  | 3589,85       | 20,48             | 0,80  |
|                                                                             | 2ª Ordem NL c/Buckling | 1    | 223 / 151  | 3685,92       | -59,31            | 0,90  |
|                                                                             | Análise Equivalente    | --   | 223 / 157  | 3563,96       | 20,36             | 0,80  |
| V1.1                                                                        | 1ª Ordem               | --   | 223 / 157  | 3715,59       | 13,39             | 0,74  |
|                                                                             | 1ª Ordem c/ Buckling   | 1    | 223 / 151  | 3816,70       | -39,45            | 0,77  |
|                                                                             | 2ª Ordem NL            | --   | 223 / 157  | 3735,33       | 14,51             | 0,75  |
|                                                                             | 2ª Ordem NL c/Buckling | 1    | 223 / 151  | 3839,71       | -49,47            | 0,79  |
|                                                                             | Análise Equivalente    | --   | 223 / 157  | 3716,03       | 17,14             | 0,74  |
| V2.0                                                                        | 1ª Ordem               | --   | 223 / 161  | 3576,34       | 32,27             | 0,75  |
|                                                                             | 1ª Ordem c/ Buckling   | 1    | 223 / 154  | 3612,98       | -36,17            | 0,77  |
|                                                                             | 2ª Ordem NL            | --   | 223 / 161  | 3604,50       | 34,01             | 0,76  |

| Resumo do Cálculo - Corda Superior (CS) para o Load Case mais condicionante |                        |      |            |               |                   |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------|------|------------|---------------|-------------------|-------|
| Modelo                                                                      | Tipo de análise        | Modo | LC e Barra | Resultados    |                   |       |
|                                                                             |                        |      |            | $N_{Ed}$ (kN) | $M_{y,Ed}$ (kN.m) | Ratio |
|                                                                             | 2ª Ordem NL c/Buckling | 1    | 223 / 154  | 3650,77       | -50,97            | 0,79  |
|                                                                             | Análise Equivalente    | --   | 223 / 161  | 3578,97       | 39,30             | 0,76  |

No que respeita a análise equivalente, verifica-se que os resultados obtidos não são os esperados, uma vez que nesta análise obteve-se resultados muito semelhantes aos encontrados numa análise de 1ª ordem. De facto, não parece ser uma boa análise para o tipo de casos em que se enquadra o presente caso de estudo.

### 6.3.DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS EM MADEIRA

Neste subcapítulo apresenta-se os resultados relativos ao dimensionamento dos elementos em madeira.

De igual forma são apresentados os esforços instalados em cada modelo:

Quadro 6.11 - Esforços impostos nos elementos de madeira.

| Esforços:         | Modelos |         |         |
|-------------------|---------|---------|---------|
|                   | V1.0    | V1.1    | V2.0    |
| $N_{Ed}$ (kN)     | 99,77   | -478,31 | -148,46 |
| $M_{y,Ed}$ (kN.m) | -0,17   | 31,69   | -3,30   |
| $M_{z,Ed}$ (kN.m) | 0,02    | 19,73   | 0,64    |

De forma a prosseguir com o cálculo, são calculados os valores característicos de cálculo. Não é possível sem antes definir a classe de serviço e o tempo de duração da carga. De forma a obter o coeficiente de modificação de resistência.

Obtendo-se desta forma os seguintes resultados para os valores de cálculo:

Quadro 6.12 - Valores de cálculo de resistência, dos elementos em madeira.

| Valores de cálculo: | Modelos |       |       |
|---------------------|---------|-------|-------|
|                     | V1.0    | V1.1  | V2.0  |
| $f_{c,0,d}$         | 13,46   | 11,31 | 11,31 |
| $f_{m,y,d}$         | 18,85   | 18,85 | 18,85 |
| $f_{m,z,d}$         | 18,85   | 18,85 | 18,85 |

Continuando a metodologia descrita no capítulo 3, segue o cálculo da esbelteza e da respetiva esbelteza relativa. No entanto, de acordo com os esforços observados no Quadro 6.11, apenas o elemento apresentado para o modelo 1.0 possui esforço de compressão, sendo o único elemento para o

qual o cálculo foi efetuado. Consequentemente também é o único elemento para o qual vão ser apresentados valores para os coeficientes de encurvadura, precedidos dos valores dos coeficientes  $k_y$  e  $k_z$ .

Quadro 6.13 - Dados para o cálculo da resistência à encurvadura.

|                        |       |                        |       |
|------------------------|-------|------------------------|-------|
| $L_{v,y}(m)$           | 2,18  | $L_{v,z}(m)$           | 2,18  |
| $\lambda_y$            | 50,31 | $\lambda_z$            | 50,31 |
| $\lambda_{rel,y}$      | 0,86  | $\lambda_{rel,z}$      | 0,86  |
| $\sigma_{c,cr,y}(MPa)$ | 33,93 | $\sigma_{c,cr,z}(MPa)$ | 33,93 |
| $k_y$                  | 0,92  | $k_z$                  | 0,92  |
| $k_{c,y}$              | 0,79  | $k_{c,z}$              | 0,79  |

De acordo com a cláusula 6.3.2 (2) do EC5, uma vez que pelo menos uma esbelteza relativa é superior a 0,3 deve verificar-se as condições específicas de encurvadura. (Equações 3.28 e 3.29)

Os resultados obtidos são apresentados no quadro seguinte.

Quadro 6.14 - Resumo do cálculo de elementos de madeira comprimidos.

| Resumo do Cálculo - Elementos de madeira comprimidos condicionantes |                       |            |           |            |                           |                           |                           |       |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------|-----------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|
| Modelo                                                              | Tipo de análise       | Resultados |           |            |                           |                           |                           |       |
|                                                                     |                       | $k_{c,y}$  | $k_{c,z}$ | LC e Barra | $\sigma_{c,0,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,y,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,z,d}$<br>(MPa) | Ratio |
| V1.0                                                                | 2ªOrdem NL c/Buckling | 0,79       | 0,79      | 222 / 5290 | 4,44                      | 0,3                       | 0,04                      | 0,43  |
| V1.1                                                                | 2ªOrdem NL c/Buckling | -          | -         | 221 / 5306 | -5,31                     | -7,04                     | -4,38                     | 1,00  |
| V2.0                                                                | 2ªOrdem NL c/Buckling | -          | -         | 226 / 5420 | -6,60                     | -5,86                     | -1,14                     | 0,94  |

Analisando o quadro geral do dimensionamento dos elementos em madeira, é possível observar que apenas o modelo V1.0 funciona da forma idealizada, uma vez que é o único que apresenta o elemento condicionante à compressão e no qual os esforços são essencialmente de compressão, sendo os esforços de flexão residuais, tal como era pretendido.

Devido às dificuldades enunciadas anteriormente, o modelo V1.1 apresenta maiores esforços de flexão do que axiais. Conclui-se, assim, que os elementos de madeira possuem uma rigidez tal que o seu comportamento estrutural absorve uma percentagem dos esforços presentes da estrutura principal, originando esforços de flexão maiores do que os esforços axiais. Desta forma, esta solução assume um comportamento de estrutura mista, não sendo de facto esse o objetivo.

Apesar das melhorias resultantes do modelo V1.1 para o modelo V2.0, nomeadamente a redução de secção dos elementos de ambos os materiais, o seu funcionamento estrutural também não é o desejado, pois apesar de se ter conseguido reduzir os esforços de flexão, na direção y-y o seu valor é demasiado elevado para ser considerado residual.

Com os valores obtidos, é então válido afirmar que a utilização de elementos de madeira para contraventar elementos metálicos, tal como o presente caso de estudo, é uma solução viável e com

potencial para ser desenvolvida, desde que a conceção estrutural seja pensada para que os elementos de madeira sejam submetidos apenas a esforços axiais. Os rácios finais apresentados no Quadro 6.14, por si só, comprovam esta afirmação.

#### 6.4. QUANTIDADES DE MATERIAL (AÇO E MADEIRA) DAS SOLUÇÕES ESTUDADAS

No presente subcapítulo são apresentados, numa forma simplificada, os resultados das quantidades de aço e madeira para o caso de estudo (V0.0) e para as soluções estudadas. A percentagem relacionada é correspondente ao modelo V0.1, assim como todas as comparações que serão apresentadas.

De seguida apresenta-se os resultados dos pesos finais da estrutura:

Quadro 6.15 – Pesos finais correspondentes a cada modelo.

| Peso final da estrutura nos respetivos modelos |                         |         |           |         |      |
|------------------------------------------------|-------------------------|---------|-----------|---------|------|
| Perfil                                         |                         |         | Peso (Kg) |         | %    |
| Modelo                                         | Aço<br>(Corda Superior) | Madeira | Aço       | Madeira | Aço  |
| V0.0                                           | HEB320                  | -       | 30928     | -       | -    |
| V0.1                                           | HEB450                  | -       | 33159     | -       | -    |
| V1.0                                           | HEB340                  | W15*15  | 34267     | 552     | 3,3  |
| V1.1                                           | HEB360                  | W30*30  | 32123     | 9084    | -6,3 |
| V2.0                                           | HEB340                  | W15*15  | 30998     | 1621    | -6,5 |

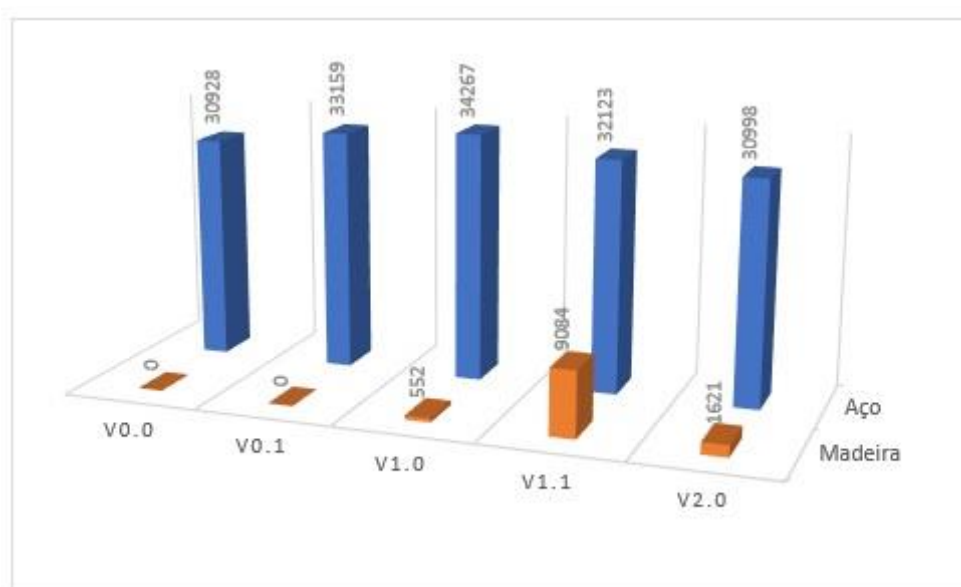


Figura 6.1 - Gráfico com os respetivos pesos discriminados de cada modelo. (kg)

Num projeto de engenharia, o objetivo é obter a melhor solução com o menor valor económico possível, perante as condições disponíveis.

De forma a eleger o modelo mais viável ao problema apresentado, são analisados os seguintes itens:

- O modelo V1.0 possui menos quantidade de madeira, no entanto é usada uma maior percentagem de aço, devido ao prolongamento das travessas. Essa porção adicional origina um aumento de aço em 3,3% em relação peso inicial. No entanto, é o modelo mais equilibrado estruturalmente, mais simples em termos construtivos e o que produz um melhor funcionamento a nível dos elementos da madeira.
- Com as modificações impostas no modelo V1.1, é conseguida uma redução de aço em 6,3% sendo, completamente, descompensada pela quantidade de madeira usada, originando um aumento considerável de estrutura de madeira. Verifica-se ainda que, é uma solução de difícil execução; a madeira não tem o efeito pretendido, como já foi mencionado, a sua execução origina uma solução mista, em termos estruturais.
- O modelo V2.0, em termos de pesagem dos materiais, é o que produz boas melhorias. Obtém-se uma redução de 6,5% na percentagem de aço usado, e a quantidade de madeira usada apesar de ser três vezes mais do que no modelo V1.0, é suficientemente baixa para que este seja o modelo mais leve. Estruturalmente possui algumas dificuldades a nível das ligações entre os elementos de madeira.

Após a análise dos vários casos, e tendo em conta todas as implicações inerentes a cada modelo, a melhor solução ao presente caso de estudo é o modelo V1.0. Salvaguardando que com as devidas afinações, acima de tudo em termos de ligações, o modelo V2.0 é também uma solução a ponderar.

# 7

## CONCLUSÕES

### 7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo desta dissertação é o estudo de uma ponte metálica com contraventamentos em madeira.

Numa primeira fase, foi realizado o estado da arte que pretendeu compreender o comportamento estrutural de uma ponte em treliça, com especial ênfase nas pontes do tipo “*Half Through*”. Foi também realizada uma pesquisa de pontes que empregam os dois materiais - aço e madeira. Contudo, verificou-se que é uma solução que tem vindo a ser usada em edifícios, mas ainda não usada na área das pontes.

A partir do estado da arte, e perante o caso de estudo a ser analisado, foi possível identificar os documentos normativos a utilizar na caracterização de ações e combinações na ponte, no dimensionamento de estruturas em aço e no dimensionamento de estruturas em madeira. Neste trabalho foram utilizados três documentos normativos, designadamente:

- AASTHO LRFD Bridge Design Specifications, 8<sup>th</sup> Edition (2017), American Association of State Highway and Transportation Officials;
- Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço | Parte 1-1 – Regras gerais e regras para edifícios;
- Eurocódigo 5 – Projeto de estruturas de madeira | Parte 1-1 - Regras gerais e regras para edifícios.

O caso de estudo desta dissertação – ponte metálica para um vão de 36,4 m – provém de um fornecimento de pontes modulares requerido por um Cliente à empresa BERD. Primeiramente, apresentou-se genericamente a ponte e o seu conceito estrutural; seguidamente apresentaram-se os critérios de projeto – ações e combinações regulamentares. Ainda, no contexto da análise do caso de estudo, identificou-se o elemento comprimido a contraventar, a corda superior, tendo sido elaborado um dimensionamento da estrutura direcionado para a estabilidade deste elemento. Este dimensionamento consistiu na avaliação do comportamento estrutural da ponte, tendo por base o modelo fornecido, aplicação de forças e por fim numa análise de instabilidade.

Neste sentido são apresentadas três diferentes soluções para contraventar a corda superior recorrendo ao uso de elementos de madeira, tendo sido verificado que o uso deste material pode ser uma solução viável. Conclui-se também que o funcionamento destes elementos de madeira, implementados para oferecer resistência às forças impostas pela instabilidade, está muito dependente das condições de apoio a que estão submetidos.

No decorrer desta dissertação, foi constatado que a estabilidade global de uma estrutura, a estabilidade dos seus elementos, a sua rigidez, as imperfeições e o comportamento das suas ligações, são uma parte fundamental no dimensionamento de uma estrutura metálica.

Verificou-se que o fator de amplificação produz ótimas estimativas para os valores dos esforços a obter numa análise de 2ª ordem a partir de uma análise de 1ª ordem, em que em ambas se considera a configuração da estrutura pré-deformada de acordo com os modos globais de encurvadura.

Foi, de igual forma, possível determinar que os efeitos de segunda ordem condicionam o dimensionamento estrutural. No entanto para avaliar estes efeitos, é necessário uma análise demorada, abrangendo uma análise não-linear geométrica, implicando um processo iterativo para obter o equilíbrio da estrutura em relação às ações que a solicitam. De forma a ultrapassar todo este processo, o Eurocódigo 3 propõe um método de cálculo simplificado, onde é possível integrar as “imperfeições geométricas equivalentes” através de um sistema de forças horizontais equivalentes. No entanto neste enquadramento, os resultados obtidos não vão de encontro ao esperado e não se revelaram do lado da segurança. Conclui-se portanto que não é aconselhável usar esse método neste tipo de estruturas.

O programa de cálculo Autodesk *Robot Structural Analysis Professional* apresenta resultados bastante aproximados dos obtidos analiticamente, nomeadamente, coincidentes com as verificações realizadas paralelamente no caso da avaliação estrutural da madeira. Contudo, é necessário tomar os devidos cuidados na modelação, nomeadamente, na definição dos parâmetros de cálculo à encurvadura e na definição do tipo de ligação entre cada elemento, dado influenciar bastante o comportamento, a rigidez (individual e global) e resistência dos elementos.

Nos modelos das soluções contraventadas com auxílio de madeira conclui-se que as forças de instabilização impostas pela encurvadura são de uma ordem de grandeza pouco elevada, permitindo desta forma que uma pequena secção de madeira seja suficiente para as suportar. Como consequência uma quantidade de aço considerável, é reduzida e substituída por pequena quantidade de madeira.

A solução que se afigurou como mais vantajosa foi a que diz respeito ao modelo V1.0, pelos seguintes aspetos:

- Melhores valores analíticos obtidos;
- Melhor funcionamento estrutural, relativamente à instabilidade por encurvadura;
- Maior facilidade construtiva;
- Transparência e maior elegância visual, em relação aos restantes modelos apresentados.

Importa, por último, referir que o facto do caso de estudo ser um projeto já elaborado permitiu identificar diversos aspetos e dificuldades que ocorrem no desenvolvimento de um projeto de estruturas.

## 7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento desta dissertação, foram identificados alguns aspetos que, mesmo não fazendo parte dos objetivos iniciais, permitiam obter uma solução mais refinada e completa. É dado destaque aos seguintes pontos:

- Concepção, dimensionamento e detalhe das ligações madeira-aço e madeira-madeira. Nota-se que a rigidez da ligação que efetivamente se definir tem influência nos esforços que surgem na madeira, designadamente os esforços de flexão que, embora se possam apresentar numa forma residual, têm bastante influência no dimensionamento do elemento de contraventamento em madeira.

- Realizar um estudo mais aprofundado sobre o tipo de madeira a utilizar neste tipo de casos – pontes rodoviárias. Em particular, avaliar a madeira nas questões de durabilidade e ponderar proteção específica para a intempérie.
- Analisar os restantes elementos estruturais, nomeadamente os montantes e diagonais, no sentido de avaliar se nas soluções com contraventamentos em madeira estes poderão ser otimizados.
- Avaliação económica da solução alternativa que se configurou mais favorável, a solução designada como modelo V1.0.

Os trabalhos futuros aqui referidos têm como objetivo alargar e aprofundar quer os conhecimentos quer o detalhe necessário para a conclusão de um projeto de execução da ponte MB36 com contraventamentos em madeira.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Calil, C. and A. Dias, *Utilização da madeira em construções rurais*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2010. 1.
2. Lin, W. and T. Yoda, *Chapter Eight - Truss Bridges*, in *Bridge Engineering*, W. Lin and T. Yoda, Editors. 2017, Butterworth-Heinemann. p. 137-153.
3. Lin, W. and T. Yoda, *Chapter One - Introduction of Bridge Engineering*, in *Bridge Engineering*, W. Lin and T. Yoda, Editors. 2017, Butterworth-Heinemann. p. 1-30.
4. Comission, E., *Facilitating market development for sections in industrial halls and low-rise buildings (SECHALO)*, in *European Comission*. 2012: Luxembourg.
5. Pfeil, W., *Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático*. 2009.
6. *History of bridges*. Available from: <http://www.historyofbridges.com/facts-about-bridges/howe-truss/>.
7. Griggs, J.F., *Estruturas Históricas*. 2015.
8. Megson, T.H.G., *Chapter 4 - Analysis of Pin-Jointed Trusses*, in *Structural and Stress Analysis (Third Edition)*, T.H.G. Megson, Editor. 2014, Butterworth-Heinemann: Boston. p. 79-109.
9. Khan, M.A., *Bridge and highway structure rehabilitation and repair*. 2010.
10. *Excelbridge*. Available from: <http://www.excelbridge.com/>.
11. *specscivilsolutions*. Available from: <http://www.specscivilsolutions.com/beam-and-truss-bridges.html>.
12. *Steelconstruction*. Available from: [https://http://www.steelconstruction.info/Bracing\\_systems](https://http://www.steelconstruction.info/Bracing_systems).
13. Khorasani, Y., *Feasibility study of hybrid wood steel structures*. 2011.
14. *gafabricator*. Available from: <http://gafabricator.com/page49.html>.
15. *Tboake*. 18/06/2019; Available from: <http://www.tboake.com/SSEF1/timber.shtml>.
16. *Tboake*. Available from: <http://www.tboake.com/steel/ssef/skytrain/rupert.html>.
17. Portugal Instituto Português da Qualidade, *Eurocódigo 3 : projecto de estruturas de aço Parte 1.1 regras gerais e regras para edifícios NP ENV 1993-1-1:1998*. 1998, Monte da Caparica: IPQ. 154.
18. Simões, R.A.D., *Manual de dimensionamento de estruturas metálicas Eurocódigo 3: Projecto de Estruturas de Aço Parte 1-1 regras gerais e regras para edifícios*. 2.<sup>a</sup> ed ed. Construção Metálica e Mista. 2007, [Lisboa]: CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista. XXIV, 221.
19. Reis, A.J., *Projecto de estruturas metálicas eurocódigo 3*. 2010.
20. Portugal Instituto Português da Qualidade, *Eurocódigo 5: projecto de estruturas de madeira NP ENV 1995-1-1: 1998 Parte 1.1 regras gerais e regras para edifícios*. 1998, Monte da Caparica: IPQ.
21. Negrão, J. and J.M.M.A.d.A. Faria, *Projecto de estruturas de madeira*. 2009, [S.l.]: Publindústria Edições Técnicas. V, III, 247.



## **ANEXOS**

Anexo A – Quadros auxiliares de acordo com o EC3-1-1.

Anexo B – Imagens ilustrativas do programa de cálculo.

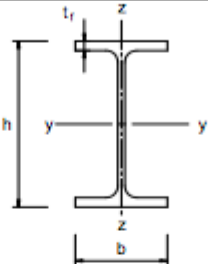
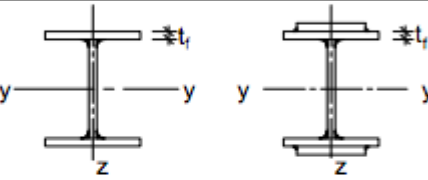
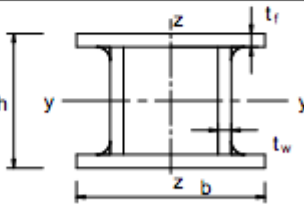
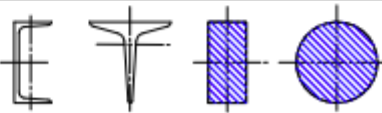
Anexo C – Imagens dos modos de encurvadura dos diferentes modelos/soluções.

Anexo D – Resultados das forças equivalentes para os diferentes modelos.

Anexo E – Inputs e outputs do programa de cálculo.



## ANEXO A: QUADROS AUXILIARES DE ACORDO COM O EC3-1-1.

| Secção transversal              |                                                                                     | Limites                                                              |                                           | Encurva-<br>dura em<br>relação<br>ao eixo | Curva de<br>encurvadura          |                                  |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                                 |                                                                                     |                                                                      |                                           |                                           | S 235<br>S 275<br>S 355<br>S 420 | S 460                            |
| Perfis laminados                |    | $h/b > 1,2$                                                          | $t_f \leq 40 \text{ mm}$                  | y-y<br>z-z                                | a<br>b                           | a <sub>0</sub><br>a <sub>0</sub> |
|                                 |                                                                                     |                                                                      | $40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$ | y-y<br>z-z                                | b<br>c                           | a<br>a                           |
|                                 |                                                                                     | $h/b \leq 1,2$                                                       | $t_f \leq 100 \text{ mm}$                 | y-y<br>z-z                                | b<br>c                           | a<br>a                           |
|                                 |                                                                                     |                                                                      | $t_f > 100 \text{ mm}$                    | y-y<br>z-z                                | d<br>d                           | c<br>c                           |
| Perfis I soldados               |    | $t_f \leq 40 \text{ mm}$                                             |                                           | y-y<br>z-z                                | b<br>c                           | b<br>c                           |
|                                 |                                                                                     | $t_f > 40 \text{ mm}$                                                |                                           | y-y<br>z-z                                | c<br>d                           | c<br>d                           |
| Secções<br>tubulares            |   | acabadas a quente                                                    |                                           | qualquer                                  | a                                | a <sub>0</sub>                   |
|                                 |                                                                                     | enformadas a frio                                                    |                                           | qualquer                                  | c                                | c                                |
| Secções em caixão<br>soldadas   |  | em geral (excepto como<br>abaixo indicado)                           |                                           | qualquer                                  | b                                | b                                |
|                                 |                                                                                     | soldaduras espessas:<br>$a > 0,5t_f$<br>$b/t_f < 30$<br>$h/t_w < 30$ |                                           | qualquer                                  | c                                | c                                |
| Perfis U, T e<br>secções cheias |  |                                                                      |                                           | qualquer                                  | c                                | c                                |
| Cantoneiras                     |  |                                                                      |                                           | qualquer                                  | b                                | b                                |

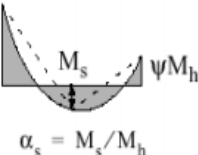
Anexo A.1 – EC3-1-1: Quadro 6.2 - Escolha da curva de encurvadura em função da secção transversal.[17]

| Factores de interacção                                                                                                                                                         | Tipo de secções                                 | Hipóteses de cálculo                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                |                                                 | Propriedades elásticas das secções transversais<br>Classe 3, Classe 4                                                                                                         | Propriedades plásticas das secções transversais<br>Classe 1, Classe 2                                                                                                              |
| $k_{yy}$                                                                                                                                                                       | Secções em I<br>Secções tubulares rectangulares | $C_{my} \left( 1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$<br>$\leq C_{my} \left( 1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ | $C_{my} \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$<br>$\leq C_{my} \left( 1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$  |
| $k_{yz}$                                                                                                                                                                       | Secções em I<br>Secções tubulares rectangulares | $k_{zz}$                                                                                                                                                                      | $0,6 k_{zz}$                                                                                                                                                                       |
| $k_{zy}$                                                                                                                                                                       | Secções em I<br>Secções tubulares rectangulares | $0,8 k_{yy}$                                                                                                                                                                  | $0,6 k_{yy}$                                                                                                                                                                       |
| $k_{zz}$                                                                                                                                                                       | Secções em I                                    | $C_{mz} \left( 1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$<br>$\leq C_{mz} \left( 1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ | $C_{mz} \left( 1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$<br>$\leq C_{mz} \left( 1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ |
|                                                                                                                                                                                | Secções tubulares rectangulares                 |                                                                                                                                                                               | $C_{mz} \left( 1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$<br>$\leq C_{mz} \left( 1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$  |
| Para secções em I e H e para secções tubulares rectangulares submetidas a compressão axial e a flexão recta $M_{y,Ed}$ , o factor $k_{zy}$ poderá considerar-se $k_{zy} = 0$ . |                                                 |                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                    |

Anexo A.2 – EC3-1-1: Quadro B.1 - Fatores de interacção em elementos não suscetíveis de sofrer deformações de torção.[17]

| Factores de interação | Hipóteses de cálculo                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                       | Propriedades elásticas das secções transversais<br>Classe 3, Classe 4                                                                                                                                            | Propriedades plásticas das secções transversais<br>Classe 1, Classe 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| $k_{yy}$              | $k_{yy}$ do Quadro B.1                                                                                                                                                                                           | $k_{yy}$ do Quadro B.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| $k_{yz}$              | $k_{yz}$ do Quadro B.1                                                                                                                                                                                           | $k_{yz}$ do Quadro B.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| $k_{zy}$              | $\left[ 1 - \frac{0,05 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[ 1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ | $\left[ 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[ 1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ <p>para <math>\bar{\lambda}_z &lt; 0,4</math>:</p> $k_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z \leq 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}$ |
| $k_{zz}$              | $k_{zz}$ do Quadro B.1                                                                                                                                                                                           | $k_{zz}$ do Quadro B.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

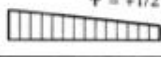
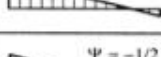
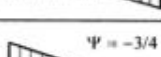
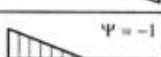
Anexo A.3 – EC3-1-1: Quadro B.2 - Fatores de interação em elementos suscetíveis de sofrer deformações de torção.[17]

| Diagrama de momentos                                                                                                                                                                                 | Domínio de aplicação     |                        | $C_{my}$ e $C_{mz}$ e $C_{mLT}$      |                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                      |                          |                        | Carga uniforme                       | Carga concentrada                   |
|                                                                                                                     | $-1 \leq \psi \leq 1$    |                        | $0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$             |                                     |
|                                                                                                                     | $0 \leq \alpha_s \leq 1$ | $-1 \leq \psi \leq 1$  | $0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$         | $0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$        |
|                                                                                                                                                                                                      | $-1 \leq \alpha_s < 0$   | $0 \leq \psi \leq 1$   | $0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$         | $-0,8\alpha_s \geq 0,4$             |
|                                                                                                                                                                                                      |                          | $-1 \leq \psi < 0$     | $0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$ | $0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$ |
|                                                                                                                     | $0 \leq \alpha_h \leq 1$ | $-1 \leq \psi \leq 1$  | $0,95 + 0,05\alpha_h$                | $0,90 + 0,10\alpha_h$               |
|                                                                                                                                                                                                      | $-1 \leq \alpha_h < 0$   | $0 \leq \psi \leq 1$   | $0,95 + 0,05\alpha_h$                | $0,90 + 0,10\alpha_h$               |
|                                                                                                                                                                                                      |                          | $-1 \leq \psi < 0$     | $0,95 + 0,05\alpha_h(1+2\psi)$       | $0,90 + 0,10\alpha_h(1+2\psi)$      |
| Em elementos com modos de encurvadura associados a deslocamentos laterais, o coeficiente de momento uniforme equivalente deverá tomar-se igual a $C_{my} = 0,9$ ou $C_{mz} = 0,9$ , respectivamente. |                          |                        |                                      |                                     |
| $C_{my}$ , $C_{mz}$ e $C_{mLT}$ deverão ser obtidos de acordo com o diagrama dos momentos flectores actuantes entre as secções de travamento, de acordo com:                                         |                          |                        |                                      |                                     |
| coeficiente de momento                                                                                                                                                                               | eixo de flexão           | travamento na direcção |                                      |                                     |
| $C_{my}$                                                                                                                                                                                             | y-y                      | z-z                    |                                      |                                     |
| $C_{mz}$                                                                                                                                                                                             | z-z                      | y-y                    |                                      |                                     |
| $C_{mLT}$                                                                                                                                                                                            | y-y                      | y-y                    |                                      |                                     |

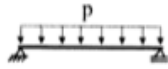
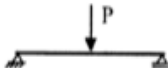
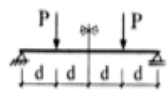
Anexo A.4 – EC3-1-1: Quadro B.3 – Coeficientes de momento uniforme equivalente.[17]

| Classe            | 1          | 2          | 3          | 4                |
|-------------------|------------|------------|------------|------------------|
| $A_i$             | A          | A          | A          | $A_{eff}$        |
| $W_y$             | $W_{pl,y}$ | $W_{pl,y}$ | $W_{el,y}$ | $W_{eff,y}$      |
| $W_z$             | $W_{pl,z}$ | $W_{pl,z}$ | $W_{el,z}$ | $W_{eff,z}$      |
| $\Delta M_{y,Ed}$ | 0          | 0          | 0          | $e_{N,y} N_{Ed}$ |
| $\Delta M_{z,Ed}$ | 0          | 0          | 0          | $e_{N,z} N_{Ed}$ |

Anexo A.5 – EC3-1-1: Valores de  $N_{Rk} = f_y A_i$ ,  $M_{i,Rk} = f_y W_i e \Delta M_{i,Ed}$ . [17]

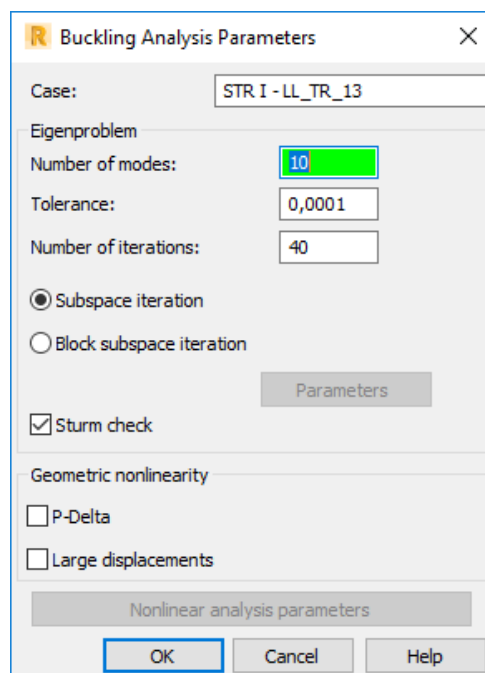
| Carregamento e condições de apoio                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Diagrama de momentos                                                                                | $k_z$      | $C_1$        | $C_3$                             |                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                     |            |              | $\psi_f \leq 0$                   | $\psi_f > 0$                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | $\psi = +1$<br>    | 1.0<br>0.5 | 1.00<br>1.05 | 1.000<br>1.019                    |                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $\psi = +3/4$<br>  | 1.0<br>0.5 | 1.14<br>1.19 | 1.000<br>1.017                    |                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $\psi = +1/2$<br>  | 1.0<br>0.5 | 1.31<br>1.37 | 1.000<br>1.000                    |                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $\psi = +1/4$<br>  | 1.0<br>0.5 | 1.52<br>1.60 | 1.000<br>1.000                    |                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $\psi = 0$<br>     | 1.0<br>0.5 | 1.77<br>1.86 | 1.000<br>1.000                    |                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $\psi = -1/4$<br>  | 1.0<br>0.5 | 2.06<br>2.15 | 1.000<br>1.000                    | 0.850<br>0.650                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $\psi = -1/2$<br>  | 1.0<br>0.5 | 2.35<br>2.42 | 1.000<br>0.950                    | $1.3 - 1.2\psi_f$<br>$0.77 - \psi_f$ |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $\psi = -3/4$<br> | 1.0<br>0.5 | 2.60<br>2.45 | 1.000<br>0.850                    | $0.55 - \psi_f$<br>$0.35 - \psi_f$   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $\psi = -1$<br>  | 1.0<br>0.5 | 2.60<br>2.45 | $-\psi_f$<br>$-0.125 - 0.7\psi_f$ | $-\psi_f$<br>$-0.125 - 0.7\psi_f$    |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Em vigas submetidas a momentos de extremidade, por definição <math>C_2 z_g = 0</math>;</li> <li><math>\psi_f = \frac{I_{fc} - I_{ft}}{I_{fc} + I_{ft}}</math>, sendo <math>I_{fc}</math> e <math>I_{ft}</math> os momentos de inércia dos banzos comprimido e traccionado, respectivamente, em relação ao eixo de menor inércia da secção (eixo z);</li> <li><math>C_1</math> deve ser dividido por 1.05 quando <math>\frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{EI_w}{GI_T}} \leq 1.0</math>, mas <math>C_1 \geq 1.0</math>.</li> </ul> |                                                                                                     |            |              |                                   |                                      |

Anexo A.6 - Fatores equivalentes de momento uniforme.[18]

| Carregamento e condições de apoio                                                   | Diagrama de momentos                                                                | $k_z$      | $C_1$        | $C_2$        | $C_3$          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------|--------------|----------------|
|  |  | 1.0<br>0.5 | 1.12<br>0.97 | 0.45<br>0.36 | 0.525<br>0.478 |
|  |  | 1.0<br>0.5 | 1.35<br>1.05 | 0.59<br>0.48 | 0.411<br>0.338 |
|  |  | 1.0<br>0.5 | 1.04<br>0.95 | 0.42<br>0.31 | 0.562<br>0.539 |

Anexo A.7 - Fatores equivalentes de momento uniforme.[18]



**ANEXO B: IMAGENS ILUSTRATIVAS DO PROGRAMA DE CÁLCULO.**

Anexo B.1 - Buckling Analysis, Robot.

| Case/Mode | Critical coef. | Precision   |
|-----------|----------------|-------------|
| 221/ 1    | 6,72412e+00    | 7,29526e-04 |
| 221/ 2    | 6,78926e+00    | 2,42811e-03 |
| 221/ 3    | 8,02126e+00    | 2,24109e-04 |
| 221/ 4    | 9,22917e+00    | 2,93630e-03 |
| 221/ 5    | 1,00344e+01    | 4,38630e-03 |
| 221/ 6    | 1,01112e+01    | 6,27494e-03 |
| 221/ 7    | 1,04130e+01    | 8,95996e-04 |

Anexo B.2 - Exemplo de resultados do coeficiente  $\alpha_{cr}$ .

**Member Definition - Parameters - EN 1993-1:2005/A1:2014**

Member type:

**Buckling (y axis)**

Member length ly: ☒ Real  m

☐ Coefficient

Buckling length coeff. y:   Sway

Buckling curve y:

**Buckling (z axis)**

Member length lz: ☒ Real  m

☐ Coefficient

Buckling length coeff. z:   Non-sway

Buckling curve z:

☒ Flexural-torsional buckling

**Lateral buckling parameters**

☒ Lateral buckling

Load level: 

Critical moment: ☒ Auto ☐ User

Lateral buckling curve:

Lateral buckling length coefficient

Upper flange:  Lower flange:

Mcr =  kN\*m

☐ General method [6.3.2.2]

☒ Detailed method [6.3.2.3]

☐ Simplified method for beams with lateral restraints [6.3.2.4]

**Additional sets of member parameters**

☒ Limit deflections and displacements:

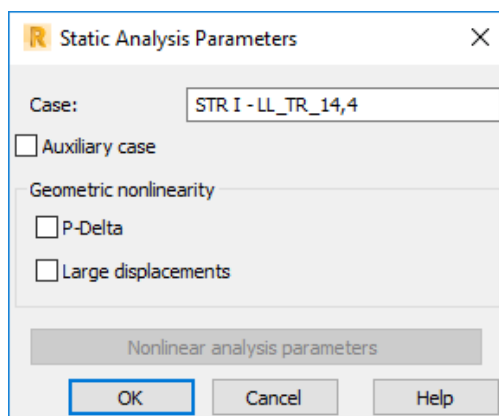
☐ Complex sections:

☐ Thin-walled sections:

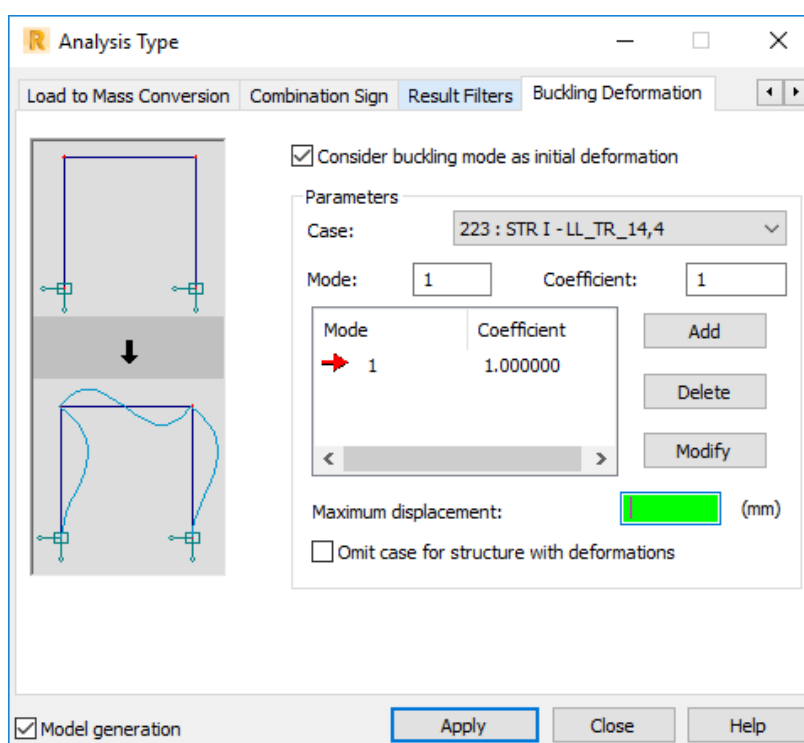
☐ Fire analysis parameters:

Buttons: Save, Close, More..., Note, Help

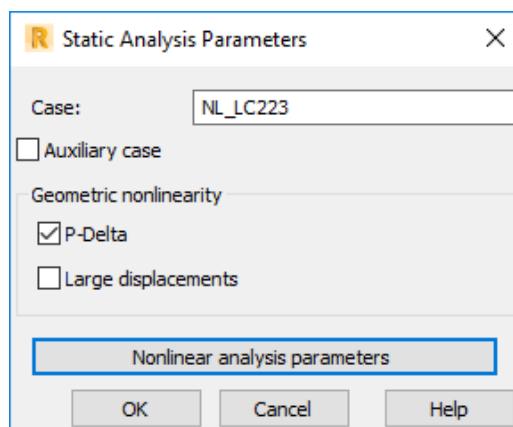
Anexo B.3 - Menu do Robot, que permite definir os parâmetros de encurvadura dos elementos.



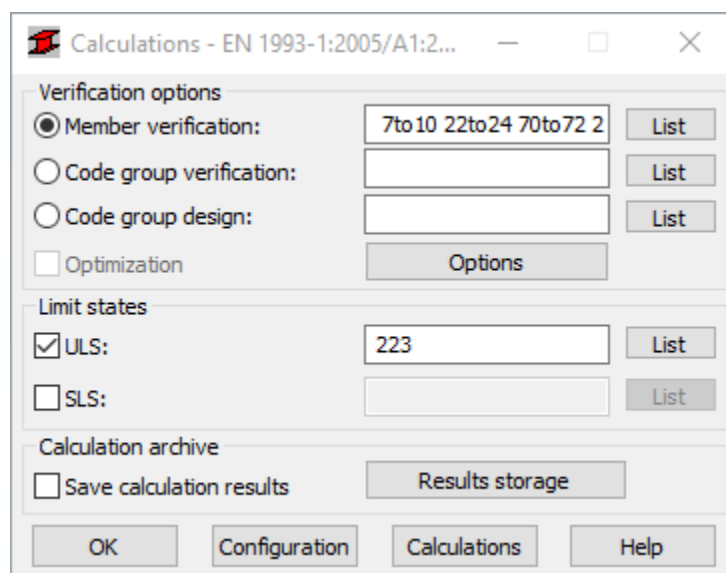
Anexo B.4 - Análise linear de 1ª ordem.



Anexo B.5 - Pré deformação da estrutura de determinado modo de encurvadura.



Anexo B.6 - Análise de 2ª ordem considerando a não linearidade geométrica.



Anexo B.7 – Verificando de estruturas metálicas usando o programa Autodesk Robot Structural Analysis Professional.

EN 1993-1:2005/A1:2014 - Member Verification ( ULS ) 7to10 22to24 70to72 27 31 32 62 900 961 1253 1279to1...

Results Messages

| Member         | Section     | Material | Lay   | Laz   | Ratio | Case                |
|----------------|-------------|----------|-------|-------|-------|---------------------|
| 7 H_SC_Ly=2,8m | H_SC_HEB 32 | S 355    | 20.26 | 18.50 | 0.50  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 8 G_SC_Ly=2,8m | G_SC_HEA 32 | S 355    | 20.62 | 18.68 | 0.15  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 9 G_SC_Ly=2,8m | G_SC_HEA 32 | S 355    | 20.62 | 18.68 | 0.32  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 10 G_SC_Ly=2,8 | G_SC_HEA 32 | S 355    | 20.62 | 18.68 | 0.25  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 22 XH_SC_Ly=2, | XH_SC_HEB 3 | S 355    | 20.26 | 18.50 | 0.81  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 23 XH_SC_Ly=2, | XH_SC_HEB 3 | S 355    | 20.26 | 18.50 | 0.82  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 24 XH_SC_Ly=2, | XH_SC_HEB 3 | S 355    | 20.26 | 18.50 | 0.83  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 27 G_SC_Ly=2,8 | G_SC_HEA 32 | S 355    | 20.62 | 18.68 | 0.35  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 31 G_SC_Ly=2,8 | G_SC_HEA 32 | S 355    | 20.62 | 18.68 | 0.39  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 32 G_SC_Ly=2,8 | G_SC_HEA 32 | S 355    | 20.62 | 18.68 | 0.47  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 62 H_SC_Ly=2,8 | H_SC_HEB 32 | S 355    | 20.26 | 18.50 | 0.49  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 70 H_SC_Ly=2,8 | H_SC_HEB 32 | S 355    | 20.26 | 18.50 | 0.57  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 71 H_SC_Ly=2,8 | H_SC_HEB 32 | S 355    | 20.26 | 18.50 | 0.60  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 72 H_SC_Ly=2,8 | H_SC_HEB 32 | S 355    | 20.26 | 18.50 | 0.67  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 900 G_SC_Ly=2, | G_SC_HEA 32 | S 355    | 20.62 | 18.68 | 0.31  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 961 G_SC_Ly=2, | G_SC_HEA 32 | S 355    | 20.62 | 18.68 | 0.24  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 1253           | H_SC_HEB 32 | S 355    | 20.26 | 18.50 | 0.64  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 1279 H_SC_Ly=2 | H_SC_HEB 32 | S 355    | 20.26 | 18.50 | 0.72  | 223 STR I - LL_TR_1 |
| 1280 H_SC_Ly=2 | H_SC_HEB 32 | S 355    | 20.26 | 18.50 | 0.72  | 223 STR I - LL_TR_1 |

Calc. Note Close Help

Ratio Analysis Map

Calculation points  
Division: n = 3  
Extremes: none  
Additional: none

Anexo B.8 - Tabela de resultados dos diferentes elementos seleccionados.

RESULTS - Code - EN 1993-1:2005/A1:2014

Bar: 1984  
Point / Coordinate: 3 / x = 1.00 L = 0.1400 m  
Load case: 223 STR I - LL\_TR\_14,4 101\*1.25+(21+1113)\*2.10+1013\*2.79

Section OK

OK

Change

Simplified results Detailed results

**FORCES**

|                                 |                                  |                                    |                                  |
|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| N <sub>Ed</sub> = 3649.933 kN   | My <sub>Ed</sub> = 2.19 kN*m     | Mz <sub>Ed</sub> = -35.46 kN*m     | Vy <sub>Ed</sub> = 4.711 kN      |
| N <sub>c,Rd</sub> = 5727.677 kN | My <sub>Ed,max</sub> = 2.83 kN*m | Mz <sub>Ed,max</sub> = -35.46 kN*m | Vy <sub>T,Rd</sub> = 2776.393 kN |
| Nb <sub>Rd</sub> = 5086.063 kN  | My <sub>c,Rd</sub> = 763.03 kN*m | Mz <sub>c,Rd</sub> = 333.39 kN*m   | Vz <sub>Ed</sub> = -4.568 kN     |
|                                 | MN <sub>y,Rd</sub> = 314.12 kN*m | MN <sub>z,Rd</sub> = 241.79 kN*m   | Vz <sub>T,Rd</sub> = 1061.052 kN |
|                                 | Mb <sub>Rd</sub> = 693.66 kN*m   |                                    | Tt <sub>Ed</sub> = -0.00 kN*m    |
|                                 |                                  |                                    | Class of section = 1             |

**LATERAL BUCKLING**

z = 1.00 Mcr = 16891.70 kN\*m Curve,LT - b XLT = 1.00  
Lcr,upp = 1.4000 m Lam<sub>LT</sub> = 0.21 f<sub>LT</sub> = 0.49 XLT<sub>mod</sub> = 1.00

**BUCKLING y**

Ly = 2.8000 m Lam<sub>y</sub> = 0.27  
Lcr,y = 2.8000 m Xy = 0.98  
Lamy = 20.26 kzy = 0.57

**BUCKLING z**

Lz = 1.4000 m Lam<sub>z</sub> = 0.24  
Lcr,z = 1.4000 m Xz = 0.98  
Lamz = 18.50 kzz = 0.99

**SECTION CHECK**

N<sub>Ed</sub>/N<sub>c,Rd</sub> = 0.64 < 1.00 (6.2.4.(1))  
Vz<sub>Ed</sub>/Vz<sub>T,Rd</sub> = 0.00 < 1.00 (6.2.6-7)

**MEMBER STABILITY CHECK**

Lamy = 20.26 < Lam<sub>max</sub> = 210.00 Lamz = 18.50 < Lam<sub>max</sub> = 210.00 STABLE  
N<sub>Ed</sub>/(Xz\*N<sub>Rk</sub>/gM1) + kzy\*My<sub>Ed,max</sub>/(XLT\*My<sub>Rk</sub>/gM1) + kzz\*Mz<sub>Ed,max</sub>/(Mz<sub>Rk</sub>/gM1) = 0.83 < 1.00 (6.3.3.(4))

Forces Detailed

Calc. Note Parameters Help

Anexo B.9 - Imagem ilustrativa dos resultados obtidos no Autodesk Robot Structural Analysis Professional.

Anexo B.10 - Menu do Robot, que permite definir os parâmetros dos elementos de madeira.

Anexo B.11 - Menu de cálculo da encurvadura local.

**Configuration**

Calculation points  
 Number of points:   
☐ Characteristic points

Calculation parameters  
 Efficiency ratio:   
☒ Maximum slenderness:   
☒ Components of complex bars are not taken into account  
☐ Calculations: fire impact

Units of results  
☐ Code ☒ Robot

Camber  
☐ Take the deflections from the following case into consideration:

Anexo B.12 - Menu de definição de duração de carga.

EN 1995-1:2004/A2:2014 - Member Verification ( ULS ) 10 282to307 309to320 322to330 5396to5443

Results Messages

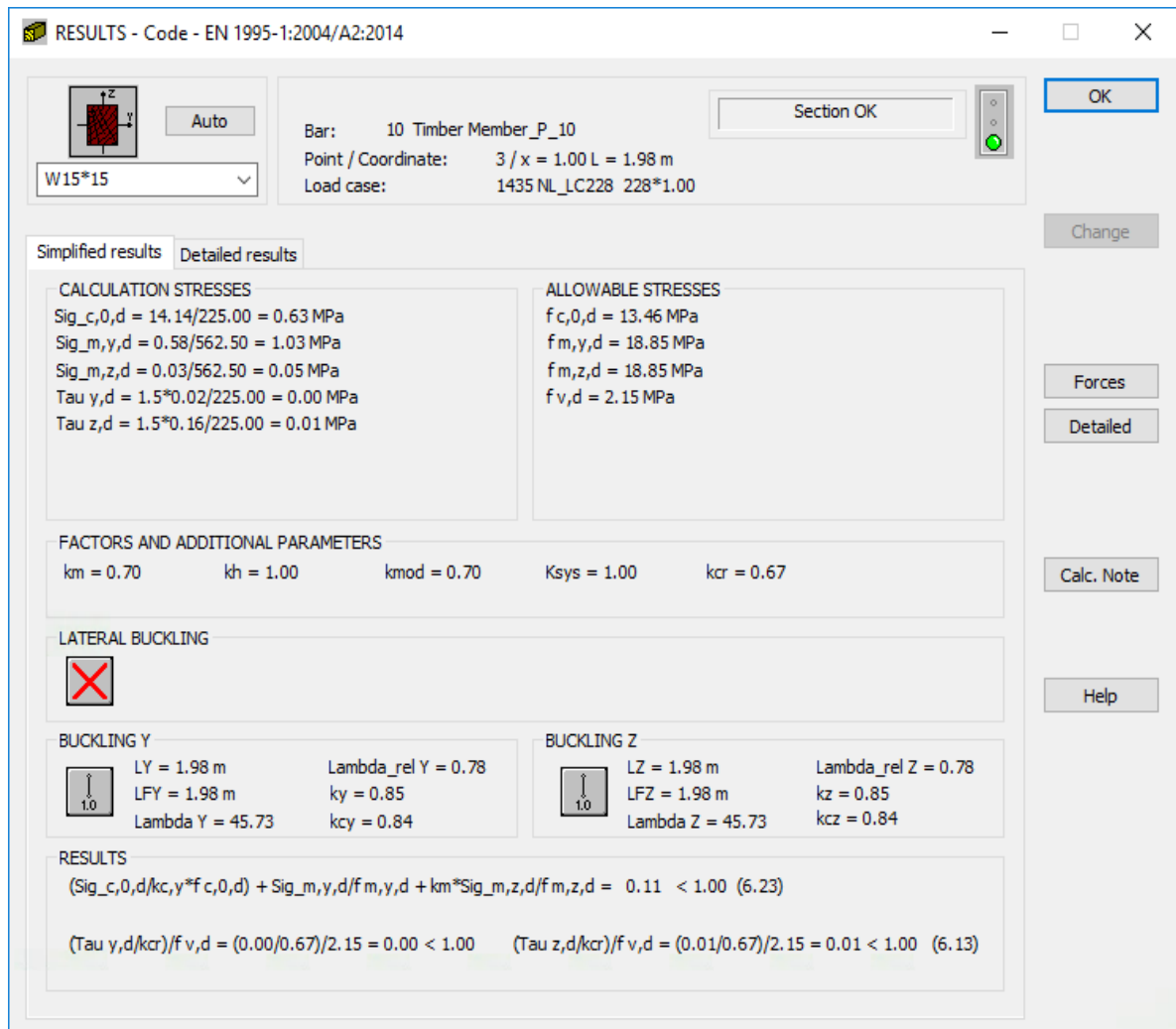
| Member          | Section   | Material | Lay   | Laz   | Ratio | Case          |
|-----------------|-----------|----------|-------|-------|-------|---------------|
| 10 Timber Membe | OK W15*15 | C35      | 45.73 | 45.73 | 0.11  | 1435 NL_LC228 |
| 282 Timber Memb | OK W15*15 | C35      | 45.73 | 45.73 | 0.13  | 1435 NL_LC228 |
| 283 Timber Memb | OK W15*15 | C35      | 45.73 | 45.73 | 0.16  | 1435 NL_LC228 |
| 284 Timber Memb | OK W15*15 | C35      | 49.19 | 49.19 | 0.12  | 1435 NL_LC228 |
| 285 Timber Memb | OK W15*15 | C35      | 45.73 | 45.73 | 0.15  | 1435 NL_LC228 |
| 286 Timber Memb | OK W15*15 | C35      | 45.73 | 45.73 | 0.16  | 1435 NL_LC228 |
| 287 Timber Memb | OK W15*15 | C35      | 45.73 | 45.73 | 0.17  | 1435 NL_LC228 |
| 288 Timber Memb | OK W15*15 | C35      | 49.19 | 49.19 | 0.10  | 1435 NL_LC228 |
| 289 Timber Memb | OK W15*15 | C35      | 45.73 | 45.73 | 0.21  | 1435 NL_LC228 |
| 290 Timber Memb | OK W15*15 | C35      | 45.73 | 45.73 | 0.21  | 1435 NL_LC228 |
| 291 Timber Memb | OK W15*15 | C35      | 45.73 | 45.73 | 0.26  | 1435 NL_LC228 |
| 292 Timber Memb | OK W15*15 | C35      | 49.19 | 49.19 | 0.09  | 1435 NL_LC228 |
| 293 Timber Memb | OK W15*15 | C35      | 45.73 | 45.73 | 0.26  | 1435 NL_LC228 |
| 294 Timber Memb | OK W15*15 | C35      | 45.73 | 45.73 | 0.25  | 1435 NL_LC228 |

Calc. Note

Ratio

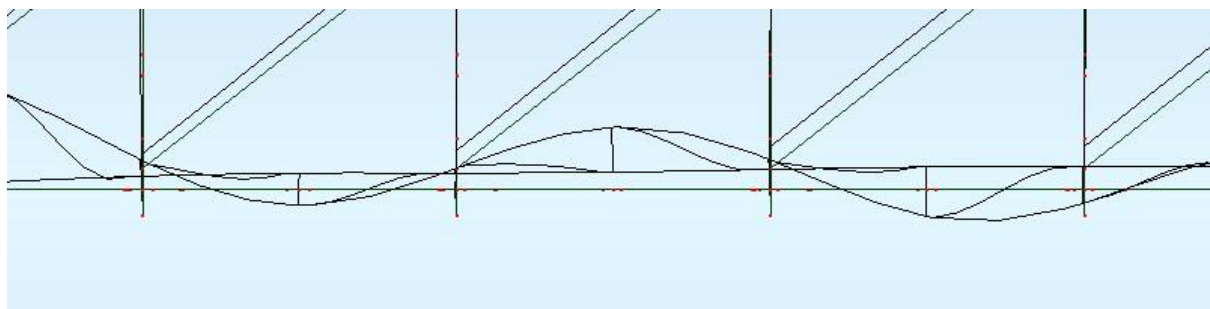
Calculation points  
 Division: n = 3  
 Extremes: none  
 Additional: none

Anexo B.13 - Tabela de resultados dos diferentes elementos de madeira selecionados.

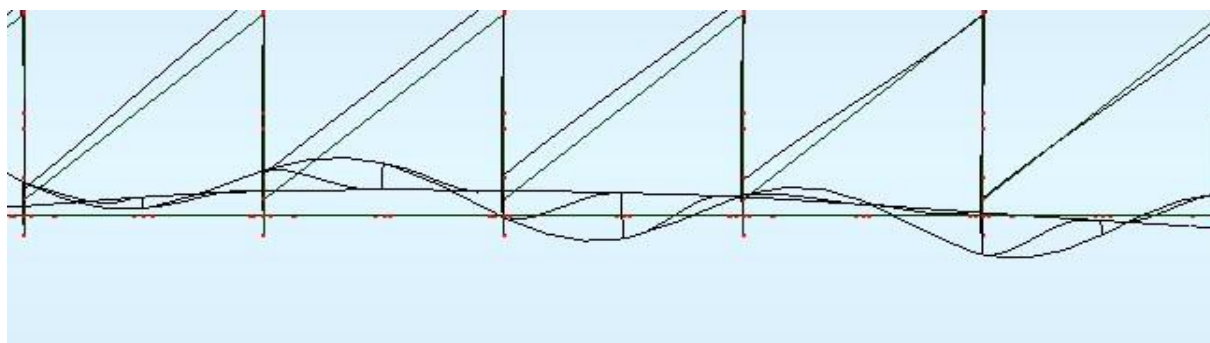


Anexo B.14- Imagem ilustrativa dos resultados obtidos no Autodesk Robot Structural Analysis Professional.

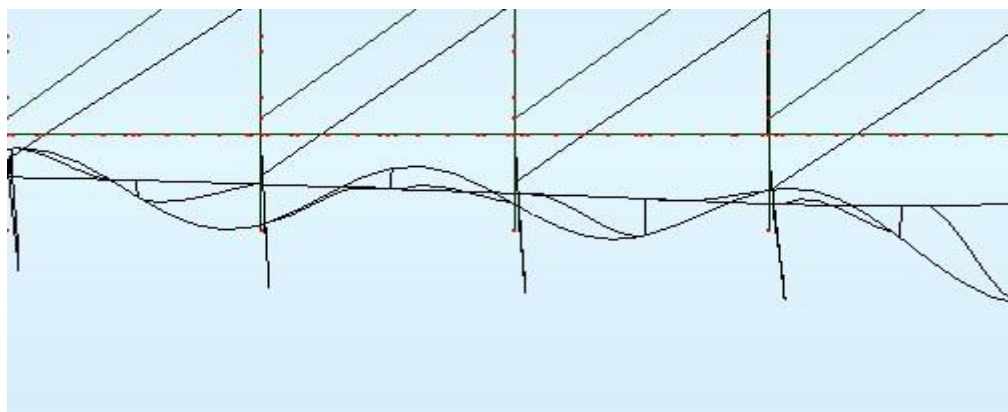
## ANEXO C: IMAGENS DOS MODOS DE ENCURVADURA DOS DIFERENTES MODELOS/SOLUÇÕES



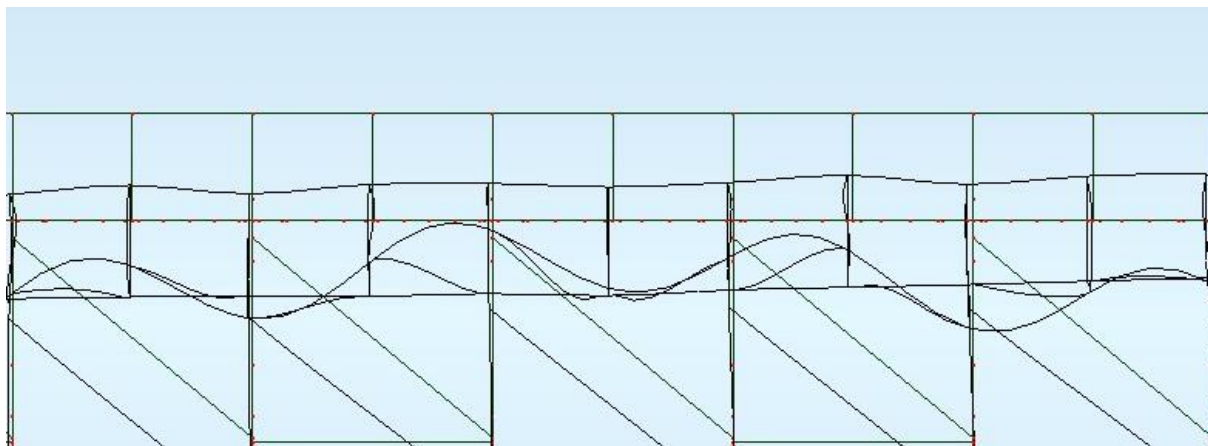
Anexo C.1 – 21.º Modo de encurvadura local do modelo V0.0 ( $\alpha_{cr} = 25,0$ ).



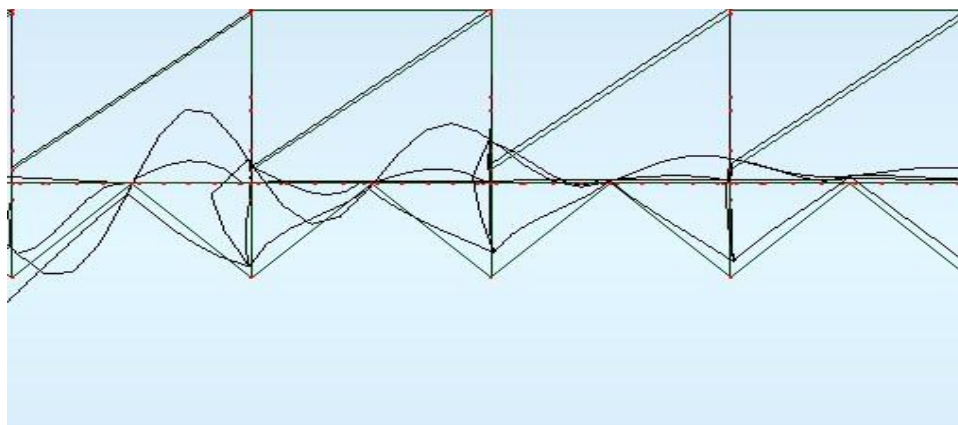
Anexo C.2 – 30.º Modo de encurvadura local do modelo V0.1 ( $\alpha_{cr} = 22,2$ ).



Anexo C.3 - Modo de encurvadura local do modelo V1.0. 17.º modo de encurvadura ( $\alpha_{cr} = 12,4$ ).



Anexo C.4 – 27.º Modo de encurvadura local do modelo V1.1 ( $\alpha_{cr} = 23,3$ ).



Anexo C.5 – 51.º Modo de encurvadura local do modelo V2.0 ( $\alpha_{cr} = 22,2$ ).

**ANEXO D: RESULTADO DAS FORÇAS EQUIVALENTES PARA OS DIFERENTES MODELOS**

Anexo D.1 – Resultado das forças equivalentes do modelo V0.0.

|      |               |               |              |
|------|---------------|---------------|--------------|
| V0.0 | $e_0(m)$      | $\alpha_{cr}$ | F. Ampl.     |
|      | 0,146         | 6,65          | 1,18         |
| x(m) | $N_{Ed}$ (kN) | $\delta_q(m)$ | $F_{EQ}(kN)$ |
| 0,0  | 15,79         | 0,002         | 0,02         |
| 1,4  | 416,13        | 0,001         | 0,64         |
| 2,8  | 854,10        | 0,004         | 1,34         |
| 4,2  | 1231,23       | 0,006         | 1,96         |
| 5,6  | 1626,51       | 0,009         | 2,62         |
| 7,0  | 1965,07       | 0,011         | 3,21         |
| 8,4  | 2329,36       | 0,013         | 3,84         |
| 9,8  | 2619,99       | 0,014         | 4,34         |
| 11,2 | 2935,18       | 0,015         | 4,88         |
| 12,6 | 3197,31       | 0,015         | 5,32         |
| 14,0 | 3456,00       | 0,015         | 5,74         |
| 15,4 | 3571,04       | 0,015         | 5,94         |
| 16,8 | 3652,48       | 0,015         | 6,09         |
| 18,2 | 3648,74       | 0,016         | 6,11         |
| 19,6 | 3600,94       | 0,017         | 6,05         |
| 21,0 | 3278,09       | 0,017         | 5,52         |
| 22,4 | 3268,55       | 0,018         | 5,52         |
| 23,8 | 2797,59       | 0,018         | 4,73         |
| 25,2 | 2784,70       | 0,017         | 4,69         |
| 26,6 | 2227,27       | 0,016         | 3,73         |
| 28,0 | 2213,26       | 0,014         | 3,67         |
| 29,4 | 1558,49       | 0,012         | 2,56         |
| 30,8 | 1544,16       | 0,009         | 2,50         |
| 32,2 | 820,85        | 0,007         | 1,31         |
| 33,6 | 805,06        | 0,004         | 1,26         |
| 35,0 | 413,08        | 0,001         | 0,64         |

|      |               |               |              |
|------|---------------|---------------|--------------|
| V0.0 | $e_0(m)$      | $\alpha_{cr}$ | F. Ampl.     |
|      | 0,146         | 6,65          | 1,18         |
| x(m) | $N_{Ed}$ (kN) | $\delta_q(m)$ | $F_{EQ}(kN)$ |
| 36,4 | 15,02         | 0,002         | 0,02         |

Anexo D.2 - Resultado das forças equivalentes do modelo V0.1.

|      |               |               |               |
|------|---------------|---------------|---------------|
| V0.1 | $e_0(m)$      | $\alpha_{cr}$ | F. Ampl.      |
|      | 0,146         | 4,19          | 1,31          |
| x(m) | $N_{Ed}$ (kN) | $\delta_q(m)$ | $F_{EQ}$ (kN) |
| 0,0  | 15,51         | 0,002         | 0,02          |
| 1,4  | 415,79        | 0,001         | 0,51          |
| 2,8  | 848,64        | 0,003         | 1,06          |
| 4,2  | 1228,45       | 0,005         | 1,57          |
| 5,6  | 1621,97       | 0,008         | 2,10          |
| 7,0  | 1963,96       | 0,010         | 2,59          |
| 8,4  | 2327,13       | 0,012         | 3,10          |
| 9,8  | 2596,88       | 0,013         | 3,49          |
| 11,2 | 2896,72       | 0,014         | 3,90          |
| 12,6 | 3142,62       | 0,013         | 4,21          |
| 14,0 | 3380,31       | 0,012         | 4,50          |
| 15,4 | 3506,74       | 0,012         | 4,68          |
| 16,8 | 3591,10       | 0,013         | 4,81          |
| 18,2 | 3597,58       | 0,014         | 4,84          |
| 19,6 | 3534,96       | 0,015         | 4,78          |
| 21,0 | 3395,03       | 0,015         | 4,62          |
| 22,4 | 3220,30       | 0,016         | 4,41          |
| 23,8 | 2997,22       | 0,017         | 4,11          |
| 25,2 | 2752,80       | 0,016         | 3,77          |
| 26,6 | 2481,49       | 0,015         | 3,37          |
| 28,0 | 2213,60       | 0,013         | 2,98          |
| 29,4 | 1881,45       | 0,011         | 2,49          |
| 30,8 | 1541,68       | 0,009         | 2,01          |

|      |               |               |               |
|------|---------------|---------------|---------------|
| V0.1 | $e_0(m)$      | $\alpha_{cr}$ | F. Ampl.      |
|      | 0,146         | 4,19          | 1,31          |
| x(m) | $N_{Ed}$ (kN) | $\delta_q(m)$ | $F_{EQ}$ (kN) |
| 32,2 | 1179,83       | 0,006         | 1,51          |
| 33,6 | 800,71        | 0,003         | 1,01          |
| 35,0 | 399,94        | 0,001         | 0,49          |
| 36,4 | 14,70         | 0,002         | 0,02          |

Anexo D.3 – Resultado das forças equivalentes do modelo V1.0.

|      |               |                |               |
|------|---------------|----------------|---------------|
| V1.0 | $e_0(m)$      | $\alpha_{cr}$  | F. Ampl.      |
|      | 0,182         | 4,77           | 1,26          |
| x(m) | $N_{Ed}$ (kN) | $\delta_q(kN)$ | $F_{EQ}$ (kN) |
| 0,0  | 13,94         | 0,002          | 0,02          |
| 1,4  | 430,75        | 0,001          | 0,67          |
| 2,8  | 851,53        | 0,002          | 1,34          |
| 4,2  | 1243,93       | 0,005          | 1,98          |
| 5,6  | 1625,96       | 0,008          | 2,62          |
| 7,0  | 1979,09       | 0,010          | 3,23          |
| 8,4  | 2339,87       | 0,013          | 3,85          |
| 9,8  | 2633,03       | 0,015          | 4,36          |
| 11,2 | 2930,93       | 0,015          | 4,87          |
| 12,6 | 3196,70       | 0,014          | 5,32          |
| 14,0 | 3431,41       | 0,014          | 5,70          |
| 15,4 | 3562,05       | 0,014          | 5,93          |
| 16,8 | 3637,31       | 0,015          | 6,07          |
| 18,2 | 3640,78       | 0,016          | 6,09          |
| 19,6 | 3585,06       | 0,016          | 6,02          |
| 21,0 | 3447,81       | 0,018          | 5,81          |
| 22,4 | 3269,87       | 0,018          | 5,52          |
| 23,8 | 3043,09       | 0,019          | 5,14          |
| 25,2 | 2795,46       | 0,018          | 4,71          |
| 26,6 | 2515,56       | 0,016          | 4,21          |

|      |                   |                       |                  |
|------|-------------------|-----------------------|------------------|
| V1.0 | $e_0(m)$<br>0,182 | $\alpha_{cr}$<br>4,77 | F. Ampl.<br>1,26 |
| x(m) | $N_{Ed}$ (kN)     | $\delta_q(kN)$        | $F_{EQ}$ (kN)    |
| 28,0 | 2238,56           | 0,014                 | 3,72             |
| 29,4 | 1895,92           | 0,012                 | 3,11             |
| 30,8 | 1559,14           | 0,009                 | 2,52             |
| 32,2 | 1194,71           | 0,005                 | 1,90             |
| 33,6 | 818,56            | 0,002                 | 1,28             |
| 35,0 | 414,30            | 0,001                 | 0,64             |
| 36,4 | 13,80             | 0,003                 | 0,02             |

Anexo D.4 - Resultado das forças equivalentes do modelo V1.1.

|      |                   |                       |                  |
|------|-------------------|-----------------------|------------------|
| V1.1 | $e_0(m)$<br>0,182 | $\alpha_{cr}$<br>4,51 | F. Ampl.<br>1,29 |
| x(m) | $N_{Ed}$ (kN)     | $\delta_q(m)$         | $F_{EQ}$ (kN)    |
| 0,0  | 32,30             | 0,002                 | 0,05             |
| 1,4  | 467,85            | 0,002                 | 0,73             |
| 2,8  | 653,90            | 0,002                 | 1,02             |
| 4,2  | 1322,55           | 0,004                 | 2,07             |
| 5,6  | 1721,77           | 0,005                 | 2,73             |
| 7,0  | 2092,68           | 0,007                 | 3,34             |
| 8,4  | 2468,56           | 0,008                 | 3,97             |
| 9,8  | 2771,31           | 0,009                 | 4,47             |
| 11,2 | 3077,18           | 0,009                 | 4,96             |
| 12,6 | 3349,53           | 0,007                 | 5,36             |
| 14,0 | 3588,26           | 0,006                 | 5,71             |
| 15,4 | 3724,85           | 0,006                 | 5,92             |
| 16,8 | 3797,13           | 0,007                 | 6,05             |
| 18,2 | 3805,86           | 0,007                 | 6,08             |
| 19,6 | 3744,81           | 0,008                 | 6,01             |
| 21,0 | 3602,45           | 0,009                 | 5,81             |
| 22,4 | 3432,43           | 0,010                 | 5,57             |

|      |               |               |               |
|------|---------------|---------------|---------------|
| V1.1 | $e_0(m)$      | $\alpha_{cr}$ | F. Ampl.      |
|      | 0,182         | 4,51          | 1,29          |
| x(m) | $N_{Ed}$ (kN) | $\delta_q(m)$ | $F_{EQ}$ (kN) |
| 23,8 | 3180,33       | 0,011         | 5,18          |
| 25,2 | 2945,67       | 0,011         | 4,80          |
| 26,6 | 2657,21       | 0,010         | 4,31          |
| 28,0 | 2368,79       | 0,009         | 3,82          |
| 29,4 | 1980,15       | 0,007         | 3,17          |
| 30,8 | 1620,53       | 0,006         | 2,57          |
| 32,2 | 1273,12       | 0,004         | 2,00          |
| 33,6 | 876,08        | 0,002         | 1,36          |
| 35,0 | 450,88        | 0,001         | 0,70          |
| 36,4 | 30,64         | 0,001         | 0,05          |

Anexo D.5 – Resultados das forças equivalentes do modelo V2.0.

|      |               |               |               |
|------|---------------|---------------|---------------|
| V2.0 | $e_0(m)$      | $\alpha_{cr}$ | F. Ampl.      |
|      | 0,182         | 4,80          | 1,26          |
| x(m) | $N_{Ed}$ (kN) | $\delta_q(m)$ | $F_{EQ}$ (kN) |
| 0,0  | 16,72         | 0,003         | 0,03          |
| 1,4  | 417,26        | 0,001         | 0,65          |
| 2,8  | 816,86        | 0,004         | 1,28          |
| 4,2  | 1220,78       | 0,008         | 1,94          |
| 5,6  | 1601,61       | 0,014         | 2,58          |
| 7,0  | 1961,50       | 0,019         | 3,20          |
| 8,4  | 2318,66       | 0,021         | 3,82          |
| 9,8  | 2602,68       | 0,020         | 4,31          |
| 11,2 | 2896,81       | 0,011         | 4,82          |
| 12,6 | 3151,00       | 0,001         | 5,24          |
| 14,0 | 3334,99       | 0,007         | 5,54          |
| 15,4 | 3485,57       | 0,011         | 5,80          |
| 16,8 | 3566,47       | 0,007         | 5,95          |
| 18,2 | 3613,57       | 0,029         | 6,05          |

|      |               |               |               |
|------|---------------|---------------|---------------|
| V2.0 | $e_0(m)$      | $\alpha_{cr}$ | F. Ampl.      |
|      | 0,182         | 4,80          | 1,26          |
| x(m) | $N_{Ed}$ (kN) | $\delta_q(m)$ | $F_{EQ}$ (kN) |
| 19,6 | 3562,64       | 0,049         | 5,98          |
| 21,0 | 3431,09       | 0,063         | 5,78          |
| 22,4 | 3259,35       | 0,051         | 5,51          |
| 23,8 | 3030,34       | 0,032         | 5,12          |
| 25,2 | 2754,08       | 0,015         | 4,64          |
| 26,6 | 2471,62       | 0,001         | 4,14          |
| 28,0 | 2197,38       | 0,001         | 3,65          |
| 29,4 | 1863,04       | 0,001         | 3,06          |
| 30,8 | 1536,61       | 0,006         | 2,49          |
| 32,2 | 1173,79       | 0,009         | 1,8           |
| 33,6 | 806,14        | 0,007         | 1,26          |
| 35,0 | 403,51        | 0,003         | 0,62          |
| 36,4 | 14,92         | 0,001         | 0,02          |

**ANEXO E: INPUTS E OUTPUTS DO PROGRAMA DE CÁLCULO**

Anexo E.1 – Parâmetros de cálculo do modelo V0.0.

| Modelo | Load Case | Buckling | $\alpha_{cr}$ | L (m) | Max. Displ. (mm) |
|--------|-----------|----------|---------------|-------|------------------|
| V0.0   | 220       | Mode 1   | 6,75          | 14,00 | 56               |
|        |           | Mode 2   | 6,81          | 10,76 | 43               |
| V0.0   | 221       | Mode 1   | 6,72          | 14,00 | 56               |
|        |           | Mode 2   | 6,79          | 10,04 | 40               |
| V0.0   | 222       | Mode 1   | 6,66          | 15,40 | 62               |
|        |           | Mode 2   | 6,75          | 9,76  | 39               |
| V0.0   | 223       | Mode 1   | 6,65          | 14,32 | 57               |
|        |           | Mode 2   | 6,74          | 9,93  | 40               |
| V0.0   | 224       | Mode 1   | 6,64          | 14,30 | 57               |
|        |           | Mode 2   | 6,70          | 9,85  | 39               |
| V0.0   | 225       | Mode 1   | 6,64          | 14,00 | 56               |
|        |           | Mode 2   | 6,70          | 9,47  | 38               |
| V0.0   | 226       | Mode 1   | 6,64          | 14,00 | 56               |
|        |           | Mode 2   | 6,75          | 10,65 | 43               |
| V0.0   | 227       | Mode 1   | 6,72          | 13,93 | 56               |
|        |           | Mode 2   | 6,85          | 10,22 | 41               |
| V0.0   | 228       | Mode 1   | 6,88          | 13,86 | 55               |
|        |           | Mode 2   | 6,99          | 11,22 | 45               |

Anexo E.2 – Parâmetros de cálculo do modelo V0.1

| Modelo | Load Case | Buckling | $\alpha_{cr}$ | L (m) | Max. Displ. (mm) |
|--------|-----------|----------|---------------|-------|------------------|
| V0.1   | 220       | Mode 1   | 4,25E         | 6,46  | 26               |
|        |           | Mode 2   | 4,30          | 6,76  | 27               |
| V0.1   | 221       | Mode 1   | 4,24          | 6,69  | 27               |
|        |           | Mode 2   | 4,28          | 6,74  | 27               |
| V0.1   | 222       | Mode 1   | 4,19          | 6,72  | 27               |
|        |           | Mode 2   | 4,26          | 6,59  | 26               |
| V0.1   | 223       | Mode 1   | 4,19          | 6,73  | 27               |
|        |           | Mode 2   | 4,25          | 6,51  | 26               |
| V0.1   | 224       | Mode 1   | 4,18          | 6,71  | 27               |
|        |           | Mode 2   | 4,24          | 6,66  | 27               |
| V0.1   | 225       | Mode 1   | 4,18          | 6,7   | 27               |
|        |           | Mode 2   | 4,24          | 6,71  | 27               |
| V0.1   | 226       | Mode 1   | 4,20          | 6,66  | 27               |
|        |           | Mode 2   | 4,25          | 6,67  | 27               |
| V0.1   | 227       | Mode 1   | 4,24          | 6,66  | 27               |
|        |           | Mode 2   | 4,31          | 6,69  | 27               |
| V0.1   | 228       | Mode 1   | 4,34          | 6,61  | 26               |
|        |           | Mode 2   | 4,40          | 6,69  | 27               |

Anexo E.3 – Parâmetros de cálculo do modelo V1.0.

| Modelo | Load Case | Buckling | $\alpha_{cr}$ | L (m) | Max. Displ. (mm) |
|--------|-----------|----------|---------------|-------|------------------|
| V1.0   | 220       | Mode 1   | 4,84          | 5,55  | 28               |
|        |           | Mode 2   | 4,86          | 5,47  | 27               |
| V1.0   | 221       | Mode 1   | 4,82          | 5,56  | 28               |
|        |           | Mode 2   | 4,84          | 5,53  | 28               |
| V1.0   | 222       | Mode 1   | 4,78          | 5,60  | 28               |
|        |           | Mode 2   | 4,81          | 5,56  | 28               |
| V1.0   | 223       | Mode 1   | 4,77          | 5,64  | 28               |
|        |           | Mode 2   | 4,80          | 5,48  | 27               |
| V1.0   | 224       | Mode 1   | 4,76          | 5,55  | 28               |
|        |           | Mode 2   | 4,78          | 5,51  | 28               |
| V1.0   | 225       | Mode 1   | 4,76          | 5,56  | 28               |
|        |           | Mode 2   | 4,78          | 5,47  | 27               |
| V1.0   | 226       | Mode 1   | 4,77          | 5,62  | 28               |
|        |           | Mode 2   | 4,81          | 5,49  | 27               |
| V1.0   | 227       | Mode 1   | 4,83          | 5,65  | 28               |
|        |           | Mode 2   | 4,88          | 5,44  | 27               |
| V1.0   | 228       | Mode 1   | 4,94          | 5,58  | 28               |
|        |           | Mode 2   | 4,98          | 5,57  | 28               |

Anexo E.4 – Parâmetros de cálculo do modelo V1.1.

| Modelo | Load Case | Buckling | $\alpha_{cr}$ | L (m) | Max. Displ. (mm) |
|--------|-----------|----------|---------------|-------|------------------|
| V1.1   | 220       | Mode 1   | 4,57          | 6,33  | 32               |
|        |           | Mode 2   | 4,60          | 6,31  | 32               |
| V1.1   | 221       | Mode 1   | 4,56          | 6,32  | 32               |
|        |           | Mode 2   | 4,59          | 6,37  | 32               |
| V1.1   | 222       | Mode 1   | 4,51          | 6,37  | 32               |
|        |           | Mode 2   | 4,56          | 6,29  | 31               |
| V1.1   | 223       | Mode 1   | 4,51          | 6,38  | 32               |
|        |           | Mode 2   | 4,55          | 6,32  | 32               |
| V1.1   | 224       | Mode 1   | 4,49          | 6,32  | 32               |
|        |           | Mode 2   | 4,53          | 6,33  | 32               |
| V1.1   | 225       | Mode 1   | 4,49          | 6,33  | 32               |
|        |           | Mode 2   | 4,53          | 6,38  | 32               |
| V1.1   | 226       | Mode 1   | 4,51          | 6,33  | 32               |
|        |           | Mode 2   | 4,55          | 6,25  | 31               |
| V1.1   | 227       | Mode 1   | 4,56          | 6,34  | 32               |
|        |           | Mode 2   | 4,62          | 6,30  | 32               |
| V1.1   | 228       | Mode 1   | 4,68          | 6,31  | 32               |
|        |           | Mode 2   | 4,71          | 6,38  | 32               |

Anexo E.5 – Parâmetros de cálculo do modelo V2.0.

| Modelo | Load Case | Buckling | $\alpha_{cr}$ | L (m) | Max. Displ. (mm) |
|--------|-----------|----------|---------------|-------|------------------|
| V2.0   | 220       | Mode 1   | 4,87          | 7,30  | 37               |
|        |           | Mode 2   | 4,92          | 7,66  | 38               |
| V2.0   | 221       | Mode 1   | 4,86          | 7,43  | 37               |
|        |           | Mode 2   | 4,90          | 7,4   | 37               |
| V2.0   | 222       | Mode 1   | 4,81          | 7,39  | 37               |
|        |           | Mode 2   | 4,87          | 7,04  | 35               |
| V2.0   | 223       | Mode 1   | 4,80          | 7,38  | 37               |
|        |           | Mode 2   | 4,86          | 7,39  | 37               |
| V2.0   | 224       | Mode 1   | 4,79          | 7,39  | 37               |
|        |           | Mode 2   | 4,84          | 7,46  | 37               |
| V2.0   | 225       | Mode 1   | 4,79          | 7,37  | 37               |
|        |           | Mode 2   | 4,84          | 7,44  | 37               |
| V2.0   | 226       | Mode 1   | 4,81          | 7,28  | 36               |
|        |           | Mode 2   | 4,86          | 7,06  | 35               |
| V2.0   | 227       | Mode 1   | 4,86          | 7,27  | 36               |
|        |           | Mode 2   | 4,93          | 7,12  | 36               |
| V2.0   | 228       | Mode 1   | 4,98          | 7,17  | 36               |
|        |           | Mode 2   | 5,04          | 7,65  | 38               |



Anexo E.6 – Resultados da análise dos elementos da corda superior do modelo V0.0.

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |          |            |               |                                     |                  |                      |                                |       |  |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|--------------------------------|-------|--|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplif<br>icaçã<br>o | Ratio |  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 220 / 1984 |               |                                     | 3655,82          | 24,72                |                                | 0,89  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 2,8               | 1,4               | 1        | 56                     | 0,98       | 0,98     | 220 / 1984 | 6,75          | 1,17                                | 3600,74          | 75,02                | 88,06                          | 0,92  |  |
|            | 2ªOrdem NL            | 320        |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 220 / 1984 |               |                                     | 3683,62          | 28,46                |                                | 0,90  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 56                     | 0,98       | 0,98     | 220 / 1984 |               |                                     | 3620,38          | 88,99                |                                | 0,93  |  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 220 / 1984 |               |                                     | 3655,82          | 24,72                |                                | 0,89  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 2,8               | 1,4               | 2        | 43                     | 0,98       | 0,98     | 220 / 1984 | 6,80          | 1,17                                | 3641,64          | 34,16                | 40,04                          | 0,90  |  |
|            | 2ªOrdem NL            | 320        |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 220 / 1984 |               |                                     | 3683,62          | 28,46                |                                | 0,90  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 43                     | 0,98       | 0,98     | 220 / 1984 |               |                                     | 3667,52          | 41,06                |                                | 0,90  |  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 221 / 1984 |               |                                     | 3655,26          | 17,05                |                                | 0,87  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 2,8               | 1,4               | 1        | 56                     | 0,98       | 0,98     | 221 / 1984 | 6,72          | 1,17                                | 3600,29          | 67,66                | 79,48                          | 0,90  |  |
|            | 2ªOrdem NL            | 320        |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 221 / 1984 |               |                                     | 3682,88          | 19,16                |                                | 0,88  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 56                     | 0,98       | 0,98     | 221 / 1984 |               |                                     | 3619,28          | 79,94                |                                | 0,91  |  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 221 / 1984 |               |                                     | 3655,26          | 17,05                |                                | 0,87  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 2,8               | 1,4               | 2        | 40                     | 0,98       | 0,98     | 221 / 1984 | 6,78          | 1,17                                | 3651,67          | 12,62                | 14,80                          | 0,87  |  |
|            | 2ªOrdem NL            | 320        |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 221 / 1984 |               |                                     | 3682,88          | 19,16                |                                | 0,88  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 40                     | 0,98       | 0,98     | 221 / 1984 |               |                                     | 3687,58          | 14,73                |                                | 0,87  |  |
| V0.0       | 1ª Ordem              | HEB        | 2,8               | 1,4               | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 222 / 1367 | 6,65          | 1,18                                | 3482,91          | 22,94                | 66,35                          | 0,84  |  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        |          | Resultados |            |               |                                     |                  |                      |                                |       |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|----------|------------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|--------------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$ | $\chi_z$   | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplif<br>icaçã<br>o | Ratio |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | 320        |                   |                   | 1        | 62                     | 0,98     | 0,98       | 222 / 1984 |               |                                     | 3593,79          | 56,38                |                                | 0,87  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98       | 222 / 1367 |               |                                     | 3507,88          | 25,90                |                                | 0,85  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 62                     | 0,98     | 0,98       | 222 / 1984 |               |                                     | 3612,43          | 66,74                |                                | 0,88  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98       | 222 / 1367 |               |                                     | 3482,91          | 22,94                |                                | 0,84  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>320 | 2,8               | 1,4               | 2        | 39                     | 0,98     | 0,98       | 222 / 1393 | 6,75          | 1,17                                | 3604,05          | -46,56               | -54,66                         | 0,86  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98       | 222 / 1367 |               |                                     | 3507,88          | 25,90                |                                | 0,85  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 39                     | 0,98     | 0,98       | 222 / 1393 |               |                                     | 3632,89          | -55,67               |                                | 0,87  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98       | 223 / 1984 |               |                                     | 3649,93          | 2,19                 |                                | 0,83  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 1        | 57                     | 0,98     | 0,98       | 223 / 1984 |               |                                     | 3594,70          | 50,42                |                                | 0,86  |
|            | 2ªOrdem NL            | HEB<br>320 | 2,8               | 1,4               | --       | --                     | 0,98     | 0,98       | 223 / 1984 | 6,65          | 1,18                                | 3677,30          | 2,66                 | 59,34                          | 0,84  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 57                     | 0,98     | 0,98       | 223 / 1984 |               |                                     | 3614,01          | 59,40                |                                | 0,87  |
|            | Análise Equivalente   |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98       | 223 / 1984 |               |                                     | 3649,92          | 2,92                 |                                | 0,83  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98       | 223 / 1984 |               |                                     | 3649,93          | 2,19                 |                                | 0,83  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>320 | 2,8               | 1,4               | 2        | 40                     | 0,98     | 0,98       | 223 / 1986 | 6,74          | 1,17                                | 3583,56          | 52,83                | 62,04                          | 0,87  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98       | 223 / 1984 |               |                                     | 3677,30          | 2,66                 |                                | 0,84  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 40                     | 0,98     | 0,98       | 223 / 1986 |               |                                     | 3609,41          | 61,34                |                                | 0,88  |
| V0.0       | 1ª Ordem              | HEB<br>320 | 2,8               | 1,4               | --       | --                     | 0,98     | 0,98       | 224 / 1986 | 6,63          | 1,18                                | 3675,29          | 20,79                | 69,80                          | 0,88  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 1        | 57                     | 0,98     | 0,98       | 224 / 1986 |               |                                     | 3620,35          | 59,28                |                                | 0,90  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        |          |          | Resultados |               |                                     |                  |                      |                                |       |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|----------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|--------------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$ | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplif<br>icaçã<br>o | Ratio |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98     | 224 / 1986 |               |                                     | 3703,29          | 23,81                |                                | 0,89  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 57                     | 0,98     | 0,98     | 224 / 1986 |               |                                     | 3640,24          | 70,01                |                                | 0,91  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98     | 224 / 1986 |               |                                     | 3675,29          | 20,79                |                                | 0,88  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>320 | 2,8               | 1,4               | 2        | 39                     | 0,98     | 0,98     | 224 / 1986 | 6,70          | 1,18                                | 3638,10          | 47,45                | 55,77                          | 0,90  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98     | 224 / 1986 |               |                                     | 3703,29          | 23,81                |                                | 0,89  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 39                     | 0,98     | 0,98     | 224 / 1986 |               |                                     | 3659,13          | 56,18                |                                | 0,91  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98     | 225 / 1986 |               |                                     | 3673,55          | 19,32                |                                | 0,88  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>320 | 2,8               | 1,4               | 1        | 56                     | 0,98     | 0,98     | 225 / 1986 | 6,63          | 1,18                                | 3619,62          | 58,78                | 69,20                          | 0,90  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98     | 225 / 1986 |               |                                     | 3701,47          | 22,01                |                                | 0,89  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 56                     | 0,98     | 0,98     | 225 / 1986 |               |                                     | 3639,25          | 69,37                |                                | 0,91  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98     | 225 / 1986 |               |                                     | 3673,55          | 19,32                |                                | 0,88  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>320 | 2,8               | 1,4               | 2        | 38                     | 0,98     | 0,98     | 225 / 1986 | 6,70          | 1,18                                | 3660,92          | 58,05                | 68,23                          | 0,91  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98     | 225 / 1986 |               |                                     | 3701,47          | 22,01                |                                | 0,89  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 38                     | 0,98     | 0,98     | 225 / 1986 |               |                                     | 3687,81          | 69,65                |                                | 0,92  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98     | 226 / 1984 |               |                                     | 3621,56          | 25,17                |                                | 0,88  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>320 | 2,8               | 1,4               | 1        | 56                     | 0,98     | 0,98     | 226 / 1986 | 6,64          | 1,18                                | 3703,04          | -56,54               | -66,56                         | 0,89  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98     | 226 / 1984 |               |                                     | 3648,81          | 28,08                |                                | 0,89  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 56                     | 0,98     | 0,98     | 226 / 1986 |               |                                     | 3740,10          | -68,38               |                                | 0,91  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |          |            |               |                                     |                  |                      |                                |       |  |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|--------------------------------|-------|--|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplif<br>icaçã<br>o | Ratio |  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 226 / 1984 |               |                                     | 3621,56          | 25,17                |                                | 0,88  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 2,8               | 1,4               | 2        | 43                     | 0,98       | 0,98     | 226 / 1984 | 6,75          | 1,17                                | 3591,18          | 77,42                | 90,88                          | 0,92  |  |
|            | 2ªOrdem NL            | 320        |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 226 / 1984 |               |                                     | 3648,81          | 28,08                |                                | 0,89  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 43                     | 0,98       | 0,98     | 226 / 1984 |               |                                     | 3612,96          | 90,64                |                                | 0,93  |  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 227 / 2235 |               |                                     | 3519,39          | 24,22                |                                | 0,85  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 2,8               | 1,4               | 1        | 56                     | 0,98       | 0,98     | 227 / 1986 | 6,72          | 1,17                                | 3670,01          | -52,48               | -61,65                         | 0,88  |  |
|            | 2ªOrdem NL            | 320        |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 227 / 2235 |               |                                     | 3545,43          | 28,18                |                                | 0,86  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 56                     | 0,98       | 0,98     | 227 / 1986 |               |                                     | 3704,97          | -63,64               |                                | 0,90  |  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 227 / 2235 |               |                                     | 3519,39          | 24,22                |                                | 0,85  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 2,8               | 1,4               | 2        | 41                     | 0,98       | 0,98     | 227 / 2235 | 6,85          | 1,17                                | 3514,02          | 75,46                | 88,36                          | 0,89  |  |
|            | 2ªOrdem NL            | 320        |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 227 / 2235 |               |                                     | 3545,43          | 28,18                |                                | 0,86  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 41                     | 0,98       | 0,98     | 227 / 2235 |               |                                     | 3539,91          | 90,47                |                                | 0,91  |  |
| V0.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 228 / 1986 |               |                                     | 3566,41          | 21,77                |                                | 0,86  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 2,8               | 1,4               | 1        | 55                     | 0,98       | 0,98     | 228 / 1986 | 6,87          | 1,17                                | 3615,53          | -23,25               | -27,21                         | 0,88  |  |
|            | 2ªOrdem NL            | 320        |                   |                   | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 228 / 1986 |               |                                     | 3591,06          | 24,42                |                                | 0,87  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 55                     | 0,98       | 0,98     | 228 / 1986 |               |                                     |                  | -29,14               |                                | 0,89  |  |
| V0.0       | 1ª Ordem              | HEB        | 2,8               | 1,4               | --       | --                     | 0,98       | 0,98     | 228 / 1986 | 6,98          | 1,17                                | 3566,41          | 21,77                | 62,06                          | 0,86  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | 320        |                   |                   | 2        | 45                     | 0,98       | 0,98     | 228 / 1986 |               |                                     | 3540,47          | 53,18                |                                | 0,88  |  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        |          |          | Resultados |               |                                     |                  |                      |                                |       |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|----------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|--------------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$ | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplif<br>icaçã<br>o | Ratio |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 0,98     | 0,98     | 228 / 1986 |               |                                     | 3591,06          | 24,42                |                                | 0,87  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 45                     | 0,98     | 0,98     | 228 / 1986 |               |                                     | 3560,69          | 61,55                |                                | 0,89  |

Anexo E.7 – Resultados da análise dos elementos da corda superior do modelo V0.1.

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |          |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |  |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|--|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |  |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 220 / 1984 |               |                                     | 3580,95          | 21,60                |                            | 0,83  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>450 | 1,4               | 2,8               | 1        | 25                     | 1          | 0,88     | 220 / 23   | 4,24          | 1,31                                | 3531,10          | -45,82               | -59,92                     | 0,86  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 220 / 1984 |               |                                     | 3607,31          | 27,44                |                            | 0,85  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 25                     | 1          | 0,88     | 220 / 23   |               |                                     | 3560,52          | -60,97               |                            | 0,92  |  |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 220 / 1984 |               |                                     | 3580,95          | 21,60                |                            | 0,83  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>450 | 1,4               | 2,8               | 2        | 27                     | 1          | 0,88     | 220 / 1395 | 4,30          | 1,30                                | 3569,72          | 55,65                | 72,51                      | 0,93  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 220 / 1984 |               |                                     | 3607,31          | 27,44                |                            | 0,85  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 27                     | 1          | 0,88     | 220 / 1394 |               |                                     | 3534,48          | 72,25                |                            | 0,98  |  |
| V0.1       | 1ª Ordem              | HEB<br>450 | 1,4               | 2,8               | --       | --                     | 1          | 0,88     | 221 / 1984 |               |                                     | 3585,15          | 13,83                | -57,86                     | 0,80  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 1        | 27                     | 1          | 0,88     | 221 / 23   | 4,24          | 1,31                                | 3553,21          | -44,20               |                            | 0,86  |  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |            |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |         |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|------------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|---------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$   | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |         |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88       | 221 / 1984 |               |                                     | 3611,44          | 17,59                |                            | 0,82  |         |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 27                     | 1          | 0,88       | 221 / 23   |               |                                     | 3582,87          | -59,38               |                            | 0,91  |         |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88       | 221 / 1984 |               |                                     | 3585,15          | 13,83                |                            | 0,80  |         |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 2,8               | 2        | 27                     | 1          | 0,88       | 221 / 1394 | 4,28          | 1,30                                | 3512,74          | 54,32                | 70,86                      | 0,92  |         |
|            | 2ªOrdem NL            | 450        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88       | 221 / 1984 |               |                                     | 3611,44          | 17,59                |                            |       | 0,82    |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling | 2          |                   |                   | 27       | 1                      | 0,88       | 221 / 1394 | 3535,39    |               |                                     | 74,28            | 0,98                 |                            |       |         |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88       | 222 / 1984 |               |                                     |                  |                      |                            |       | 3527,15 |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 2,8               | 1        | 27                     | 1          | 0,88       | 222 / 22   | 4,19          | 1,31                                | 3595,88          | -44,51               | -58,45                     | 0,87  |         |
|            | 2ªOrdem NL            | 450        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88       | 222 / 1393 |               |                                     | 3552,24          | 24,98                |                            |       | 0,83    |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling | 1          |                   |                   | 27       | 1                      | 0,88       | 222 / 22   | 3625,68    |               |                                     | -60,86           | 0,92                 |                            |       |         |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88       | 222 / 1984 |               |                                     |                  |                      |                            |       | 3527,15 |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 2,8               | 2        | 26                     | 1          | 0,88       | 222 / 1394 | 4,26          | 1,31                                | 3537,98          | -37,31               | -48,76                     | 0,86  |         |
|            | 2ªOrdem NL            | 450        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88       | 222 / 1393 |               |                                     | 3552,24          | 24,98                |                            |       | 0,83    |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling | 2          |                   |                   | 26       | 1                      | 0,88       | 222 / 1394 | 3565,69    |               |                                     | -48,80           | 0,91                 |                            |       |         |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88       | 223 / 1984 |               |                                     |                  |                      |                            |       | 3506,74 |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 2,8               | 1        | 27                     | 1          | 0,88       | 223 / 22   | 4,19          | 1,31                                | 3609,22          | -42,06               | -55,24                     | 0,87  |         |
|            | 2ªOrdem NL            | 450        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88       | 223 / 1393 |               |                                     | 3531,81          | 16,97                |                            |       | 0,79    |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling | 1          |                   |                   | 27       | 1                      | 0,88       | 223 / 22   | 3638,88    |               |                                     | -56,93           | 0,92                 |                            |       |         |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        |          | Resultados |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|----------|------------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$ | $\chi_z$   | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |
|            | Análise Equivalente   |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,88       | 223 / 1393 |               |                                     | 3506,74          | 15,63                |                            | 0,78  |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,88       | 223 / 1984 |               |                                     | 3506,74          | 14,27                |                            | 0,78  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>450 | 1,4               | 2,8               | 2        | 26                     | 1        | 0,88       | 223 / 1620 | 4,25          | 1,31                                | 3528,36          | -43,41               | -56,75                     | 0,87  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,88       | 223 / 22   |               |                                     | 3531,81          | 16,97                |                            | 0,79  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 26                     | 1        | 0,88       | 223 / 1620 |               |                                     | 3553,12          | -57,76               |                            | 0,92  |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,88       | 224 / 24   |               |                                     | 3598,94          | 18,13                |                            | 0,83  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>450 | 1,4               | 2,8               | 1        | 27                     | 1        | 0,88       | 224 / 22   | 4,18          | 1,31                                | 3639,02          | -38,27               | -50,31                     | 0,87  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,88       | 224 / 24   |               |                                     | 3625,60          | 23,13                |                            | 0,85  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 27                     | 1        | 0,88       | 224 / 22   |               |                                     | 3668,33          | -51,17               |                            | 0,91  |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,88       | 224 / 24   |               |                                     | 3598,94          | 18,13                |                            | 0,83  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>450 | 1,4               | 2,8               | 2        | 27                     | 1        | 0,88       | 224 / 1620 | 4,24          | 1,31                                | 3588,58          | -52,17               | -68,28                     | 0,92  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,88       | 224 / 24   |               |                                     | 3625,60          | 23,13                |                            | 0,85  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 27                     | 1        | 0,88       | 224 / 1620 |               |                                     | 3613,25          | -71,64               |                            | 0,99  |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,88       | 225 / 24   |               |                                     | 3598,33          | 16,6                 |                            | 0,82  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>450 | 1,4               | 2,8               | 1        | 27                     | 1        | 0,88       | 225 / 22   | 4,18          | 1,31                                | 3637,56          | -36,46               | -47,92                     | 0,86  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,88       | 225 / 24   |               |                                     | 3624,96          | 20,9                 |                            | 0,84  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 27                     | 1        | 0,88       | 225 / 22   |               |                                     | 3666,93          | -49,81               |                            | 0,91  |
| V0.1       | 1ª Ordem              | HEB        | 1,4               | 2,8               | --       | --                     | 1        | 0,88       | 225 / 24   | 4,24          | 1,31                                | 3598,33          | 16,6                 | -67,69                     | 0,82  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |          |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |  |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|--|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | 450        |                   |                   | 2        | 27                     | 1          | 0,88     | 225 / 1620 |               |                                     | 3588,41          | -51,72               |                            | 0,92  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 225 / 24   |               |                                     | 3624,96          | 20,9                 |                            | 0,84  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 27                     | 1          | 0,88     | 225 / 1620 |               |                                     | 3612,85          | -70,9                |                            | 0,99  |  |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 226 / 2234 |               |                                     | 3549,39          | 22,41                |                            | 0,84  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>450 | 1,4               | 2,8               | 1        | 27                     | 1          | 0,88     | 226 / 23   | 4,20          | 1,31                                | 3618,44          | -39,18               | -51,44                     | 0,87  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 226 / 2234 |               |                                     | 3575,30          | 28,28                |                            | 0,86  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 27                     | 1          | 0,88     | 226 / 23   |               |                                     | 3647,97          | -51,75               |                            | 0,92  |  |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 226 / 2234 |               |                                     | 3549,39          | 22,41                |                            | 0,84  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>450 | 1,4               | 2,8               | 2        | 27                     | 1          | 0,88     | 226 / 1619 | 4,25          | 1,31                                | 3493,84          | -43,79               | -57,25                     | 0,86  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 226 / 2234 |               |                                     | 3575,30          | 28,28                |                            | 0,86  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 27                     | 1          | 0,88     | 226 / 1619 |               |                                     | 3518,50          | -57,16               |                            | 0,91  |  |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 227 / 2235 |               |                                     | 3435,67          | -20,97               |                            | 0,82  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>450 | 1,4               | 2,8               | 1        | 27                     | 1          | 0,88     | 227 / 1893 | 4,24          | 1,31                                | 3436,85          | -39,45               | -51,62                     | 0,86  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 227 / 2235 |               |                                     | 3460,31          | -26,76               |                            | 0,84  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 27                     | 1          | 0,88     | 227 / 1893 |               |                                     | 3463,40          | -54,01               |                            | 0,91  |  |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 227 / 2235 |               |                                     | 3435,67          | -20,97               |                            | 0,82  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>450 | 1,4               | 2,8               | 2        | 27                     | 1          | 0,88     | 227 / 1618 | 4,31          | 1,30                                | 3511,94          | -56,65               | -73,74                     | 0,93  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 227 / 2235 |               |                                     | 3460,31          | -26,76               |                            | 0,84  |  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |          |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |  |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|--|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   |          |                        | 1          | 0,88     | 227 / 1618 |               |                                     | 3536,30          | -77,58               |                            | 1,00  |  |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 228 / 24   |               |                                     | 3491,43          | 20,10                |                            | 0,80  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 2,8               | 1        | 26                     | 1          | 0,88     | 228 / 2356 | 4,34          | 1,30                                | 2497,09          | 24,22                | 31,48                      | 0,86  |  |
|            | 2ªOrdem NL            | 450        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 228 / 1986 |               |                                     | 3519,16          | 25,10                |                            | 0,82  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 26                     | 1          | 0,88     | 228 / 2356 |               |                                     | 2513,18          | 32,00                |                            | 0,90  |  |
| V0.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 228 / 24   |               |                                     | 3491,43          | 20,10                |                            | 0,80  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 2,8               | 2        | 27                     | 1          | 0,88     | 228 / 1620 | 4,40          | 1,29                                | 3484,70          | -52,5                | -67,94                     | 0,90  |  |
|            | 2ªOrdem NL            | 450        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,88     | 228 / 1986 |               |                                     | 3519,16          | 25,10                |                            | 0,82  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 27                     | 1          | 0,88     | 228 / 1619 |               |                                     | 3474,03          | -71,92               |                            | 0,96  |  |

Anexo E.8 – Resultados da análise dos elementos da corda superior do modelo V1.0.

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |          |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |
| V1.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87     | 220 / 1984 |               |                                     | 3633,88          | 25,92                |                            | 0,83  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 2,6               | 1        | 28                     | 1          | 0,87     | 220 / 152  | 4,84          | 1,26                                | 2585,36          | -38,18               | -48,12                     | 0,83  |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87     | 220 / 1984 |               |                                     | 3660,41          | 28,53                |                            | 0,84  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 28                     | 1          | 0,87     | 220 / 152  |               |                                     | 3615,34          | -49,33               |                            | 0,86  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        |          | Resultados |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|----------|------------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$ | $\chi_z$   | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |
| V1.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,87       | 220 / 1984 |               |                                     | 3633,88          | 25,92                |                            | 0,83  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>340 | 1,4               | 2,6               | 2        | 27                     | 1        | 0,87       | 220 / 161  | 4,85          | 1,26                                | 3630,97          | 59,12                | 74,44                      | 0,90  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,87       | 220 / 1984 |               |                                     | 3660,41          | 28,53                |                            | 0,84  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 27                     | 1        | 0,87       | 220 / 161  |               |                                     | 3657,35          | 74,90                |                            | 0,94  |
| V1.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,87       | 221 / 1984 |               |                                     | 3637,32          | 14,92                |                            | 0,80  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>340 | 1,4               | 2,6               | 1        | 28                     | 1        | 0,87       | 221 / 152  | 4,82          | 1,26                                | 3603,23          | -37,11               | -46,82                     | 0,83  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,87       | 221 / 1984 |               |                                     | 3664,01          | 16,17                |                            | 0,81  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 28                     | 1        | 0,87       | 221 / 152  |               |                                     | 3633,19          | -48,46               |                            | 0,87  |
| V1.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,87       | 221 / 1984 |               |                                     | 3637,32          | 14,92                |                            | 0,80  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>340 | 1,4               | 2,6               | 2        | 28                     | 1        | 0,87       | 221 / 159  | 4,84          | 1,26                                | 3587,20          | -44,08               | -55,55                     | 0,85  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,87       | 221 / 1984 |               |                                     | 3664,01          | 16,17                |                            | 0,81  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 28                     | 1        | 0,87       | 221 / 159  |               |                                     | 3615,36          | -56,26               |                            | 0,89  |
| V1.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,87       | 222 / 157  |               |                                     | 3585,28          | 25,16                |                            | 0,82  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>340 | 1,4               | 2,6               | 1        | 28                     | 1        | 0,87       | 222 / 150  | 4,77          | 1,26                                | 3641,21          | -44,25               | -55,96                     | 0,86  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,87       | 222 / 157  |               |                                     | 3611,15          | 28,08                |                            | 0,83  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 28                     | 1        | 0,87       | 222 / 151  |               |                                     | 3671,35          | -57,64               |                            | 0,90  |
| V1.0       | 1ª Ordem              | HEB<br>340 | 1,4               | 2,6               | --       | --                     | 1        | 0,87       | 222 / 157  | 4,80          | 1,26                                | 3585,28          | 25,16                | 54,98                      | 0,82  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 2        | 28                     | 1        | 0,87       | 222 / 154  |               |                                     | 3623,63          | 43,54                |                            | 0,85  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |           |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |  |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|-----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|--|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$  | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87      | 222 / 157  |               |                                     | 3611,15          | 28,08                |                            | 0,83  |  |
|            | 2                     |            |                   |                   | 28       | 1                      | 0,87       | 222 / 154 | 3649,44    |               |                                     | 54,49            | 0,89                 |                            |       |  |
| V1.0       | 1ª Ordem              | HEB<br>340 | 1,4               | 2,6               | --       | --                     | 1          | 0,87      | 223 / 157  | 4,77          | 1,26                                | 3563,95          | 18,62                | -57,60                     | 0,79  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 1        | 28                     | 1          | 0,87      | 223 / 151  |               |                                     | 3655,87          | -45,54               |                            | 0,87  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87      | 223 / 157  |               |                                     | 3589,85          | 20,48                |                            | 0,80  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 28                     | 1          | 0,87      | 223 / 151  |               |                                     | 3685,92          | -59,31               |                            | 0,90  |  |
|            | Análise Equivalente   |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87      | 223 / 157  |               |                                     | 3563,96          | 20,36                |                            | 0,80  |  |
| V1.0       | 1ª Ordem              | HEB<br>340 | 1,4               | 2,6               | --       | --                     | 1          | 0,87      | 223 / 157  | 4,80          | 1,26                                | 3563,95          | 18,62                | 71,23                      | 0,79  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 2        | 27                     | 1          | 0,87      | 223 / 159  |               |                                     | 3559,99          | 56,38                |                            | 0,88  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87      | 223 / 157  |               |                                     | 3589,85          | 20,48                |                            | 0,80  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 27                     | 1          | 0,87      | 223 / 159  |               |                                     | 3585,22          | 71,66                |                            | 0,92  |  |
| V1.0       | 1ª Ordem              | HEB<br>340 | 1,4               | 2,6               | --       | --                     | 1          | 0,87      | 224 / 156  | 4,75          | 1,27                                | 3678,79          | 21,19                | -56,66                     | 0,82  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 1        | 28                     | 1          | 0,87      | 224 / 151  |               |                                     | 3689,19          | -44,75               |                            | 0,87  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87      | 224 / 156  |               |                                     | 3705,60          | 23,61                |                            | 0,84  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 28                     | 1          | 0,87      | 224 / 151  |               |                                     | 3718,99          | -57,31               |                            | 0,91  |  |
| V1.0       | 1ª Ordem              | HEB<br>340 | 1,4               | 2,6               | --       | --                     | 1          | 0,87      | 224 / 156  | 4,77          | 1,26                                | 3678,79          | 21,19                | 63,31                      | 0,82  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 2        | 28                     | 1          | 0,87      | 224 / 161  |               |                                     | 3626,59          | 50,06                |                            | 0,87  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87      | 224 / 156  |               |                                     | 3705,60          | 23,61                |                            | 0,84  |  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |          |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |  |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|--|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | HEB<br>340 | 1,4               | 2,6               | 2        | 28                     | 1          | 0,87     | 224 / 161  | 4,76          | 1,27                                | 3653,14          | 62,98                | -56,23                     | 0,91  |  |
|            | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87     | 225 / 156  |               |                                     | 3677,43          | 19,10                |                            | 0,82  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 1        | 28                     | 1          | 0,87     | 225 / 151  |               |                                     | 3687,79          | -44,42               |                            | 0,87  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87     | 225 / 156  |               |                                     | 3704,19          | 21,13                |                            | 0,83  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 28                     | 1          | 0,87     | 225 / 151  |               |                                     | 3717,55          | -56,93               |                            | 0,91  |  |
| V1.0       | 1ª Ordem              | HEB<br>340 | 1,4               | 2,6               | --       | --                     | 1          | 0,87     | 225 / 156  | 4,77          | 1,26                                | 3677,43          | 19,10                | 62,97                      | 0,82  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 2        | 27                     | 1          | 0,87     | 225 / 161  |               |                                     | 3624,53          | 49,79                |                            | 0,87  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87     | 225 / 156  |               |                                     | 3704,19          | 21,13                |                            | 0,83  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 27                     | 1          | 0,87     | 225 / 161  |               |                                     | 3650,93          | 62,66                |                            | 0,91  |  |
| V1.0       | 1ª Ordem              | HEB<br>340 | 1,4               | 2,6               | --       | --                     | 1          | 0,87     | 226 / 149  | 4,77          | 1,26                                | 3658,08          | 28,20                | 64,51                      | 0,84  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 1        | 28                     | 1          | 0,87     | 226 / 152  |               |                                     | 3646,73          | 51,00                |                            | 0,88  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87     | 226 / 149  |               |                                     | 3684,14          | 31,64                |                            | 0,85  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 28                     | 1          | 0,87     | 226 / 152  |               |                                     | 3670,42          | 64,41                |                            | 0,91  |  |
| V1.0       | 1ª Ordem              | HEB<br>340 | 1,4               | 2,6               | --       | --                     | 1          | 0,87     | 226 / 149  | 4,80          | 1,26                                | 3658,08          | 28,20                | 77,59                      | 0,84  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 2        | 27                     | 1          | 0,87     | 226 / 150  |               |                                     | 3650,11          | 61,44                |                            | 0,91  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87     | 226 / 149  |               |                                     | 3684,14          | 31,64                |                            | 0,85  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 27                     | 1          | 0,87     | 226 / 150  |               |                                     | 3675,07          | 76,77                |                            | 0,96  |  |
| V1.0       | 1ª Ordem              | HEB        | 1,4               | 2,6               | --       | --                     | 1          | 0,87     | 227 / 105  | 4,82          | 1,26                                | 3579,50          | -26,32               | -53,11                     | 0,82  |  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |          |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |         |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|---------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |         |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | 340        |                   |                   | 1        | 28                     | 1          | 0,87     | 227 / 109  |               |                                     | 3596,22          | -42,11               |                            | 0,85  |         |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87     | 227 / 105  |               |                                     | 3604,90          | -29,23               |                            | 0,83  |         |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 28                     | 1          | 0,87     | 227 / 109  |               |                                     | 3619,50          | -53,61               |                            | 0,88  |         |
| V1.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87     | 227 / 105  |               |                                     | 3579,50          | -26,32               |                            | 0,82  |         |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 2,6               | 2        | 27                     | 1          | 0,87     | 227 / 106  | 4,87          | 1,26                                | 3573,35          | -61,33               | -77,14                     | 0,90  |         |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87     | 227 / 105  |               |                                     | 3604,90          | -29,23               |                            | 0,83  |         |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 27                     | 1          | 0,87     | 227 / 106  |               |                                     | 3597,90          | -76,68               |                            | 0,94  |         |
| V1.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   |          | --                     | --         | 1        | 0,87       |               |                                     | 228 / 1986       |                      |                            |       | 3546,82 |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 2,6               | 1        | 28                     | 1          | 0,87     | 228 / 137  | 4,94          | 1,25                                | 3442,57          | -40,74               | -51,07                     | 0,81  |         |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87     | 228 / 1986 |               |                                     | 3571,03          | 26,56                |                            | 0,81  |         |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 28                     | 1          | 0,87     | 228 / 137  |               |                                     | 3466,89          | -50,58               |                            | 0,84  |         |
| V1.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   |          | --                     | --         | 1        | 0,87       |               |                                     | 228 / 1986       |                      |                            |       | 3546,82 |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 2,6               | 2        | 28                     | 1          | 0,87     | 228 / 109  | 4,97          | 1,25                                | 3543,06          | -56,37               | -70,54                     | 0,88  |         |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,87     | 228 / 1986 |               |                                     | 3571,03          | 26,56                |                            | 0,81  |         |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 28                     | 1          | 0,87     | 228 / 109  |               |                                     | 3566,74          | -70,43               |                            | 0,92  |         |

Anexo E.9 – Resultados da análise dos elementos da corda superior do modelo V1.1.

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          | Resultados             |          |          |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|----------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$ | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,95     | 220 / 1984 |               |                                     | 3792,96          | 18,14                |                            | 0,77  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>360 | 1,4               | 1,8               | 1        | 32                     | 1        | 0,95     | 220 / 154  | 4,57          | 1,28                                | 3739,35          | -41,82               | -53,52                     | 0,76  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,95     | 220 / 1984 |               |                                     | 3813,21          | 19,69                |                            | 0,77  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 32                     | 1        | 0,95     | 220 / 154  |               |                                     | 3762,06          | -51,96               |                            | 0,78  |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,95     | 220 / 1984 |               |                                     | 1792,96          | 18,14                |                            | 0,77  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>360 | 1,4               | 1,8               | 2        | 32                     | 1        | 0,95     | 220 / 162  | 4,60          | 1,28                                | 3803,22          | -29,72               | -37,97                     | 0,77  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,95     | 220 / 1984 |               |                                     | 3813,21          | 19,69                |                            | 0,77  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 32                     | 1        | 0,95     | 220 / 162  |               |                                     | 3825,86          | -37,19               |                            | 0,78  |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,95     | 221 / 1984 |               |                                     | 3795,92          | 11,43                |                            | 0,75  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>360 | 1,4               | 1,8               | 1        | 32                     | 1        | 0,95     | 221 / 153  | 4,56          | 1,28                                | 3758,11          | -38,67               | -49,54                     | 0,75  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,95     | 221 / 1984 |               |                                     | 3816,17          | 12,30                |                            | 0,76  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 32                     | 1        | 0,95     | 221 / 153  |               |                                     | 3780,73          | -48,62               |                            | 0,78  |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,95     | 221 / 1984 |               |                                     | 3795,92          | 11,43                |                            | 0,75  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>360 | 1,4               | 1,8               | 2        | 32                     | 1        | 0,95     | 221 / 161  | 4,59          | 1,28                                | 3786,36          | 51,36                | 65,69                      | 0,80  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,95     | 221 / 1984 |               |                                     | 3816,17          | 12,30                |                            | 0,76  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 32                     | 1        | 0,95     | 221 / 161  |               |                                     | 3805,22          | 63,47                |                            | 0,83  |
| V1.1       | 1ª Ordem              | HEB        | 1,4               | 1,8               | --       | --                     | 1        | 0,95     | 222 / 157  | 4,51          | 1,28                                | 3737,20          | 18,29                | -51,67                     | 0,76  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |          |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |  |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|--|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | 360        |                   |                   | 1        | 32                     | 1          | 0,95     | 222 / 151  |               |                                     | 3802,55          | -40,22               |                            | 0,77  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 222 / 157  |               |                                     | 3756,93          | 20,13                |                            | 0,76  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 32                     | 1          | 0,95     | 222 / 151  |               |                                     | 3825,55          | -50,63               |                            | 0,79  |  |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 222 / 157  |               |                                     | 3737,20          | 18,29                |                            | 0,76  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>360 | 1,4               | 1,8               | 2        | 31                     | 1          | 0,95     | 222 / 159  | 4,56          | 1,28                                | 3730,74          | 54,09                | 69,30                      | 0,80  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 222 / 157  |               |                                     | 3756,93          | 20,13                |                            | 0,76  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 31                     | 1          | 0,95     | 222 / 159  |               |                                     | 3749,72          | 67,26                |                            | 0,83  |  |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 223 / 157  |               |                                     | 3715,59          | 13,39                |                            | 0,74  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 1        | 32                     | 1          | 0,95     | 223 / 151  |               |                                     | 3816,70          | -39,45               |                            | 0,77  |  |
|            | 2ªOrdem NL            | HEB<br>360 | 1,4               | 1,8               | --       | --                     | 1          | 0,95     | 223 / 157  | 4,51          | 1,29                                | 3735,33          | 14,51                | -50,70                     | 0,75  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 32                     | 1          | 0,95     | 223 / 151  |               |                                     | 3839,71          | -49,47               |                            | 0,79  |  |
|            | Análise Equivalente   |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 223 / 157  |               |                                     | 3716,03          | 17,14                |                            | 0,74  |  |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 223 / 157  |               |                                     | 3715,59          | 13,39                |                            | 0,74  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>360 | 1,4               | 1,8               | 2        | 32                     | 1          | 0,95     | 223 / 111  | 4,55          | 1,28                                | 3736,24          | -41,35               | -53,00                     | 0,77  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 223 / 157  |               |                                     | 3735,33          | 14,51                |                            | 0,75  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 32                     | 1          | 0,95     | 223 / 111  |               |                                     | 3756,16          | -50,92               |                            | 0,79  |  |
| V1.1       | 1ª Ordem              | HEB<br>360 | 1,4               | 1,8               | --       | --                     | 1          | 0,95     | 224 / 156  | 4,49          | 1,29                                | 3838,18          | 15,60                | -47,25                     | 0,77  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 1        | 32                     | 1          | 0,95     | 224 / 151  |               |                                     | 3848,24          | -36,73               |                            | 0,77  |  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |          |            |               |                                     |                  |                      |                            |         |       |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|---------|-------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio   |       |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 224 / 156  |               |                                     | 3858,57          | 17,21                |                            | 0,77    |       |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 32                     | 1          | 0,95     | 224 / 156  |               |                                     | 3871,24          | -45,22               |                            | 0,79    |       |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 224 / 156  |               |                                     | 3838,18          | 15,60                |                            | 0,77    |       |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,8               | 2        | 32                     | 1          | 0,95     | 224 / 111  | 4,53          | 1,28                                | 3802,04          | -49,42               | -63,41                     | 0,81    |       |
|            | 2ªOrdem NL            | 360        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 224 / 156  |               |                                     | 3858,57          | 17,21                |                            | 0,77    |       |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 32                     | 1          | 0,95     | 224 / 111  |               |                                     | 3821,97          | -60,90               |                            | 0,83    |       |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 225 / 156  |               |                                     |                  |                      |                            | 3836,86 | 14,32 |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,8               | 1        | 32                     | 1          | 0,95     | 225 / 151  | 4,49          | 1,29                                | 3846,44          | -36,32               | -46,72                     | 0,77    |       |
|            | 2ªOrdem NL            | 360        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 225 / 156  |               |                                     | 3857,23          | 15,78                |                            | 0,77    |       |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 32                     | 1          | 0,95     | 225 / 151  |               |                                     | 3869,35          | -45,11               |                            | 0,79    |       |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 225 / 156  |               |                                     |                  |                      |                            | 3836,86 | 14,32 |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,8               | 2        | 32                     | 1          | 0,95     | 225 / 111  | 4,53          | 1,28                                | 3801,44          | -49,29               | -63,25                     | 0,81    |       |
|            | 2ªOrdem NL            | 360        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 225 / 156  |               |                                     | 3857,23          | 15,78                |                            | 0,77    |       |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 32                     | 1          | 0,95     | 225 / 111  |               |                                     | 3821,33          | -60,79               |                            | 0,83    |       |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 226 / 149  |               |                                     |                  |                      |                            | 3816,66 | 19,73 |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,8               | 1        | 32                     | 1          | 0,95     | 226 / 155  | 4,51          | 1,29                                | 3829,13          | -36,62               | -47,06                     | 0,77    |       |
|            | 2ªOrdem NL            | 360        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 226 / 149  |               |                                     | 3836,41          | 21,76                |                            | 0,78    |       |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 32                     | 1          | 0,95     | 226 / 155  |               |                                     | 2851,72          | -45,44               |                            | 0,79    |       |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |          |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |  |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|--|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |  |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 226 / 149  |               |                                     | 3816,66          | 19,73                |                            | 0,77  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>360 | 1,4               | 1,8               | 2        | 31                     | 1          | 0,95     | 226 / 109  | 4,55          | 1,28                                | 3793,51          | -41,68               | -53,41                     | 0,77  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 226 / 149  |               |                                     | 3836,41          | 21,76                |                            | 0,78  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 31                     | 1          | 0,95     | 226 / 109  |               |                                     | 3813,27          | -51,69               |                            | 0,80  |  |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 227 / 105  |               |                                     | 3732,08          | -19,16               |                            | 0,76  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>360 | 1,4               | 1,8               | 1        | 32                     | 1          | 0,95     | 227 / 139  | 4,56          | 1,28                                | 3638,83          | -37,36               | -47,85                     | 0,77  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 227 / 105  |               |                                     | 3751,53          | -21,11               |                            | 0,77  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 32                     | 1          | 0,95     | 227 / 139  |               |                                     | 3658,90          | -45,36               |                            | 0,78  |  |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 227 / 105  |               |                                     | 3732,08          | -19,16               |                            | 0,76  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>360 | 1,4               | 1,8               | 2        | 32                     | 1          | 0,95     | 227 / 106  | 4,62          | 1,28                                | 3723,87          | -53,33               | -68,06                     | 0,8   |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 227 / 105  |               |                                     | 3751,53          | -21,11               |                            | 0,77  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 32                     | 1          | 0,95     | 227 / 106  |               |                                     | 3742,16          | -65,82               |                            | 0,83  |  |
| V1.1       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 228 / 24   |               |                                     | 3702,01          | 16,82                |                            | 0,74  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>360 | 1,4               | 1,8               | 1        | 32                     | 1          | 0,95     | 228 / 151  | 4,68          | 1,27                                | 3612,92          | -40,55               | -51,58                     | 0,73  |  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 228 / 24   |               |                                     | 3720,58          | 18,24                |                            | 0,75  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 32                     | 1          | 0,95     | 228 / 151  |               |                                     | 3632,62          | -50,25               |                            | 0,76  |  |
| V1.1       | 1ª Ordem              | HEB<br>360 | 1,4               | 1,8               | --       | --                     | 1          | 0,95     | 228 / 24   | 4,71          | 1,27                                | 3702,01          | 16,82                | 39,23                      | 0,74  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 2        | 32                     | 1          | 0,95     | 228 / 109  |               |                                     | 3714,22          | 30,9                 |                            | 0,75  |  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |          |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,95     | 228 / 24   |               |                                     | 3720,58          | 18,24                |                            | 0,75  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 32                     | 1          | 0,95     | 228 / 109  |               |                                     | 3734,94          | 38,15                |                            | 0,77  |

Anexo E.10 - Resultados da análise dos elementos da corda superior do modelo V2.0.

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        | Resultados |          |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |  |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|--|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$   | $\chi_z$ | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |  |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,97     | 220 / 161  |               |                                     | 3559,87          | 35,79                |                            | 0,77  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,53              | 1        | 37                     | 1          | 0,97     | 220 / 177  | 4,87          | 1,26                                | 3381,40          | 75,95                | 95,55                      | 0,79  |  |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,97     | 220 / 161  |               |                                     | 3587,04          | 38,57                |                            | 0,77  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 37                     | 1          | 0,97     | 220 / 177  |               |                                     | 3401,57          | 90,02                |                            | 0,82  |  |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,97     | 220 / 161  |               |                                     | 3559,87          | 35,79                |                            | 0,77  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,53              | 2        | 38                     | 1          | 0,97     | 220 / 1394 | 4,92          | 1,26                                | 3463,47          | 103,65               | 130,11                     | 0,87  |  |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,97     | 220 / 161  |               |                                     | 3587,04          | 38,57                |                            | 0,77  |  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 38                     | 1          | 0,97     | 220 / 1394 |               |                                     | 3480,41          | 123,65               |                            | 0,91  |  |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,97     | 221 / 161  |               |                                     | 3566,97          | 35,70                |                            | 0,76  |  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,53              | 1        | 37                     | 1          | 0,97     | 221 / 153  | 4,86          | 1,26                                | 3501,27          | 92,83                | 116,90                     | 0,83  |  |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1          | 0,97     | 221 / 161  |               |                                     | 3594,50          | 38,44                |                            | 0,77  |  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        |          | Resultados |            |               |                                     |                  |                      |        |      | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|----------|------------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|--------|------|----------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$ | $\chi_z$   | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) |        |      |                            |       |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 37                     | 1        | 0,97       | 221 / 153  |               |                                     | 3522,59          | 109,79               |        | 0,87 |                            |       |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 221 / 161  |               |                                     | 3566,97          | 35,70                |        | 0,76 |                            |       |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,53              | 2        | 37                     | 1        | 0,97       | 221 / 1394 | 4,90          | 1,26                                | 3475,85          | 105,02               | 131,95 | 0,87 |                            |       |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 221 / 161  |               |                                     | 3594,50          | 38,44                |        | 0,77 |                            |       |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 37                     | 1        | 0,97       | 221 / 1394 |               |                                     | 3494,68          | 125,49               |        | 0,92 |                            |       |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 222 / 161  |               |                                     | 3580,93          | 35,60                |        | 0,76 |                            |       |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,53              | 1        | 37                     | 1        | 0,97       | 222 / 153  | 4,81          | 1,26                                | 3539,75          | 87,71                | 110,75 | 0,83 |                            |       |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 222 / 161  |               |                                     | 3609,16          | 38,29                |        | 0,77 |                            |       |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 37                     | 1        | 0,97       | 222 / 153  |               |                                     | 3562,09          | 103,53               |        | 0,86 |                            |       |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 222 / 161  |               |                                     | 3580,93          | 35,60                |        | 0,76 |                            |       |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,53              | 2        | 35                     | 1        | 0,97       | 222 / 109  | 4,87          | 1,26                                | 3460,66          | -77,28               | -97,25 | 0,80 |                            |       |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 222 / 161  |               |                                     | 3609,16          | 38,29                |        | 0,77 |                            |       |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 35                     | 1        | 0,97       | 222 / 109  |               |                                     | 3481,73          | -90,97               |        | 0,83 |                            |       |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 223 / 161  |               |                                     | 3576,34          | 32,27                |        | 0,75 |                            |       |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  |            |                   |                   | 1        | 37                     | 1        | 0,97       | 223 / 154  |               |                                     | 3612,98          | -36,17               |        | 0,77 |                            |       |
|            | 2ªOrdem NL            | HEB        | 1,4               | 1,53              | --       | --                     | 1        | 0,97       | 223 / 161  | 4,80          | 1,26                                | 3604,50          | 34,01                | -45,68 | 0,76 |                            |       |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling | 340        |                   |                   | 1        | 37                     | 1        | 0,97       | 223 / 154  |               |                                     | 3650,77          | -50,97               |        | 0,79 |                            |       |
|            | Análise Equivalente   |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 223 / 161  |               |                                     | 3578,97          | 39,30                |        | 0,76 |                            |       |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        |          | Resultados |            |               |                                     |                  |                      |                            |         |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|----------|------------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|---------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$ | $\chi_z$   | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio   |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 223 / 161  |               |                                     | 3576,34          | 32,27                |                            | 0,75    |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,53              | 2        | 37                     | 1        | 0,97       | 223 / 1394 | 4,86          | 1,26                                | 3477,48          | 104,16               | 131,13                     | 0,87    |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 223 / 161  |               |                                     | 3604,50          | 34,01                |                            | 0,76    |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 37                     | 1        | 0,97       | 223 / 1394 |               |                                     | 3499,48          | 124,57               |                            | 0,91    |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 224 / 24   |               |                                     |                  |                      |                            | 3581,02 |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,53              | 1        | 37                     | 1        | 0,97       | 224 / 155  | 4,79          | 1,26                                | 3636,91          | -30,37               | -38,39                     | 0,78    |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 224 / 24   |               |                                     | 3609,32          | -23,92               |                            | 0,78    |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 37                     | 1        | 0,97       | 224 / 155  |               |                                     | 3673,17          | -40,26               |                            | 0,80    |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 224 / 24   |               |                                     |                  |                      |                            | 3581,02 |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,53              | 2        | 37                     | 1        | 0,97       | 224 / 1394 | 4,84          | 1,26                                | 3434,38          | 91,47                | 115,28                     | 0,83    |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 224 / 24   |               |                                     | 3609,32          | -23,92               |                            | 0,78    |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 37                     | 1        | 0,97       | 224 / 1394 |               |                                     | 3457,15          | 108,44               |                            | 0,87    |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 225 / 24   |               |                                     |                  |                      |                            | 3580,90 |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,53              | 1        | 37                     | 1        | 0,97       | 225 / 155  | 4,79          | 1,26                                | 3637,31          | -30,63               | -38,71                     | 0,78    |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 225 / 24   |               |                                     | 3609,20          | -24,46               |                            | 0,78    |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 37                     | 1        | 0,97       | 225 / 155  |               |                                     | 3673,78          | -40,54               |                            | 0,8     |
| V2.0       | 1ª Ordem              | HEB        |                   |                   | 1,4      | 1,53                   | --       | --         | 1          |               |                                     | 0,97             | 225 / 24             |                            | 4,84    |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | 340        | 2                 | 37                |          |                        | 1        | 0,97       | 225 / 161  | 3545,51       | 87,24                               | 0,84             |                      |                            |         |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        |          | Resultados |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|----------|------------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$ | $\chi_z$   | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 225 / 24   |               |                                     | 3609,20          | -24,46               |                            | 0,78  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 37                     | 1        | 0,97       | 225 / 161  |               |                                     | 3569,46          | 103,92               |                            | 0,87  |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 226 / 2234 |               |                                     | 3529,52          | -21,25               |                            | 0,76  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,53              | 1        | 36                     | 1        | 0,97       | 226 / 152  | 4,81          | 1,26                                | 3554,76          | 98,31                | 124,13                     | 0,86  |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 226 / 2234 |               |                                     | 3556,35          | -21,97               |                            | 0,77  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 36                     | 1        | 0,97       | 226 / 152  |               |                                     | 3574,74          | 117,01               |                            | 0,90  |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 226 / 2234 |               |                                     | 3529,52          | -21,25               |                            | 0,76  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,53              | 2        | 35                     | 1        | 0,97       | 226 / 1619 | 4,86          | 1,26                                | 3472,70          | -89,44               | -112,60                    | 0,84  |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 226 / 2234 |               |                                     | 3556,35          | -21,97               |                            | 0,77  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 35                     | 1        | 0,97       | 226 / 1619 |               |                                     | 3496,13          | -105,85              |                            | 0,87  |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 227 / 1619 |               |                                     | 3518,51          | -38,45               |                            | 0,75  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,53              | 1        | 36                     | 1        | 0,97       | 227 / 152  | 4,86          | 1,26                                | 3476,79          | 82,34                | 103,65                     | 0,81  |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 227 / 1619 |               |                                     | 3545,52          | -41,13               |                            | 0,76  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 36                     | 1        | 0,97       | 227 / 152  |               |                                     | 3498,56          | 96,51                |                            | 0,84  |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 227 / 1619 |               |                                     | 3518,51          | -38,45               |                            | 0,75  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB        | 1,4               | 1,53              | 2        | 36                     | 1        | 0,97       | 227 / 106  | 4,93          | 1,25                                | 3543,34          | 25,14                | 31,53                      | 0,77  |
|            | 2ªOrdem NL            | 340        |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 227 / 1619 |               |                                     | 3545,52          | -41,13               |                            | 0,76  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 36                     | 1        | 0,97       | 227 / 106  |               |                                     | 3579,79          | 33,29                |                            | 0,78  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |                   |                   |          |                        |          | Resultados |            |               |                                     |                  |                      |                            |       |
|------------|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|----------|------------------------|----------|------------|------------|---------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mo<br>de | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $\chi_y$ | $\chi_z$   | LC e Barra | $\alpha_{cr}$ | $\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}$ | $N_{Ed}$<br>(kN) | $M_{y,Ed}$<br>(kN.m) | Verif.<br>Amplific<br>ação | Ratio |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 228 / 1619 |               |                                     | 3450,46          | -38,13               |                            | 0,75  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>340 | 1,4               | 1,53              | 1        | 36                     | 1        | 0,97       | 228 / 152  | 4,98          | 1,25                                | 3368,51          | 92,32                | 115,52                     | 0,81  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 228 / 1619 |               |                                     | 3475,43          | -40,81               |                            | 0,76  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 1        | 36                     | 1        | 0,97       | 228 / 152  |               |                                     | 3387,71          | 108,80               |                            | 0,84  |
| V2.0       | 1ª Ordem              |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 228 / 1619 |               |                                     | 3450,46          | -38,13               |                            | 0,75  |
|            | 1ª Ordem c/ Buckling  | HEB<br>340 | 1,4               | 1,53              | 2        | 38                     | 1        | 0,97       | 228 / 110  | 5,04          | 1,25                                | 3513,29          | 26,69                | 33,30                      | 0,76  |
|            | 2ªOrdem NL            |            |                   |                   | --       | --                     | 1        | 0,97       | 228 / 1619 |               |                                     | 3475,43          | -40,81               |                            | 0,76  |
|            | 2ªOrdem NL c/Buckling |            |                   |                   | 2        | 38                     | 1        | 0,97       | 228 / 110  |               |                                     | 3548,09          | 41,31                |                            | 0,78  |

Anexo E.11 - Resultados da análise dos elementos de madeira do modelo V1.0.

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |        |                   |                   |      |                        | Resultados |           |            |                           |                           |                           |       |
|------------|-----------------------|------------|--------|-------------------|-------------------|------|------------------------|------------|-----------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | Classe | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mode | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $k_{c,y}$  | $k_{c,z}$ | LC e Barra | $\sigma_{c,0,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,y,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,z,d}$<br>(MPa) | Ratio |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 1    | 24                     | 0,79       | 0,79      | 220 / 5292 | 4,37                      | 0,33                      | 0,00                      | 0,43  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 2    | 23                     | -          | -         | 220 / 5290 | -3,64                     | -0,19                     | -0,02                     | 0,33  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |        |                   |                   |      |                        |           |           | Resultados |                           |                           |                           |       |
|------------|-----------------------|------------|--------|-------------------|-------------------|------|------------------------|-----------|-----------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | Classe | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mode | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $k_{c,y}$ | $k_{c,z}$ | LC e Barra | $\sigma_{c,0,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,y,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,z,d}$<br>(MPa) | Ratio |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 1    | 24                     | 0,79      | 0,79      | 221 / 5292 | 3,80                      | 0,29                      | 0,01                      | 0,37  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 2    | 24                     | -         | -         | 221 / 5294 | -3,68                     | -0,24                     | -0,03                     | 0,34  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 1    | 24                     | 0,79      | 0,79      | 222 / 5292 | 2,46                      | 0,16                      | 0,01                      | 0,24  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 2    | 23                     | 0,79      | 0,79      | 222 / 5290 | 4,44                      | 0,30                      | 0,04                      | 0,43  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 1    | 24                     | 0,79      | 0,79      | 223 / 5292 | 2,46                      | 0,16                      | 0,01                      | 0,24  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 2    | 23                     | 0,79      | 0,79      | 223 / 5294 | 3,95                      | 0,31                      | 0,03                      | 0,39  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 1    | 24                     | -         | -         | 224 / 5296 | -2,79                     | -0,08                     | 0                         | 0,25  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 2    | 23                     | 0,79      | 0,79      | 224 / 5294 | 4,25                      | 0,31                      | 0,02                      | 0,42  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |        |                   |                   |      |                        |           |           | Resultados |                           |                           |                           |       |
|------------|-----------------------|------------|--------|-------------------|-------------------|------|------------------------|-----------|-----------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | Classe | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mode | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $k_{c,y}$ | $k_{c,z}$ | LC e Barra | $\sigma_{c,0,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,y,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,z,d}$<br>(MPa) | Ratio |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 1    | 24                     | -         | -         | 225 / 5296 | -2,66                     | -0,07                     | 0                         | 0,24  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 2    | 23                     | 0,79      | 0,79      | 225 / 5294 | 3,99                      | 0,27                      | 0,02                      | 0,39  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 1    | 24                     | -         | -         | 226 / 5294 | -4,25                     | -0,28                     | -0,03                     | 0,39  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 2    | 23                     | 0,79      | 0,79      | 226 / 5296 | 3,67                      | 0,24                      | 0,01                      | 0,36  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 1    | 24                     | -         | -         | 227 / 5294 | -4,42                     | -0,31                     | -0,03                     | 0,41  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 2    | 24                     | 0,79      | 0,79      | 227 / 5292 | 4,08                      | 0,3                       | 0,01                      | 0,4   |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 1    | 23                     | 0,79      | 0,79      | 228 / 5294 | 4,26                      | 0,34                      | 0,04                      | 0,42  |
| V1.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 2,18              | 2,18              | 2    | 23                     | -         | -         | 228 / 5296 | -3,46                     | -0,19                     | -0,01                     | 0,32  |

Anexo E.12 - Resultados da análise dos elementos em madeira do modelo V1.1.

| Modelo | Tipo de análise       | Parâmetros |        |                   |                   | Resultados |                        |           |           |            |                           |                           |                           |       |
|--------|-----------------------|------------|--------|-------------------|-------------------|------------|------------------------|-----------|-----------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|
|        |                       | Perfil     | Classe | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mode       | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $k_{c,y}$ | $k_{c,z}$ | LC e Barra | $\sigma_{c,0,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,y,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,z,d}$<br>(MPa) | Ratio |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 1          | 33                     | -         | -         | 220 / 5306 | -5,15                     | -4,18                     | -5,44                     | 0,9   |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 2          | 33                     | -         | -         | 220 / 5304 | -4,01                     | -5,32                     | -6,27                     | 0,88  |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 1          | 33                     | -         | -         | 221 / 5306 | -5,17                     | -3,48                     | -5,28                     | 0,87  |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 2          | 33                     | -         | -         | 221 / 5306 | -5,31                     | -7,04                     | -4,38                     | 1,00  |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 1          | 33                     | -         | -         | 222 / 5302 | -3,47                     | -5,63                     | -6,31                     | 0,85  |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 2          | 33                     | -         | -         | 222 / 5306 | -5,38                     | -6,73                     | -4,79                     | 1,00  |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 1          | 33                     | -         | -         | 223 / 5302 | -3,49                     | -5,70                     | -6,3                      | 0,86  |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 2          | 33                     | -         | -         | 223 / 5304 | -4,19                     | -6,01                     | -6,98                     | 0,96  |

| Modelo | Tipo de análise       | Parâmetros |        |                   |                   |      |                        |           |           | Resultados |                           |                           |                           |       |
|--------|-----------------------|------------|--------|-------------------|-------------------|------|------------------------|-----------|-----------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|
|        |                       | Perfil     | Classe | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mode | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $k_{c,y}$ | $k_{c,z}$ | LC e Barra | $\sigma_{c,0,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,y,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,z,d}$<br>(MPa) | Ratio |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 1    | 33                     | -         | -         | 224 / 5302 | -3,55                     | -5,84                     | -6,3                      | 0,87  |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 2    | 33                     | -         | -         | 224 / 5304 | -4,26                     | -6,10                     | -7,2                      | 0,99  |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 1    | 33                     | -         | -         | 225 / 5302 | -3,55                     | -5,81                     | -6,31                     | 0,86  |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 2    | 33                     | -         | -         | 225 / 5304 | -4,27                     | -6,11                     | -7,20                     | 0,99  |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 1    | 33                     | -         | -         | 226 / 5306 | -5,40                     | -4,70                     | -4,98                     | 0,92  |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 2    | 33                     | -         | -         | 226 / 5304 | -4,31                     | -5,82                     | -6,63                     | 0,95  |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 1    | 33                     | -         | -         | 227 / 5298 | -0,54                     | -6,11                     | -11,6                     | 0,89  |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 2    | 33                     | -         | -         | 227 / 5306 | -4,35                     | -6,05                     | -6,25                     | 0,94  |

| Modelo | Tipo de análise       | Parâmetros |        |                   |                   |      |                        |           |           | Resultados |                           |                           |                           |       |
|--------|-----------------------|------------|--------|-------------------|-------------------|------|------------------------|-----------|-----------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|
|        |                       | Perfil     | Classe | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mode | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $k_{c,y}$ | $k_{c,z}$ | LC e Barra | $\sigma_{c,0,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,y,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,z,d}$<br>(MPa) | Ratio |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 1    | 33                     | -         | -         | 228 / 5302 | -3,21                     | -5,90                     | -7,80                     | 0,92  |
| V1.1   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W30*<br>30 | C35    | 2,8               | 2,8               | 2    | 33                     | -         | -         | 228 / 5306 | -5,45                     | -7,52                     | -3,45                     | 1,00  |

Anexo E.13 - Resultados da análise dos elementos de madeira do modelo V2.0.

| Modelo | Tipo de análise       | Parâmetros |        |                   |                   |      |                        |           |           | Resultados |                           |                           |                           |       |
|--------|-----------------------|------------|--------|-------------------|-------------------|------|------------------------|-----------|-----------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|
|        |                       | Perfil     | Classe | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mode | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $k_{c,y}$ | $k_{c,z}$ | LC e Barra | $\sigma_{c,0,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,y,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,z,d}$<br>(MPa) | Ratio |
| V2.0   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 1    | 34                     | -         | -         | 220 / 5412 | -5,94                     | -3,77                     | -1,09                     | 0,77  |
| V2.0   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 2    | 35                     | -         | -         | 220 / 5416 | -7,48                     | -1,87                     | -1,72                     | 0,82  |
| V2.0   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 1    | 35                     | -         | -         | 221 / 5416 | -7,02                     | -2,75                     | -1,34                     | 0,82  |
| V2.0   | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 2    | 34                     | -         | -         | 221 / 5412 | -6,42                     | -3,87                     | -1,66                     | 0,83  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |        |                   |                   |      |                        |           |           | Resultados |                           |                           |                           |       |
|------------|-----------------------|------------|--------|-------------------|-------------------|------|------------------------|-----------|-----------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | Classe | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mode | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $k_{c,y}$ | $k_{c,z}$ | LC e Barra | $\sigma_{c,0,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,y,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,z,d}$<br>(MPa) | Ratio |
| V2.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 1    | 35                     | -         | -         | 222 / 5416 | -6,74                     | -5,56                     | -0,79                     | 0,92  |
| V2.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 2    | 33                     | -         | -         | 222 / 5420 | -6,47                     | -3,68                     | -0,96                     | 0,80  |
| V2.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 1    | 35                     | -         | -         | 223 / 5412 | -5,30                     | -1,85                     | -1,53                     | 0,62  |
| V2.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 2    | 34                     | -         | -         | 223 / 5412 | -7,32                     | -2,54                     | -1,36                     | 0,83  |
| V2.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 1    | 35                     | -         | -         | 224 / 5424 | -4,75                     | -3,10                     | -0,43                     | 0,60  |
| V2.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 2    | 34                     | -         | -         | 224 / 5412 | -6,07                     | -3,03                     | -1,23                     | 0,74  |
| V2.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 1    | 35                     | -         | -         | 225 / 5424 | -4,74                     | -2,88                     | -0,50                     | 0,59  |
| V2.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 2    | 34                     | -         | -         | 225 / 5412 | -5,92                     | -3,10                     | -1,29                     | 0,74  |

| Mod<br>elo | Tipo de análise       | Parâmetros |        |                   |                   |      |                        |           |           | Resultados |                           |                           |                           |       |
|------------|-----------------------|------------|--------|-------------------|-------------------|------|------------------------|-----------|-----------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|
|            |                       | Perfil     | Classe | $L_{cr,y}$<br>(m) | $L_{cr,z}$<br>(m) | Mode | Max.<br>Displ.<br>(mm) | $k_{c,y}$ | $k_{c,z}$ | LC e Barra | $\sigma_{c,0,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,y,d}$<br>(MPa) | $\sigma_{m,z,d}$<br>(MPa) | Ratio |
| V2.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 1    | 32                     | -         | -         | 226 / 5420 | -6,60                     | -5,86                     | -1,14                     | 0,94  |
| V2.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 2    | 33                     | -         | -         | 226 / 5424 | -6,41                     | -3,67                     | -0,99                     | 0,80  |
| V2.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 1    | 35                     | -         | -         | 227 / 5412 | -6,64                     | -6,06                     | -0,50                     | 0,93  |
| V2.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 2    | 34                     | -         | -         | 227 / 5416 | -6,21                     | -2,38                     | -0,50                     | 0,69  |
| V2.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 1    | 34                     | -         | -         | 228 / 5420 | -6,92                     | -1,38                     | -1,62                     | 0,75  |
| V2.0       | 2ªOrdem NL c/Buckling | W15*<br>15 | C35    | 1,41              | 1,41              | 2    | 36                     | -         | -         | 228 / 5424 | -2,07                     | -5,28                     | -1,15                     | 0,51  |

Anexo E.14 – Resultados detalhados da pesagem do modelo V0.0.

| Type           | Number | Length (m) | Unit (kG/m) | weight | Bar (kG) | weight | Total (kG) | weight | Painting (m2) | area  |
|----------------|--------|------------|-------------|--------|----------|--------|------------|--------|---------------|-------|
| S 355          |        |            |             |        |          |        |            |        |               |       |
| G_Con_IC       | 24     | 0,01       |             | 97,66  |          | 0,98   |            | 23     |               | 0,42  |
| G_Con_SC       | 20     | 0,01       |             | 97,66  |          | 0,98   |            | 20     |               | 0,35  |
| G_DV_UPN 140   | 24     | 2,46       |             | 31,83  |          | 78,31  |            | 1879   |               | 56,65 |
| G_IC_HEA 320   | 24     | 0,12       |             | 97,66  |          | 11,72  |            | 281    |               | 5,06  |
| G_IC_HEA 320   | 12     | 0,34       |             | 97,66  |          | 33,21  |            | 398    |               | 7,16  |
| G_IC_HEA 320   | 12     | 0,93       |             | 97,66  |          | 90,83  |            | 1090   |               | 19,59 |
| G_IC_HEA 320   | 12     | 1,29       |             | 97,66  |          | 125,99 |            | 1512   |               | 27,18 |
| G_SC_HEA 320   | 24     | 0,09       |             | 97,66  |          | 8,79   |            | 211    |               | 3,79  |
| G_SC_HEA 320   | 8      | 0,14       |             | 97,66  |          | 13,67  |            | 109    |               | 1,97  |
| G_SC_HEA 320   | 12     | 1,15       |             | 97,66  |          | 112,31 |            | 1348   |               | 24,23 |
| G_SC_HEA 320   | 12     | 1,31       |             | 97,66  |          | 127,94 |            | 1535   |               | 27,6  |
| G_VB_IPE 300   |        |            |             |        |          |        |            |        |               |       |
| Reinf          | 12     | 0,4        |             | 45,45  |          | 18,18  |            | 218    |               | 6,54  |
| G_VB_IPE 300   |        |            |             |        |          |        |            |        |               |       |
| Reinf          | 12     | 2,15       |             | 45,45  |          | 97,72  |            | 1173   |               | 35,13 |
| H_Con_IC       | 24     | 0,01       |             | 97,66  |          | 0,98   |            | 23     |               | 0,42  |
| H_Con_SC       | 24     | 0,01       |             | 126,7  |          | 1,27   |            | 30     |               | 0,42  |
| H_DV_UPN 100   | 24     | 2,49       |             | 21,01  |          | 52,33  |            | 1256   |               | 43,72 |
| H_IC_HEA 320   | 24     | 0,09       |             | 97,66  |          | 8,79   |            | 211    |               | 3,79  |
| H_IC_HEA 320   | 12     | 0,34       |             | 97,66  |          | 33,21  |            | 398    |               | 7,16  |
| H_IC_HEA 320   | 12     | 0,95       |             | 97,66  |          | 92,78  |            | 1113   |               | 20,01 |
| H_IC_HEA 320   | 12     | 1,31       |             | 97,66  |          | 127,94 |            | 1535   |               | 27,6  |
| H_SC_HEB 320   | 24     | 0,07       |             | 126,7  |          | 8,87   |            | 213    |               | 2,97  |
| H_SC_HEB 320   | 12     | 0,14       |             | 126,7  |          | 17,74  |            | 213    |               | 2,97  |
| H_SC_HEB 320   | 12     | 1,17       |             | 126,7  |          | 148,24 |            | 1779   |               | 24,86 |
| H_SC_HEB 320   | 12     | 1,33       |             | 126,7  |          | 168,51 |            | 2022   |               | 28,26 |
| H_VB_IPE 300   | 12     | 0,4        |             | 40,74  |          | 16,3   |            | 196    |               | 5,69  |
| H_VB_IPE 300   | 12     | 2,15       |             | 40,74  |          | 87,59  |            | 1051   |               | 30,59 |
| SUP_CI_HEA 320 | 4      | 0,34       |             | 97,66  |          | 33,21  |            | 133    |               | 2,39  |

| Type             | Number | Length (m) | Unit (kG/m) | weight Bar (kG) | weight Total (kG) | weight Painting (m2) | area  |
|------------------|--------|------------|-------------|-----------------|-------------------|----------------------|-------|
| SUP_Con_IC       | 4      | 0,01       |             | 97,66           | 0,98              | 4                    | 0,07  |
| T_CAE 70x7       | 16     | 2,82       |             | 7,38            | 20,81             | 333                  | 12,29 |
| T_Con_IPE450     | 28     | 0,01       |             | 50,49           | 0,5               | 14                   | 0,34  |
| T_IPE 450        | 14     | 0,2        |             | 77,6            | 15,52             | 217                  | 4,49  |
| T_IPE 450        | 28     | 0,25       |             | 77,6            | 19,4              | 543                  | 11,24 |
| T_IPE 450        | 28     | 0,28       |             | 77,6            | 21,73             | 608                  | 12,58 |
| T_IPE 450        | 14     | 0,3        |             | 77,6            | 23,28             | 326                  | 6,74  |
| T_IPE 450        | 28     | 0,6        |             | 77,6            | 46,56             | 1304                 | 26,97 |
| T_IPE 450        | 14     | 1,2        |             | 77,6            | 93,12             | 1304                 | 26,97 |
| T_IPE 450        | 14     | 1,3        |             | 77,6            | 100,88            | 1412                 | 29,21 |
| T_Reinf          | 28     | 0,22       |             | 50,49           | 11,11             | 311                  | 7,45  |
| T_Reinf          | 28     | 0,23       |             | 50,49           | 11,61             | 325                  | 7,79  |
| T_SHSC 100x4     | 26     | 3,64       |             | 11,7            | 42,59             | 1107                 | 36,53 |
| VB_Con_Inf       | 28     | 0,01       |             | 45,45           | 0,45              | 13                   | 0,38  |
| VB_Con_Sup       | 28     | 0,01       |             | 42,26           | 0,42              | 12                   | 0,32  |
| VB_IPE 300 Reinf | 28     | 1,16       |             | 45,45           | 52,73             | 1476                 | 44,23 |
| XH_Con_IC        | 4      | 0,01       |             | 97,66           | 0,98              | 4                    | 0,07  |
| XH_Con_SC        | 4      | 0,01       |             | 126,7           | 1,27              | 5                    | 0,07  |
| XH_DV_UPN 100    | 4      | 2,49       |             | 21,01           | 52,33             | 209                  | 7,29  |
| XH_IC_HEA 320    | 4      | 0,09       |             | 97,66           | 8,79              | 35                   | 0,63  |
| XH_IC_HEA 320    | 4      | 0,95       |             | 97,66           | 92,78             | 371                  | 6,67  |
| XH_SC_HEB 320    | 4      | 0,07       |             | 126,7           | 8,87              | 35                   | 0,5   |
| XH_SC_HEB 320    | 4      | 0,14       |             | 126,7           | 17,74             | 71                   | 0,99  |
| XH_SC_HEB 320    | 4      | 1,33       |             | 126,7           | 168,51            | 674                  | 9,42  |
| XH_VB_IPE 300    | 4      | 0,4        |             | 40,74           | 16,3              | 65                   | 1,9   |
| XH_VB_IPE 300    | 2      | 2,15       |             | 40,74           | 87,59             | 175                  | 5,1   |

| Type               | Numb<br>er | Length<br>(m) | Unit<br>(kG/m) | weight<br>(kG) | Bar<br>(kG) | weight<br>(kG) | Total<br>(kG) | weight<br>(kG) | Painting<br>(m2) | area  |
|--------------------|------------|---------------|----------------|----------------|-------------|----------------|---------------|----------------|------------------|-------|
| Total per sections |            |               |                |                |             |                |               |                |                  |       |
| G_Con_IC           | 24         | 0,24          |                | 97,66          |             | 23,44          |               | 23             |                  | 0,42  |
| G_Con_SC           | 20         | 0,2           |                | 97,66          |             | 19,53          |               | 20             |                  | 0,35  |
| G_DV_UPN 140       | 24         | 59,04         |                | 31,83          |             | 1879,49        |               | 1879           |                  | 56,65 |
| G_IC_HEA 320       | 60         | 33,6          |                | 97,66          |             | 3281,51        |               | 3282           |                  | 58,99 |
| G_SC_HEA 320       | 56         | 32,8          |                | 97,66          |             | 3203,38        |               | 3203           |                  | 57,59 |
| G_VB_IPE 300       |            |               |                |                |             |                |               |                |                  |       |
| Reinf              | 24         | 30,6          |                | 45,45          |             | 1390,85        |               | 1391           |                  | 41,67 |
| H_Con_IC           | 24         | 0,24          |                | 97,66          |             | 23,44          |               | 23             |                  | 0,42  |
| H_Con_SC           | 24         | 0,24          |                | 126,7          |             | 30,41          |               | 30             |                  | 0,42  |
| H_DV_UPN 100       | 24         | 59,76         |                | 21,01          |             | 1255,83        |               | 1256           |                  | 43,72 |
| H_IC_HEA 320       | 60         | 33,36         |                | 97,66          |             | 3258,08        |               | 3258           |                  | 58,57 |
| H_SC_HEB 320       | 60         | 33,36         |                | 126,7          |             | 4226,71        |               | 4227           |                  | 59,07 |
| H_VB_IPE 300       | 24         | 30,6          |                | 40,74          |             | 1246,67        |               | 1247           |                  | 36,29 |
| SUP_CI_HEA 320     | 4          | 1,36          |                | 97,66          |             | 132,82         |               | 133            |                  | 2,39  |
| SUP_Con_IC         | 4          | 0,04          |                | 97,66          |             | 3,91           |               | 4              |                  | 0,07  |
| T_CAE 70x7         | 16         | 45,12         |                | 7,38           |             | 332,95         |               | 333            |                  | 12,29 |
| T_Con_IPE450       | 28         | 0,28          |                | 50,49          |             | 14,14          |               | 14             |                  | 0,34  |
| T_IPE 450          | 140        | 73,64         |                | 77,6           |             | 5714,64        |               | 5715           |                  | 118,2 |
| T_Reinf            | 56         | 12,6          |                | 50,49          |             | 636,22         |               | 636            |                  | 15,24 |
| T_SHSC 100x4       | 26         | 94,64         |                | 11,7           |             | 1107,36        |               | 1107           |                  | 36,53 |
| VB_Con_Inf         | 28         | 0,28          |                | 45,45          |             | 12,73          |               | 13             |                  | 0,38  |
| VB_Con_Sup         | 28         | 0,28          |                | 42,26          |             | 11,83          |               | 12             |                  | 0,32  |
| VB_IPE 300         |            |               |                |                |             |                |               |                |                  |       |
| Reinf              | 28         | 32,48         |                | 45,45          |             | 1476,3         |               | 1476           |                  | 44,23 |
| XH_Con_IC          | 4          | 0,04          |                | 97,66          |             | 3,91           |               | 4              |                  | 0,07  |
| XH_Con_SC          | 4          | 0,04          |                | 126,7          |             | 5,07           |               | 5              |                  | 0,07  |
| XH_DV_UPN 100      | 4          | 9,96          |                | 21,01          |             | 209,3          |               | 209            |                  | 7,29  |
| XH_IC_HEA 320      | 8          | 4,16          |                | 97,66          |             | 406,28         |               | 406            |                  | 7,3   |
| XH_SC_HEB          | 12         | 6,16          |                | 126,7          |             | 780,47         |               | 780            |                  | 10,91 |

| Type               | Number | Length (m) | Unit (kG/m) | weight | Bar (kG) | weight | Total (kG) | weight | Painting (m2) | area   |
|--------------------|--------|------------|-------------|--------|----------|--------|------------|--------|---------------|--------|
| 320                |        |            |             |        |          |        |            |        |               |        |
| XH_VB_IPE 300      | 6      | 5,9        |             | 40,74  |          | 240,37 |            | 240    |               | 7      |
| Total              |        |            |             |        |          |        |            | 30928  |               | 676,78 |
| S 355_NoWeight     |        |            |             |        |          |        |            |        |               |        |
| InfRig             | 28     | 0,12       |             | 0      |          | 0      |            | 0      |               | 0      |
| InfRig             | 28     | 0,15       |             | 0      |          | 0      |            | 0      |               | 0      |
| InfRig             | 28     | 0,2        |             | 0      |          | 0      |            | 0      |               | 0      |
| Total per sections |        |            |             |        |          |        |            |        |               |        |
| InfRig             | 84     | 13,16      |             | 0      |          | 0      |            | 0      |               | 0      |
| Total              |        |            |             |        |          |        |            | 0      |               | 0      |
| Total              |        |            |             |        |          |        |            | 30928  |               |        |

Anexo E.15 – Resultados detalhados da pesagem do modelo V0.1.

| Type         | Number | Length (m) | Unit (kG/m) | weight | Bar (kG) | weight | Total (kG) | weight | Painting (m2) | area  |
|--------------|--------|------------|-------------|--------|----------|--------|------------|--------|---------------|-------|
| S 355        |        |            |             |        |          |        |            |        |               |       |
| G_Con_IC     | 24     | 0,01       |             | 97,66  |          | 0,98   |            | 23     |               | 0,42  |
| G_Con_SC     | 20     | 0,01       |             | 97,66  |          | 0,98   |            | 20     |               | 0,35  |
| G_DV_UPN 140 | 24     | 2,46       |             | 31,83  |          | 78,31  |            | 1879   |               | 56,65 |
| G_IC_HEA 320 | 24     | 0,12       |             | 97,66  |          | 11,72  |            | 281    |               | 5,06  |
| G_IC_HEA 320 | 12     | 0,34       |             | 97,66  |          | 33,21  |            | 398    |               | 7,16  |
| G_IC_HEA 320 | 12     | 0,93       |             | 97,66  |          | 90,83  |            | 1090   |               | 19,59 |
| G_IC_HEA 320 | 12     | 1,29       |             | 97,66  |          | 125,99 |            | 1512   |               | 27,18 |
| G_SC_HEA 360 | 24     | 0,09       |             | 112,11 |          | 10,09  |            | 242    |               | 3,96  |
| G_SC_HEA 360 | 8      | 0,14       |             | 112,11 |          | 15,69  |            | 126    |               | 2,05  |
| G_SC_HEA 360 | 12     | 1,15       |             | 112,11 |          | 128,92 |            | 1547   |               | 25,3  |
| G_SC_HEA 360 | 12     | 1,31       |             | 112,11 |          | 146,86 |            | 1762   |               | 28,82 |
| G_VB_IPE 300 |        |            |             |        |          |        |            |        |               |       |
| Reinf        | 12     | 0,4        |             | 45,45  |          | 18,18  |            | 218    |               | 6,54  |
| G_VB_IPE 300 |        |            |             |        |          |        |            |        |               |       |
| Reinf        | 12     | 2,15       |             | 45,45  |          | 97,72  |            | 1173   |               | 35,13 |

| Type             | Number | Length (m) | Unit (kG/m) | weight | Bar (kG) | weight | Total (kG) | weight | Painting (m2) | area  |
|------------------|--------|------------|-------------|--------|----------|--------|------------|--------|---------------|-------|
| H_Con_IC         | 24     | 0,01       |             | 97,66  |          | 0,98   |            | 23     |               | 0,42  |
| H_Con_SC         | 24     | 0,01       |             | 126,7  |          | 1,27   |            | 30     |               | 0,42  |
| H_DV_UPN 100     | 24     | 2,49       |             | 21,01  |          | 52,33  |            | 1256   |               | 43,72 |
| H_IC_HEA 320     | 24     | 0,09       |             | 97,66  |          | 8,79   |            | 211    |               | 3,79  |
| H_IC_HEA 320     | 12     | 0,34       |             | 97,66  |          | 33,21  |            | 398    |               | 7,16  |
| H_IC_HEA 320     | 12     | 0,95       |             | 97,66  |          | 92,78  |            | 1113   |               | 20,01 |
| H_IC_HEA 320     | 12     | 1,31       |             | 97,66  |          | 127,94 |            | 1535   |               | 27,6  |
| H_SC_HEB 450     | 24     | 0,07       |             | 171,17 |          | 11,98  |            | 288    |               | 3,4   |
| H_SC_HEB 450     | 12     | 0,14       |             | 171,17 |          | 23,96  |            | 288    |               | 3,4   |
| H_SC_HEB 450     | 12     | 1,17       |             | 171,17 |          | 200,27 |            | 2403   |               | 28,44 |
| H_SC_HEB 450     | 12     | 1,33       |             | 171,17 |          | 227,66 |            | 2732   |               | 32,33 |
| H_VB_IPE 300     | 12     | 0,4        |             | 40,74  |          | 16,3   |            | 196    |               | 5,69  |
| H_VB_IPE 300     | 12     | 2,15       |             | 40,74  |          | 87,59  |            | 1051   |               | 30,59 |
| SUP_CI_HEA 320   | 4      | 0,34       |             | 97,66  |          | 33,21  |            | 133    |               | 2,39  |
| SUP_Con_IC       | 4      | 0,01       |             | 97,66  |          | 0,98   |            | 4      |               | 0,07  |
| T_CAE 70x7       | 16     | 2,82       |             | 7,38   |          | 20,81  |            | 333    |               | 12,29 |
| T_Con_IPE450     | 28     | 0,01       |             | 50,49  |          | 0,5    |            | 14     |               | 0,34  |
| T_IPE 450        | 14     | 0,2        |             | 77,6   |          | 15,52  |            | 217    |               | 4,49  |
| T_IPE 450        | 28     | 0,25       |             | 77,6   |          | 19,4   |            | 543    |               | 11,24 |
| T_IPE 450        | 28     | 0,28       |             | 77,6   |          | 21,73  |            | 608    |               | 12,58 |
| T_IPE 450        | 14     | 0,3        |             | 77,6   |          | 23,28  |            | 326    |               | 6,74  |
| T_IPE 450        | 28     | 0,6        |             | 77,6   |          | 46,56  |            | 1304   |               | 26,97 |
| T_IPE 450        | 14     | 1,2        |             | 77,6   |          | 93,12  |            | 1304   |               | 26,97 |
| T_IPE 450        | 14     | 1,3        |             | 77,6   |          | 100,88 |            | 1412   |               | 29,21 |
| T_Reinf          | 28     | 0,22       |             | 50,49  |          | 11,11  |            | 311    |               | 7,45  |
| T_Reinf          | 28     | 0,23       |             | 50,49  |          | 11,61  |            | 325    |               | 7,79  |
| T_SHSC 100x4     | 26     | 3,64       |             | 11,7   |          | 42,59  |            | 1107   |               | 36,53 |
| VB_Con_Inf       | 28     | 0,01       |             | 45,45  |          | 0,45   |            | 13     |               | 0,38  |
| VB_Con_Sup       | 28     | 0,01       |             | 42,26  |          | 0,42   |            | 12     |               | 0,32  |
| VB_IPE 300 Reinf | 28     | 1,16       |             | 45,45  |          | 52,73  |            | 1476   |               | 44,23 |

| Type               | Number | Length (m) | Unit weight (kG/m) | Bar weight (kG) | Total weight (kG) | Painting area (m2) |
|--------------------|--------|------------|--------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| XH_Con_IC          | 4      | 0,01       | 97,66              | 0,98            | 4                 | 0,07               |
| XH_Con_SC          | 4      | 0,01       | 126,7              | 1,27            | 5                 | 0,07               |
| XH_DV_UPN 100      | 4      | 2,49       | 21,01              | 52,33           | 209               | 7,29               |
| XH_IC_HEA 320      | 4      | 0,09       | 97,66              | 8,79            | 35                | 0,63               |
| XH_IC_HEA 320      | 4      | 0,95       | 97,66              | 92,78           | 371               | 6,67               |
| XH_SC_HEB 450      | 4      | 0,07       | 171,17             | 11,98           | 48                | 0,57               |
| XH_SC_HEB 450      | 4      | 0,14       | 171,17             | 23,96           | 96                | 1,13               |
| XH_SC_HEB 450      | 4      | 1,33       | 171,17             | 227,66          | 911               | 10,78              |
| XH_VB_IPE 300      | 4      | 0,4        | 40,74              | 16,3            | 65                | 1,9                |
| XH_VB_IPE 300      | 2      | 2,15       | 40,74              | 87,59           | 175               | 5,1                |
| Total per sections |        |            |                    |                 |                   |                    |
| G_Con_IC           | 24     | 0,24       | 97,66              | 23,44           | 23                | 0,42               |
| G_Con_SC           | 20     | 0,2        | 97,66              | 19,53           | 20                | 0,35               |
| G_DV_UPN 140       | 24     | 59,04      | 31,83              | 1879,49         | 1879              | 56,65              |
| G_IC_HEA 320       | 60     | 33,6       | 97,66              | 3281,51         | 3282              | 58,99              |
| G_SC_HEA 360       | 56     | 32,8       | 112,11             | 3677,06         | 3677              | 60,14              |
| G_VB_IPE 300 Reinf | 24     | 30,6       | 45,45              | 1390,85         | 1391              | 41,67              |
| H_Con_IC           | 24     | 0,24       | 97,66              | 23,44           | 23                | 0,42               |
| H_Con_SC           | 24     | 0,24       | 126,7              | 30,41           | 30                | 0,42               |
| H_DV_UPN 100       | 24     | 59,76      | 21,01              | 1255,83         | 1256              | 43,72              |
| H_IC_HEA 320       | 60     | 33,36      | 97,66              | 3258,08         | 3258              | 58,57              |
| H_SC_HEB 450       | 60     | 33,36      | 171,17             | 5710,38         | 5710              | 67,58              |
| H_VB_IPE 300       | 24     | 30,6       | 40,74              | 1246,67         | 1247              | 36,29              |
| SUP_CI_HEA 320     | 4      | 1,36       | 97,66              | 132,82          | 133               | 2,39               |
| SUP_Con_IC         | 4      | 0,04       | 97,66              | 3,91            | 4                 | 0,07               |
| T_CAE 70x7         | 16     | 45,12      | 7,38               | 332,95          | 333               | 12,29              |

| Type                | Numb<br>er | Length<br>(m) | Unit<br>(kG/m) | weight<br>(kG) | Bar<br>(kG) | weight<br>(kG) | Total<br>(kG) | weight<br>(kG) | Painting<br>(m2) | area   |
|---------------------|------------|---------------|----------------|----------------|-------------|----------------|---------------|----------------|------------------|--------|
| T_Con_IPE450        | 28         | 0,28          |                | 50,49          |             | 14,14          |               | 14             |                  | 0,34   |
| T_IPE 450           | 140        | 73,64         |                | 77,6           |             | 5714,64        |               | 5715           |                  | 118,2  |
| T_Reinf             | 56         | 12,6          |                | 50,49          |             | 636,22         |               | 636            |                  | 15,24  |
| T_SHSC 100x4        | 26         | 94,64         |                | 11,7           |             | 1107,36        |               | 1107           |                  | 36,53  |
| VB_Con_Inf          | 28         | 0,28          |                | 45,45          |             | 12,73          |               | 13             |                  | 0,38   |
| VB_Con_Sup          | 28         | 0,28          |                | 42,26          |             | 11,83          |               | 12             |                  | 0,32   |
| VB_IPE 300<br>Reinf | 28         | 32,48         |                | 45,45          |             | 1476,3         |               | 1476           |                  | 44,23  |
| XH_Con_IC           | 4          | 0,04          |                | 97,66          |             | 3,91           |               | 4              |                  | 0,07   |
| XH_Con_SC           | 4          | 0,04          |                | 126,7          |             | 5,07           |               | 5              |                  | 0,07   |
| XH_DV_UPN<br>100    | 4          | 9,96          |                | 21,01          |             | 209,3          |               | 209            |                  | 7,29   |
| XH_IC_HEA<br>320    | 8          | 4,16          |                | 97,66          |             | 406,28         |               | 406            |                  | 7,3    |
| XH_SC_HEB<br>450    | 12         | 6,16          |                | 171,17         |             | 1054,44        |               | 1054           |                  | 12,48  |
| XH_VB_IPE 300       | 6          | 5,9           |                | 40,74          |             | 240,37         |               | 240            |                  | 7      |
| Total               |            |               |                |                |             |                |               | 33159          |                  | 689,42 |
| S 355_NoWeight      |            |               |                |                |             |                |               |                |                  |        |
| InfRig              | 28         | 0,12          |                | 0              |             | 0              |               | 0              |                  | 0      |
| InfRig              | 28         | 0,15          |                | 0              |             | 0              |               | 0              |                  | 0      |
| InfRig              | 28         | 0,2           |                | 0              |             | 0              |               | 0              |                  | 0      |
| Total per sections  |            |               |                |                |             |                |               |                |                  |        |
| InfRig              | 84         | 13,16         |                | 0              |             | 0              |               | 0              |                  | 0      |
| Total               |            |               |                |                |             |                |               | 0              |                  | 0      |
| Total               |            |               |                |                |             |                |               | 33159          |                  |        |

Anexo E.16 – Resultados detalhados da pesagem do modelo V1.0.

| Type   | Numb<br>er | Length<br>(m) | Unit<br>(kG/m) | weight<br>(kG) | Bar<br>(kG) | weight<br>(kG) | Total<br>(kG) | weight<br>(kG) | Painting<br>(m2) | area  |
|--------|------------|---------------|----------------|----------------|-------------|----------------|---------------|----------------|------------------|-------|
| C35    |            |               |                |                |             |                |               |                |                  |       |
| W15*15 | 28         | 2,19          |                | 9              |             | 19,71          |               | 552            |                  | 36,79 |

| Type               | Number | Length (m) | Unit (kG/m) | weight | Bar (kG) | weight | Total (kG) | weight | Painting (m2) | area  |
|--------------------|--------|------------|-------------|--------|----------|--------|------------|--------|---------------|-------|
| Total per sections |        |            |             |        |          |        |            |        |               |       |
| W15*15             | 28     | 61,32      |             | 9      |          | 551,88 |            | 552    |               | 36,79 |
| Total              |        |            |             |        |          |        |            | 552    |               | 36,79 |
| S 355              |        |            |             |        |          |        |            |        |               |       |
| G_DV_UPN 140       | 24     | 2,46       |             | 31,83  |          | 78,31  |            | 1879   |               | 56,65 |
| G_IC_HEA 340       | 24     | 0,12       |             | 104,81 |          | 12,58  |            | 302    |               | 5,17  |
| G_IC_HEA 340       | 16     | 0,35       |             | 104,81 |          | 36,68  |            | 587    |               | 10,05 |
| G_IC_HEA 340       | 12     | 0,94       |             | 104,81 |          | 98,53  |            | 1182   |               | 20,24 |
| G_IC_HEA 340       | 12     | 1,29       |             | 104,81 |          | 135,21 |            | 1623   |               | 27,78 |
| G_VB_IPE 300       |        |            |             |        |          |        |            |        |               |       |
| Reinf              | 12     | 0,4        |             | 45,45  |          | 18,18  |            | 218    |               | 6,54  |
| G_VB_IPE 300       |        |            |             |        |          |        |            |        |               |       |
| Reinf              | 12     | 2,15       |             | 45,45  |          | 97,72  |            | 1173   |               | 35,13 |
| HEA 340            | 24     | 0,09       |             | 104,81 |          | 9,43   |            | 226    |               | 3,88  |
| HEA 340            | 8      | 0,15       |             | 104,81 |          | 15,72  |            | 126    |               | 2,15  |
| HEA 340            | 48     | 0,29       |             | 104,81 |          | 30,4   |            | 1459   |               | 24,98 |
| HEA 340            | 48     | 0,33       |             | 104,81 |          | 34,59  |            | 1660   |               | 28,43 |
| HEB 340            | 28     | 0,07       |             | 134,2  |          | 9,39   |            | 263    |               | 3,55  |
| HEB 340            | 16     | 0,15       |             | 134,2  |          | 20,13  |            | 322    |               | 4,34  |
| HEB 340            | 48     | 0,3        |             | 134,2  |          | 40,26  |            | 1933   |               | 26,06 |
| HEB 340            | 64     | 0,34       |             | 134,2  |          | 45,63  |            | 2920   |               | 39,38 |
| H_DV_UPN 100       | 24     | 2,49       |             | 21,01  |          | 52,33  |            | 1256   |               | 43,72 |
| H_IC_HEA 340       | 28     | 0,09       |             | 104,81 |          | 9,43   |            | 264    |               | 4,52  |
| H_IC_HEA 340       | 12     | 0,35       |             | 104,81 |          | 36,68  |            | 440    |               | 7,54  |
| H_IC_HEA 340       | 16     | 0,96       |             | 104,81 |          | 100,62 |            | 1610   |               | 27,57 |
| H_IC_HEA 340       | 12     | 1,31       |             | 104,81 |          | 137,31 |            | 1648   |               | 28,21 |
| H_VB_IPE 300       | 12     | 0,4        |             | 40,74  |          | 16,3   |            | 196    |               | 5,69  |
| H_VB_IPE 300       | 12     | 2,15       |             | 40,74  |          | 87,59  |            | 1051   |               | 30,59 |
| T_CAE 70x7         | 16     | 2,82       |             | 7,38   |          | 20,81  |            | 333    |               | 12,29 |
| T_Con_IPE450       | 28     | 0,01       |             | 50,49  |          | 0,5    |            | 14     |               | 0,34  |
| T_IPE 450          | 14     | 0,2        |             | 77,6   |          | 15,52  |            | 217    |               | 4,49  |
| T_IPE 450          | 28     | 0,28       |             | 77,6   |          | 21,73  |            | 608    |               | 12,58 |

| Type               | Number | Length (m) | Unit (kG/m) | weight | Bar (kG) | weight  | Total (kG) | weight | Painting (m2) | area   |
|--------------------|--------|------------|-------------|--------|----------|---------|------------|--------|---------------|--------|
| T_IPE 450          | 14     | 0,3        |             | 77,6   |          | 23,28   |            | 326    |               | 6,74   |
| T_IPE 450          | 28     | 0,6        |             | 77,6   |          | 46,56   |            | 1304   |               | 26,97  |
| T_IPE 450          | 14     | 1,2        |             | 77,6   |          | 93,12   |            | 1304   |               | 26,97  |
| T_IPE 450          | 28     | 1,25       |             | 77,6   |          | 97      |            | 2716   |               | 56,18  |
| T_IPE 450          | 14     | 1,3        |             | 77,6   |          | 100,88  |            | 1412   |               | 29,21  |
| T_Reinf            | 28     | 0,22       |             | 50,49  |          | 11,11   |            | 311    |               | 7,45   |
| T_Reinf            | 28     | 0,23       |             | 50,49  |          | 11,61   |            | 325    |               | 7,79   |
| T_SHSC 100x4       | 26     | 3,64       |             | 11,7   |          | 42,59   |            | 1107   |               | 36,53  |
| VB_Con_Inf         | 28     | 0,01       |             | 45,45  |          | 0,45    |            | 13     |               | 0,38   |
| VB_Con_Sup         | 28     | 0,01       |             | 42,26  |          | 0,42    |            | 12     |               | 0,32   |
| VB_IPE 300 Reinf   | 28     | 1,16       |             | 45,45  |          | 52,73   |            | 1476   |               | 44,23  |
| XH_DV_UPN 100      | 4      | 2,49       |             | 21,01  |          | 52,33   |            | 209    |               | 7,29   |
| XH_VB_IPE 300      | 4      | 0,4        |             | 40,74  |          | 16,3    |            | 65     |               | 1,9    |
| XH_VB_IPE 300      | 2      | 2,15       |             | 40,74  |          | 87,59   |            | 175    |               | 5,1    |
| Total per sections |        |            |             |        |          |         |            |        |               |        |
| G_DV_UPN 140       | 24     | 59,04      |             | 31,83  |          | 1879,49 |            | 1879   |               | 56,65  |
| G_IC_HEA 340       | 64     | 35,24      |             | 104,81 |          | 3693,65 |            | 3694   |               | 63,24  |
| G_VB_IPE 300 Reinf | 24     | 30,6       |             | 45,45  |          | 1390,85 |            | 1391   |               | 41,67  |
| HEA 340            | 128    | 33,12      |             | 104,81 |          | 3471,44 |            | 3471   |               | 59,44  |
| HEB 340            | 156    | 40,52      |             | 134,2  |          | 5437,92 |            | 5438   |               | 73,33  |
| H_DV_UPN 100       | 24     | 59,76      |             | 21,01  |          | 1255,83 |            | 1256   |               | 43,72  |
| H_IC_HEA 340       | 68     | 37,8       |             | 104,81 |          | 3961,97 |            | 3962   |               | 67,84  |
| H_VB_IPE 300       | 24     | 30,6       |             | 40,74  |          | 1246,67 |            | 1247   |               | 36,29  |
| T_CAE 70x7         | 16     | 45,12      |             | 7,38   |          | 332,95  |            | 333    |               | 12,29  |
| T_Con_IPE450       | 28     | 0,28       |             | 50,49  |          | 14,14   |            | 14     |               | 0,34   |
| T_IPE 450          | 140    | 101,64     |             | 77,6   |          | 7887,5  |            | 7888   |               | 163,15 |
| T_Reinf            | 56     | 12,6       |             | 50,49  |          | 636,22  |            | 636    |               | 15,24  |
| T_SHSC 100x4       | 26     | 94,64      |             | 11,7   |          | 1107,36 |            | 1107   |               | 36,53  |
| VB_Con_Inf         | 28     | 0,28       |             | 45,45  |          | 12,73   |            | 13     |               | 0,38   |

| Type               | Number | Length (m) | Unit (kG/m) | weight | Bar (kG) | weight | Total (kG) | weight | Painting (m2) | area   |
|--------------------|--------|------------|-------------|--------|----------|--------|------------|--------|---------------|--------|
| VB_Con_Sup         | 28     | 0,28       |             | 42,26  |          | 11,83  |            | 12     |               | 0,32   |
| VB_IPE 300         |        |            |             |        |          |        |            |        |               |        |
| Reinf              | 28     | 32,48      |             | 45,45  |          | 1476,3 |            | 1476   |               | 44,23  |
| XH_DV_UPN 100      | 4      | 9,96       |             | 21,01  |          | 209,3  |            | 209    |               | 7,29   |
| XH_VB_IPE 300      | 6      | 5,9        |             | 40,74  |          | 240,37 |            | 240    |               | 7      |
| Total              |        |            |             |        |          |        |            | 34267  |               | 728,93 |
| S 355_NoWeight     |        |            |             |        |          |        |            |        |               |        |
| InfRig             | 28     | 0,12       |             | 0      |          | 0      |            | 0      |               | 0      |
| InfRig             | 28     | 0,15       |             | 0      |          | 0      |            | 0      |               | 0      |
| InfRig             | 28     | 0,2        |             | 0      |          | 0      |            | 0      |               | 0      |
| Total per sections |        |            |             |        |          |        |            |        |               |        |
| InfRig             | 84     | 13,16      |             | 0      |          | 0      |            | 0      |               | 0      |
| Total              |        |            |             |        |          |        |            | 0      |               | 0      |
| Total              |        |            |             |        |          |        |            | 34819  |               |        |

## Anexo E.17 – Resultados detalhados da pesagem do modelo V1.1.

| Type               | Number | Length (m) | Unit (kG/m) | weight | Bar (kG) | weight  | Total (kG) | weight | Painting (m2) | area   |
|--------------------|--------|------------|-------------|--------|----------|---------|------------|--------|---------------|--------|
| C35                |        |            |             |        |          |         |            |        |               |        |
| W30*30             | 28     | 1          |             | 36     |          | 36      |            | 1008   |               | 33,6   |
| W30*30             | 26     | 1,3        |             | 36     |          | 46,8    |            | 1217   |               | 40,56  |
| W30*30             | 54     | 2,18       |             | 36     |          | 78,48   |            | 4238   |               | 141,26 |
| W30*30             | 26     | 2,8        |             | 36     |          | 100,8   |            | 2621   |               | 87,36  |
| Total per sections |        |            |             |        |          |         |            |        |               |        |
| W30*30             | 134    | 252,32     |             | 36     |          | 9083,52 |            | 9084   |               | 302,78 |
| Total              |        |            |             |        |          |         |            | 9084   |               | 302,78 |
| S 355              |        |            |             |        |          |         |            |        |               |        |
| G_DV_UPN 140       | 24     | 2,46       |             | 31,83  |          | 78,31   |            | 1879   |               | 56,65  |
| G_IC_HEA 320       | 24     | 0,12       |             | 97,66  |          | 11,72   |            | 281    |               | 5,06   |
| G_IC_HEA 320       | 12     | 0,35       |             | 97,66  |          | 34,18   |            | 410    |               | 7,37   |

| Type           | Number | Length (m) | Unit (kG/m) | weight (kG) | Bar (kG) | weight (kG) | Total (kG) | weight (kG) | Painting (m2) | area  |
|----------------|--------|------------|-------------|-------------|----------|-------------|------------|-------------|---------------|-------|
| G_IC_HEA 320   | 12     | 0,94       |             | 97,66       |          | 91,8        |            | 1102        |               | 19,8  |
| G_IC_HEA 320   | 12     | 1,29       |             | 97,66       |          | 125,99      |            | 1512        |               | 27,18 |
| G_VB_IPE 300   |        |            |             |             |          |             |            |             |               |       |
| Reinf          | 12     | 0,4        |             | 45,45       |          | 18,18       |            | 218         |               | 6,54  |
| G_VB_IPE 300   |        |            |             |             |          |             |            |             |               |       |
| Reinf          | 12     | 2,15       |             | 45,45       |          | 97,72       |            | 1173        |               | 35,13 |
| HEA 360        | 24     | 0,09       |             | 112,11      |          | 10,09       |            | 242         |               | 3,96  |
| HEA 360        | 8      | 0,15       |             | 112,11      |          | 16,82       |            | 135         |               | 2,2   |
| HEA 360        | 48     | 0,29       |             | 112,11      |          | 32,51       |            | 1561        |               | 25,52 |
| HEA 360        | 48     | 0,33       |             | 112,11      |          | 36,99       |            | 1776        |               | 29,05 |
| HEB 360        | 28     | 0,07       |             | 141,85      |          | 9,93        |            | 278         |               | 3,62  |
| HEB 360        | 16     | 0,15       |             | 141,85      |          | 21,28       |            | 340         |               | 4,44  |
| HEB 360        | 48     | 0,3        |             | 141,85      |          | 42,55       |            | 2043        |               | 26,62 |
| HEB 360        | 64     | 0,34       |             | 141,85      |          | 48,23       |            | 3087        |               | 40,23 |
| H_DV_UPN 100   | 24     | 2,49       |             | 21,01       |          | 52,33       |            | 1256        |               | 43,72 |
| H_IC_HEA 320   | 24     | 0,09       |             | 97,66       |          | 8,79        |            | 211         |               | 3,79  |
| H_IC_HEA 320   | 12     | 0,35       |             | 97,66       |          | 34,18       |            | 410         |               | 7,37  |
| H_IC_HEA 320   | 12     | 0,96       |             | 97,66       |          | 93,76       |            | 1125        |               | 20,23 |
| H_IC_HEA 320   | 12     | 1,31       |             | 97,66       |          | 127,94      |            | 1535        |               | 27,6  |
| H_VB_IPE 300   | 12     | 0,4        |             | 40,74       |          | 16,3        |            | 196         |               | 5,69  |
| H_VB_IPE 300   | 12     | 2,15       |             | 40,74       |          | 87,59       |            | 1051        |               | 30,59 |
| SUP_CI_HEA 320 | 4      | 0,35       |             | 97,66       |          | 34,18       |            | 137         |               | 2,46  |
| T_CAE 70x7     | 16     | 2,82       |             | 7,38        |          | 20,81       |            | 333         |               | 12,29 |
| T_Con_IPE450   | 28     | 0,01       |             | 50,49       |          | 0,5         |            | 14          |               | 0,34  |
| T_IPE 450      | 14     | 0,2        |             | 77,6        |          | 15,52       |            | 217         |               | 4,49  |
| T_IPE 450      | 28     | 0,25       |             | 77,6        |          | 19,4        |            | 543         |               | 11,24 |
| T_IPE 450      | 28     | 0,28       |             | 77,6        |          | 21,73       |            | 608         |               | 12,58 |
| T_IPE 450      | 14     | 0,3        |             | 77,6        |          | 23,28       |            | 326         |               | 6,74  |
| T_IPE 450      | 28     | 0,6        |             | 77,6        |          | 46,56       |            | 1304        |               | 26,97 |
| T_IPE 450      | 14     | 1,2        |             | 77,6        |          | 93,12       |            | 1304        |               | 26,97 |
| T_IPE 450      | 14     | 1,3        |             | 77,6        |          | 100,88      |            | 1412        |               | 29,21 |

| Type                  | Numb<br>er | Length<br>(m) | Unit<br>(kG/m) | weight<br>(kG) | Bar<br>(kG) | weight<br>(kG) | Total<br>(kG) | weight<br>(kG) | Painting<br>(m2) | area  |
|-----------------------|------------|---------------|----------------|----------------|-------------|----------------|---------------|----------------|------------------|-------|
| T_Reinf               | 28         | 0,22          |                | 50,49          |             | 11,11          |               | 311            |                  | 7,45  |
| T_Reinf               | 28         | 0,23          |                | 50,49          |             | 11,61          |               | 325            |                  | 7,79  |
| T_SHSC 100x4          | 26         | 3,64          |                | 11,7           |             | 42,59          |               | 1107           |                  | 36,53 |
| VB_Con_Inf            | 28         | 0,01          |                | 45,45          |             | 0,45           |               | 13             |                  | 0,38  |
| VB_Con_Sup            | 28         | 0,01          |                | 42,26          |             | 0,42           |               | 12             |                  | 0,32  |
| VB_IPE 300<br>Reinf   | 28         | 1,16          |                | 45,45          |             | 52,73          |               | 1476           |                  | 44,23 |
| XH_DV_UPN<br>100      | 4          | 2,49          |                | 21,01          |             | 52,33          |               | 209            |                  | 7,29  |
| XH_IC_HEA<br>320      | 4          | 0,09          |                | 97,66          |             | 8,79           |               | 35             |                  | 0,63  |
| XH_IC_HEA<br>320      | 4          | 0,96          |                | 97,66          |             | 93,76          |               | 375            |                  | 6,74  |
| XH_VB_IPE 300         | 4          | 0,4           |                | 40,74          |             | 16,3           |               | 65             |                  | 1,9   |
| XH_VB_IPE 300         | 2          | 2,15          |                | 40,74          |             | 87,59          |               | 175            |                  | 5,1   |
| Total per sections    |            |               |                |                |             |                |               |                |                  |       |
| G_DV_UPN 140          | 24         | 59,04         |                | 31,83          |             | 1879,49        |               | 1879           |                  | 56,65 |
| G_IC_HEA 320          | 60         | 33,84         |                | 97,66          |             | 3304,95        |               | 3305           |                  | 59,41 |
| G_VB_IPE 300<br>Reinf | 24         | 30,6          |                | 45,45          |             | 1390,85        |               | 1391           |                  | 41,67 |
| HEA 360               | 128        | 33,12         |                | 112,11         |             | 3712,93        |               | 3713           |                  | 60,73 |
| HEB 360               | 156        | 40,52         |                | 141,85         |             | 5747,69        |               | 5748           |                  | 74,91 |
| H_DV_UPN 100          | 24         | 59,76         |                | 21,01          |             | 1255,83        |               | 1256           |                  | 43,72 |
| H_IC_HEA 320          | 60         | 33,6          |                | 97,66          |             | 3281,51        |               | 3282           |                  | 58,99 |
| H_VB_IPE 300          | 24         | 30,6          |                | 40,74          |             | 1246,67        |               | 1247           |                  | 36,29 |
| SUP_CI_HEA<br>320     | 4          | 1,4           |                | 97,66          |             | 136,73         |               | 137            |                  | 2,46  |
| T_CAE 70x7            | 16         | 45,12         |                | 7,38           |             | 332,95         |               | 333            |                  | 12,29 |
| T_Con_IPE450          | 28         | 0,28          |                | 50,49          |             | 14,14          |               | 14             |                  | 0,34  |
| T_IPE 450             | 140        | 73,64         |                | 77,6           |             | 5714,64        |               | 5715           |                  | 118,2 |
| T_Reinf               | 56         | 12,6          |                | 50,49          |             | 636,22         |               | 636            |                  | 15,24 |
| T_SHSC 100x4          | 26         | 94,64         |                | 11,7           |             | 1107,36        |               | 1107           |                  | 36,53 |
| VB_Con_Inf            | 28         | 0,28          |                | 45,45          |             | 12,73          |               | 13             |                  | 0,38  |

| Type               | Numb<br>er | Length<br>(m) | Unit<br>(kG/m) | weight<br>(kG) | Bar<br>(kG) | weight<br>(kG) | Total<br>(kG) | weight<br>(kG) | Painting<br>(m2) | area   |
|--------------------|------------|---------------|----------------|----------------|-------------|----------------|---------------|----------------|------------------|--------|
| VB_Con_Sup         | 28         | 0,28          |                | 42,26          |             | 11,83          |               | 12             |                  | 0,32   |
| VB_IPE 300         |            |               |                |                |             |                |               |                |                  |        |
| Reinf              | 28         | 32,48         |                | 45,45          |             | 1476,3         |               | 1476           |                  | 44,23  |
| XH_DV_UPN<br>100   | 4          | 9,96          |                | 21,01          |             | 209,3          |               | 209            |                  | 7,29   |
| XH_IC_HEA<br>320   | 8          | 4,2           |                | 97,66          |             | 410,19         |               | 410            |                  | 7,37   |
| XH_VB_IPE 300      | 6          | 5,9           |                | 40,74          |             | 240,37         |               | 240            |                  | 7      |
| Total              |            |               |                |                |             |                |               | 32123          |                  | 684,01 |
| S 355_NoWeight     |            |               |                |                |             |                |               |                |                  |        |
| InfRig             | 28         | 0,12          |                | 0              |             | 0              |               | 0              |                  | 0      |
| InfRig             | 28         | 0,15          |                | 0              |             | 0              |               | 0              |                  | 0      |
| InfRig             | 28         | 0,2           |                | 0              |             | 0              |               | 0              |                  | 0      |
| Total per sections |            |               |                |                |             |                |               |                |                  |        |
| InfRig             | 84         | 13,16         |                | 0              |             | 0              |               | 0              |                  | 0      |
| Total              |            |               |                |                |             |                |               | 0              |                  | 0      |
| Total              |            |               |                |                |             |                |               | 41207          |                  |        |

Anexo E.18 – Resultados detalhados da pesagem do modelo V2.0.

| Type               | Numb<br>er | Length<br>(m) | Unit<br>(kG/m) | weight<br>(kG) | Bar<br>(kG) | weight<br>(kG) | Total<br>(kG) | weight<br>(kG) | Painting<br>(m2) | area   |
|--------------------|------------|---------------|----------------|----------------|-------------|----------------|---------------|----------------|------------------|--------|
| C35                |            |               |                |                |             |                |               |                |                  |        |
| W15*15             | 12         | 1,4           |                | 9              |             | 12,6           |               | 151            |                  | 10,08  |
| W15*15             | 12         | 1,41          |                | 9              |             | 12,69          |               | 152            |                  | 10,15  |
| W15*15             | 24         | 1,98          |                | 9              |             | 17,82          |               | 428            |                  | 28,51  |
| W15*15             | 24         | 1,99          |                | 9              |             | 17,91          |               | 430            |                  | 28,66  |
| W15*15             | 24         | 2,13          |                | 9              |             | 19,17          |               | 460            |                  | 30,67  |
| Total per sections |            |               |                |                |             |                |               |                |                  |        |
| W15*15             | 96         | 180,12        |                | 9              |             | 1621,08        |               | 1621           |                  | 108,07 |
| Total              |            |               |                |                |             |                |               | 1621           |                  | 108,07 |
| S 355              |            |               |                |                |             |                |               |                |                  |        |
| G_DV_UPN 140       | 26         | 0,25          |                | 31,83          |             | 7,96           |               | 207            |                  | 6,24   |

| Type               | Number | Length (m) | Unit (kG/m) | weight (kG) | Bar weight (kG) | Total weight (kG) | Painting area (m2) |
|--------------------|--------|------------|-------------|-------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| G_DV_UPN 140       | 24     | 2,46       |             | 31,83       | 78,31           | 1879              | 56,65              |
| G_IC_HEA 320       | 24     | 0,12       |             | 97,66       | 11,72           | 281               | 5,06               |
| G_IC_HEA 320       | 12     | 0,35       |             | 97,66       | 34,18           | 410               | 7,37               |
| G_IC_HEA 320       | 12     | 0,94       |             | 97,66       | 91,8            | 1102              | 19,8               |
| G_IC_HEA 320       | 12     | 1,29       |             | 97,66       | 125,99          | 1512              | 27,18              |
| G_SC_HEA 320       | 24     | 0,09       |             | 97,66       | 8,79            | 211               | 3,79               |
| G_SC_HEA 320       | 8      | 0,15       |             | 97,66       | 14,65           | 117               | 2,11               |
| G_SC_HEA 320       | 48     | 0,29       |             | 97,66       | 28,32           | 1359              | 24,44              |
| G_SC_HEA 320       | 48     | 0,33       |             | 97,66       | 32,23           | 1547              | 27,81              |
| G_VB_IPE 300 Reinf | 12     | 0,4        |             | 45,45       | 18,18           | 218               | 6,54               |
| G_VB_IPE 300 Reinf | 12     | 2,15       |             | 45,45       | 97,72           | 1173              | 35,13              |
| HEB 340            | 28     | 0,07       |             | 134,2       | 9,39            | 263               | 3,55               |
| HEB 340            | 16     | 0,15       |             | 134,2       | 20,13           | 322               | 4,34               |
| HEB 340            | 48     | 0,3        |             | 134,2       | 40,26           | 1933              | 26,06              |
| HEB 340            | 64     | 0,34       |             | 134,2       | 45,63           | 2920              | 39,38              |
| H_DV_UPN 100       | 24     | 2,49       |             | 21,01       | 52,33           | 1256              | 43,72              |
| H_IC_HEA 320       | 24     | 0,09       |             | 97,66       | 8,79            | 211               | 3,79               |
| H_IC_HEA 320       | 12     | 0,35       |             | 97,66       | 34,18           | 410               | 7,37               |
| H_IC_HEA 320       | 12     | 0,96       |             | 97,66       | 93,76           | 1125              | 20,23              |
| H_IC_HEA 320       | 12     | 1,31       |             | 97,66       | 127,94          | 1535              | 27,6               |
| H_VB_IPE 300       | 12     | 0,4        |             | 40,74       | 16,3            | 196               | 5,69               |
| H_VB_IPE 300       | 12     | 2,15       |             | 40,74       | 87,59           | 1051              | 30,59              |
| SUP_CI_HEA 320     | 4      | 0,35       |             | 97,66       | 34,18           | 137               | 2,46               |
| T_CAE 70x7         | 16     | 2,82       |             | 7,38        | 20,81           | 333               | 12,29              |
| T_Con_IPE450       | 28     | 0,01       |             | 50,49       | 0,5             | 14                | 0,34               |
| T_IPE 450          | 14     | 0,2        |             | 77,6        | 15,52           | 217               | 4,49               |
| T_IPE 450          | 28     | 0,28       |             | 77,6        | 21,73           | 608               | 12,58              |
| T_IPE 450          | 14     | 0,3        |             | 77,6        | 23,28           | 326               | 6,74               |
| T_IPE 450          | 28     | 0,6        |             | 77,6        | 46,56           | 1304              | 26,97              |

| Type               | Number | Length (m) | Unit (kG/m) | weight (kG) | Bar (kG) | weight (kG) | Total (kG) | weight (kG) | Painting (m2) | area   |
|--------------------|--------|------------|-------------|-------------|----------|-------------|------------|-------------|---------------|--------|
| T_IPE 450          | 14     | 1,2        |             | 77,6        |          | 93,12       |            | 1304        |               | 26,97  |
| T_IPE 450          | 14     | 1,3        |             | 77,6        |          | 100,88      |            | 1412        |               | 29,21  |
| T_Reinf            | 28     | 0,22       |             | 50,49       |          | 11,11       |            | 311         |               | 7,45   |
| T_Reinf            | 28     | 0,23       |             | 50,49       |          | 11,61       |            | 325         |               | 7,79   |
| T_SHSC 100x4       | 26     | 3,64       |             | 11,7        |          | 42,59       |            | 1107        |               | 36,53  |
| VB_Con_Inf         | 28     | 0,01       |             | 45,45       |          | 0,45        |            | 13          |               | 0,38   |
| VB_Con_Sup         | 28     | 0,01       |             | 42,26       |          | 0,42        |            | 12          |               | 0,32   |
| VB_IPE 300 Reinf   | 28     | 1,16       |             | 45,45       |          | 52,73       |            | 1476        |               | 44,23  |
| XH_DV_UPN 100      | 4      | 2,49       |             | 21,01       |          | 52,33       |            | 209         |               | 7,29   |
| XH_IC_HEA 320      | 4      | 0,09       |             | 97,66       |          | 8,79        |            | 35          |               | 0,63   |
| XH_IC_HEA 320      | 4      | 0,96       |             | 97,66       |          | 93,76       |            | 375         |               | 6,74   |
| XH_VB_IPE 300      | 4      | 0,4        |             | 40,74       |          | 16,3        |            | 65          |               | 1,9    |
| XH_VB_IPE 300      | 2      | 2,15       |             | 40,74       |          | 87,59       |            | 175         |               | 5,1    |
| Total per sections |        |            |             |             |          |             |            |             |               |        |
| G_DV_UPN 140       | 50     | 65,54      |             | 31,83       |          | 2086,41     |            | 2086        |               | 62,89  |
| G_IC_HEA 320       | 60     | 33,84      |             | 97,66       |          | 3304,95     |            | 3305        |               | 59,41  |
| G_SC_HEA 320       | 128    | 33,12      |             | 97,66       |          | 3234,64     |            | 3235        |               | 58,15  |
| G_VB_IPE 300 Reinf | 24     | 30,6       |             | 45,45       |          | 1390,85     |            | 1391        |               | 41,67  |
| HEB 340            | 156    | 40,52      |             | 134,2       |          | 5437,92     |            | 5438        |               | 73,33  |
| H_DV_UPN 100       | 24     | 59,76      |             | 21,01       |          | 1255,83     |            | 1256        |               | 43,72  |
| H_IC_HEA 320       | 60     | 33,6       |             | 97,66       |          | 3281,51     |            | 3282        |               | 58,99  |
| H_VB_IPE 300       | 24     | 30,6       |             | 40,74       |          | 1246,67     |            | 1247        |               | 36,29  |
| SUP_CI_HEA 320     | 4      | 1,4        |             | 97,66       |          | 136,73      |            | 137         |               | 2,46   |
| T_CAE 70x7         | 16     | 45,12      |             | 7,38        |          | 332,95      |            | 333         |               | 12,29  |
| T_Con_IPE450       | 28     | 0,28       |             | 50,49       |          | 14,14       |            | 14          |               | 0,34   |
| T_IPE 450          | 112    | 66,64      |             | 77,6        |          | 5171,42     |            | 5171        |               | 106,97 |
| T_Reinf            | 56     | 12,6       |             | 50,49       |          | 636,22      |            | 636         |               | 15,24  |

| Type               | Number | Length (m) | Unit (kG/m) | weight | Bar (kG) | weight  | Total (kG) | weight | Painting (m2) | area   |
|--------------------|--------|------------|-------------|--------|----------|---------|------------|--------|---------------|--------|
| T_SHSC 100x4       | 26     | 94,64      |             | 11,7   |          | 1107,36 |            | 1107   |               | 36,53  |
| VB_Con_Inf         | 28     | 0,28       |             | 45,45  |          | 12,73   |            | 13     |               | 0,38   |
| VB_Con_Sup         | 28     | 0,28       |             | 42,26  |          | 11,83   |            | 12     |               | 0,32   |
| VB_IPE 300 Reinf   | 28     | 32,48      |             | 45,45  |          | 1476,3  |            | 1476   |               | 44,23  |
| XH_DV_UPN 100      | 4      | 9,96       |             | 21,01  |          | 209,3   |            | 209    |               | 7,29   |
| XH_IC_HEA 320      | 8      | 4,2        |             | 97,66  |          | 410,19  |            | 410    |               | 7,37   |
| XH_VB_IPE 300      | 6      | 5,9        |             | 40,74  |          | 240,37  |            | 240    |               | 7      |
| Total              |        |            |             |        |          |         |            | 30998  |               | 674,85 |
| S 355_NoWeight     |        |            |             |        |          |         |            |        |               |        |
| InfRig             | 28     | 0,12       |             | 0      |          | 0       |            | 0      |               | 0      |
| InfRig             | 28     | 0,15       |             | 0      |          | 0       |            | 0      |               | 0      |
| InfRig             | 28     | 0,2        |             | 0      |          | 0       |            | 0      |               | 0      |
| Total per sections |        |            |             |        |          |         |            |        |               |        |
| InfRig             | 84     | 13,16      |             | 0      |          | 0       |            | 0      |               | 0      |
| Total              |        |            |             |        |          |         |            | 0      |               | 0      |
| Total              |        |            |             |        |          |         |            | 32619  |               |        |