



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
Centro de Tecnologia e Ciências  
Faculdade de Engenharia

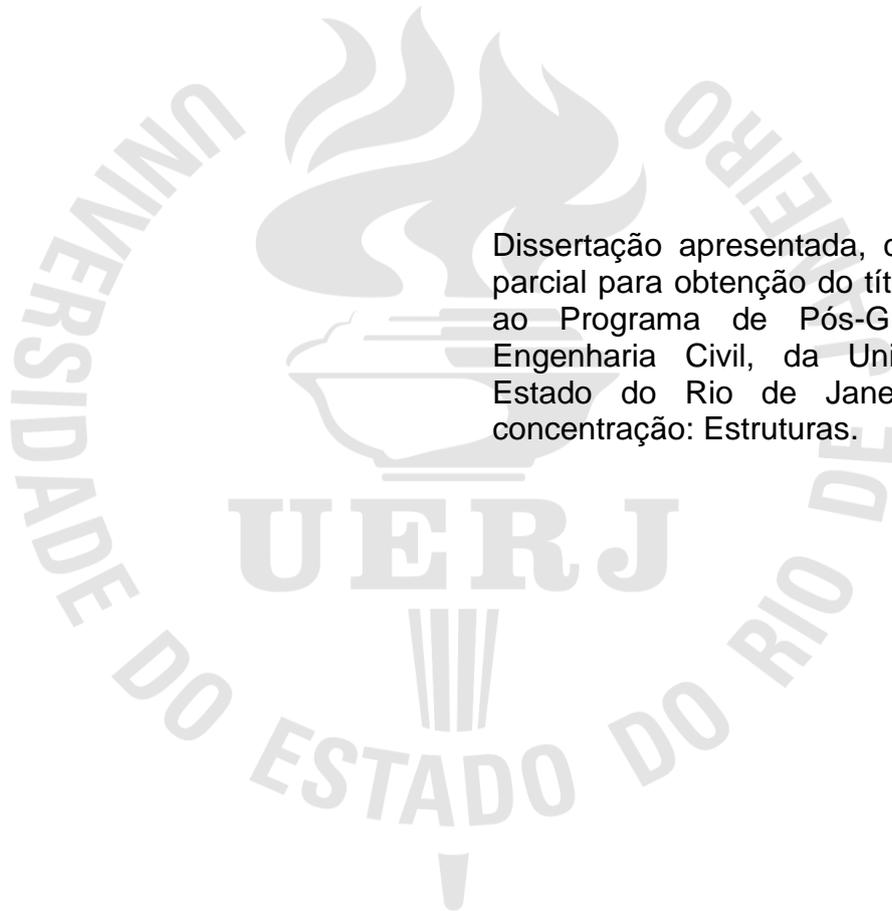
Lucas Pinheiro Mariano

**Comportamento do perfil C em aço inoxidável à flexão**

Rio de Janeiro  
2021

Lucas Pinheiro Mariano

## Comportamento do perfil C em aço inoxidável à flexão



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Monique Cordeiro Rodrigues

Rio de Janeiro

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M333 Mariano, Lucas Pinheiro.  
Comportamento do perfil C em aço inoxidável à flexão / Lucas  
Pinheiro Mariano. – 2021.  
206f.

Orientadores: Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco,  
Monique  
Cordeiro Rodrigues.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Aço inoxidável - Teses. 3.  
Análise estrutural (Engenharia) - Teses. 4. Flexão (Engenharia  
civil) - Teses. 5. Resistência de materiais - Teses. I. Vellasco,  
Pedro Colmar Gonçalves da Silva. II. Rodrigues, Monique  
Cordeiro. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro,  
Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.014.2

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial  
desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Lucas Pinheiro Mariano

## Comportamento do perfil C em aço inoxidável à flexão

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 26 de fevereiro de 2021.

Banca Examinadora:



---

Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco (Orientador)

Faculdade de Engenharia – UERJ



---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Monique Cordeiro Rodrigues (Orientadora)

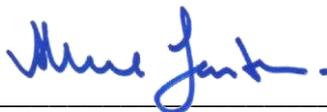
Faculdade de Engenharia – UERJ



---

Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Faculdade de Engenharia – UERJ



---

Prof. Dr. Alexandre Landesmann

COPPE – UFRJ

Rio de Janeiro

2021

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Carlos Mariano e Claudia Mariano por sempre incentivarem a continuidade de meus estudos e serem o suporte que sempre precisei nos melhores e piores momentos ao longo de toda minha jornada.

Aos meus orientadores, Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco e Monique Cordeiro Rodrigues, por todo o tempo dedicado e conhecimento transmitido durante não só a elaboração deste trabalho, como também ao longo de todo meu percurso na vida acadêmica.

Aos funcionários do laboratório de Engenharia Civil da UERJ, em especial ao professor Manuel Augusto, que sempre estiveram presentes e dispostos a ajudar.

Aos outros professores, que durante os anos de mestrado e graduação sempre estiveram presentes com disposição e paciência me incentivando a persistir com os estudos.

A minha namorada Ester Maia que compartilha afeto, amor e carinho, compreendendo-me e me estimulando nos momentos de dificuldade.

A todos meus demais amigos e familiares que estiveram ao meu lado durante a elaboração desse trabalho. Agradeço muito pelas conversas e incentivo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A Universidade do Estado do Rio de Janeiro, sem ela nada disso seria possível.

A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez.

*George Bernard Shaw*

## RESUMO

MARIANO, Lucas Pinheiro. *Comportamento do perfil C em aço inoxidável à flexão*. 2021. 206f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

Aumentou-se a utilização do aço na engenharia civil como elemento estrutural nos últimos anos, elevando assim o número de pesquisas acadêmicas relacionados à análise do comportamento do aço como elemento estrutural sob efeitos de esforços axiais, de flexão e torção. Particularmente, o emprego do aço inoxidável pode ser destacado, sendo necessário o aprofundamento da investigação para melhoria do seu dimensionamento já presente em algumas normas vigentes. A utilização de aço inoxidável apresenta melhores resultados quanto à corrosão, durabilidade, resistência mecânica e às altas temperaturas, além do seu menor custo de manutenção, quando comparado ao aço carbono. Porém, o seu dimensionamento atual mostra-se limitante, sendo utilizado como principal base o Eurocode 3, Parte 1-4 que foi desenvolvido por meio de correlações com os parâmetros de dimensionamento do aço carbono, não sendo representado todo o acréscimo de resistência possível devido ao seu encruamento. Algumas propostas mais recentes estão sendo desenvolvidas e aplicadas como, por exemplo, o Método da Resistência Contínua (*Continuous Strength Method* - CSM), que busca obter um melhor resultado considerando o encruamento do aço no seu cálculo. Para entender melhor o comportamento desse material e verificar as eficiências desses dimensionamentos, esse trabalho analisa por meio de modelos de elementos finitos desenvolvido no programa ANSYS, o comportamento de perfis C sujeitos a flexão sob o eixo de menor inércia, considerando as duas situações, com sua alma sob tração e sob compressão, de forma a estudar as diferenças entre as duas situações. Estes resultados foram comparados aos resultados dos dimensionamentos teóricos encontrados pelo Eurocode e CSM, sendo possível observar o conservadorismo da resistência do aço inoxidável para as duas posições analisadas, com resultados mais distantes para o Eurocode. Essas análises e resultados foram usadas para o desenvolvimento de algumas propostas para alterações de ambos os dimensionamentos de forma a otimizá-los. A escolha desse perfil dá-se devido a não existência de dupla simetria de sua seção transversal, que é menos usual que os perfis I, mais empregados para elementos à flexão.

Palavras-chave: Aço inoxidável; Perfil C; Flexão; Análise Numérica; Método da Resistência Contínua.

## ABSTRACT

MARIANO, Lucas Pinheiro. Behaviour of stainless steel channel sections to flexural response. 2021. 206f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

The use of steel in civil engineering as a structural element has increased in recent years, thus increasing the number of academic researches related to the analysis of the behaviour of steel as a structural element under the effects of axial, bending and torsion efforts. Particularly, the use of stainless steel can be highlighted, being necessary to deepen the investigation to improve its design rules already present in some current standards. The use of stainless steel presents better results in terms of corrosion, durability, mechanical resistance and high temperatures, in addition to its lower maintenance cost, when compared to carbon steel. However, its current design is limiting, with Eurocode 3, Part 1-4 being used as the main standard, which was developed through correlations with the design parameters of carbon steel, not representing all the possible increase in strength due to its hardening. Some more recent proposals are being developed and applied, such as, for example, the Continuous Strength Method (CSM), which seeks to obtain a better result considering the hardening of steel in its calculation. To better understand the behaviour of this material and verify the efficiencies of these design, this work analyzes through finite element models developed in the ANSYS software, the behaviour of channels cross-section subject to minor axis bending, considering the two situations, with your web under tension and compression, to study the differences between the two situations. These results were compared to the results of the previous theoretical design by Eurocode and CSM, being possible to observe the conservatism of the resistance of stainless steel for the two analyzed positions, with more distant results for Eurocode. These analyzes and results were used for the development of some proposals for changes to both designs to optimize them. The choice of this profile is due to the lack of double symmetry of its cross-section, which is less usual than I profiles, which are more used for flexural elements.

Keywords: Stainless steel; Channels; Bending; Numerical analysis; Continuous Strength Method.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Classificação da AISI/SEA (Adaptado de [5]).....  | 23 |
| Figura 2 – Dimensões de um perfil C – apresentação simplificada.....   | 26 |
| Figura 3 – Curva tensão <i>versus</i> deformação típicas do aço carbono e o aço inoxidável (Tylek e Kuctha, 2014 apud [23]).....   | 31 |
| Figura 4 – Posições ensaiadas do perfil C (adaptado de [10]). .....  | 32 |
| Figura 5 – Demonstração da distribuição de seções de um Perfil T para o CSM [20].<br>.....   | 37 |
| Figura 6 – Comparação dos resultados experimentais e numéricos com a proposta do CSM e o dimensionamento do Eurocode 3, Parte 1.4, para perfis C [20]. .....   | 37 |
| Figura 7 – Comparação dos resultados experimentais e numéricos com a proposta do CSM e o dimensionamento do Eurocode 3, Parte 1.4, para perfis C ensaiados experimentalmente por Theofanous et al. (Adaptado de [20]). ..... | 38 |
| Figura 8 – Curva tensão <i>versus</i> deformação para perfil de aço inoxidável SHS 80x80 [22]. .....   | 39 |
| Figura 9 – Curva tensão <i>versus</i> deformação para perfil de aço inoxidável SHS 80x80 com Ramberg-Osgood modificado [22]. .....   | 40 |
| Figura 10 – Curva típica do aço inoxidável laminado a quente e modelo proposto [19]. .....   | 48 |
| Figura 11 – Resultados do CUFSM. [31].....   | 50 |
| Figura 12 – Comparação da distribuição de tensões normais para seções esbeltas segundo o EN 1993-1-4 e o CSM (Adaptado de [32]).....   | 51 |
| Figura 13 – Nomenclatura dos modelos.....  | 52 |
| Figura 14 – Posicionamento dos LVDTs. ....   | 54 |
| Figura 15 – Configuração da verificação das imperfeições iniciais da alma do perfil C80X80X3X3.....  | 55 |
| Figura 16 – Desenvolvimento das leituras dos LVDTs ao longo comprimento do perfil C80X80X3x3 denominado 1500-1. ....   | 56 |
| Figura 17 – Dimensões medidas.....   | 58 |
| Figura 18 – Exemplo de determinação da tensão de escoamento aproximada ( $f_{0,2}$ ).60  |    |
| Figura 19 – Corpos de prova segundo o anexo B. ....  | 62 |
| Figura 20 – Corpos de prova segundo o anexo D.....   | 62 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 21 – Corpos de prova na máquina INSTRON 3382. ....   | 63 |
| Figura 22 – Corpos de prova na antes e depois do ensaio. ....   | 63 |
| Figura 23 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação C80x80x3x3. ....   | 64 |
| Figura 24 – Localização dos extensômetros nos perfis. ....  | 65 |
| Figura 25 – Perfis preparados para o ensaio. ....   | 66 |
| Figura 26 – Perfil preparado para o ensaio. ....  | 67 |
| Figura 27 – Deformadas dos perfis após os ensaios. ....   | 67 |
| Figura 28 – Curva tensão <i>versus</i> deformação do ensaio à compressão do perfil C40x40x5x5. ....                             | 68 |
| Figura 29 – Curva tensão <i>versus</i> deformação do ensaio à compressão do perfil C80x80x3x3. ....                             | 69 |
| Figura 30 – Ensaio Experimental [10]. ....  | 72 |
| Figura 31 – Elementos empregados no modelo numérico [9]. ....   | 74 |
| Figura 32 – Curva tensão <i>versus</i> deformação do material – tentativas MEF. ....  | 76 |
| Figura 33 – Exemplo de malha – Elemento de casca. ....  | 78 |
| Figura 34 – Peças intermediárias no perfil C [10]. ....   | 79 |
| Figura 35 – Peças intermediárias simuladas para os elementos de casca. ....   | 79 |
| Figura 36 – Peças intermediárias simuladas para os elementos sólidos. ....  | 79 |
| Figura 37 – Erro na representação da espessura do elemento de casca no modelo. ....   | 81 |
| Figura 38 – Avaliação do modo de falha da seção no meio do vão – elementos de casca. ....                                       | 81 |
| Figura 39 – Elementos de massa. ....  | 82 |
| Figura 40 – Restrições no perfil. ....  | 82 |
| Figura 41 – Esquema da aplicação de carga para as posições do perfil. ....  | 83 |
| Figura 42 – C40X40X5X5 - Curva $M/M_{pl}$ <i>versus</i> $\theta/\theta_{pl}$ - Imperfeição. ....                                | 85 |
| Figura 43 – C100X50X4X4 - Curva $M/M_{pl}$ <i>versus</i> $\theta/\theta_{pl}$ - Imperfeição. ....                               | 86 |
| Figura 44 – C100X50X6X9 - Curva $M/M_{pl}$ <i>versus</i> $\theta/\theta_{pl}$ - Imperfeição. ....                               | 87 |
| Figura 45 – Curva $M/M_{pl}$ <i>versus</i> $\theta/\theta_{pl}$ para modelos na posição "u" com diferentes modos de falha. .... | 88 |
| Figura 46 – Deformadas finais para os modelos na posição "u" com diferentes modos de falha. ....                                | 89 |
| Figura 47 – Deformadas finais para os modelos na posição "n" com diferentes modos de falha. ....                                | 90 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 48 – Curva $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ para modelos na posição "n" com diferentes modos de falha..... | 91  |
| Figura 49 – Propostas com diferentes fatores de amplificação para a imperfeição do ANSYS para o C40X40X5X5. ....        | 92  |
| Figura 50 – Rotação no meio da viga.....  | 94  |
| Figura 51 – C40X40X5X5 - Curva $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ - tipos de elementos.....                         | 94  |
| Figura 52 – C100X50X4X4 - Curva $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ - tipos de elementos.....                        | 95  |
| Figura 53 – C100X50X6X9 - Curva $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ – tipos de elementos. ....                       | 96  |
| Figura 54 – Tipos de falha.....   | 98  |
| Figura 55 – Deformadas – elementos de casca.....  | 99  |
| Figura 56 – Tensões de von Mises – elementos de casca.....  | 100 |
| Figura 57 – Deformadas – elementos sólidos. ....  | 101 |
| Figura 58 – Tensões de von Mises – elementos sólidos.....   | 102 |
| Figura 59 – Curva tensão versus deformação do material.....   | 108 |
| Figura 60 – Efeito catenária no modelo 40x40x4,75x4,75-500n. ....   | 109 |
| Figura 61 – Curva $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ (40x40x4,75x4,75-n).....                                       | 110 |
| Figura 62 – Curva FEM/EC3 versus $\lambda_p^*L/r$ . ....  | 117 |
| Figura 63 – Curva FEM/EC3 versus $\lambda_p$ .....  | 118 |
| Figura 64 – Curva FEM/EC3 versus $\lambda_p^*L/r$ – Posição "u" - separado por classes. ...                             | 119 |
| Figura 65– Curva FEM/EC3 versus $\lambda_p$ – Posição "u" - separado por classes.....                                   | 120 |
| Figura 66– Curva FEM/EC3 versus $\lambda_p^*L/r$ – Posição "n" - Separado por classes....                               | 121 |
| Figura 67 – Curva FEM/EC3 versus $\lambda_p$ – Posição "n" - Separado por classes. ....                                 | 122 |
| Figura 68 – Curva FEM/CSM versus $\lambda_p^*L/r$ . ....  | 124 |
| Figura 69 – Curva FEM/CSM versus $\lambda_p$ .....  | 125 |
| Figura 70 – Curva FEM/CSM versus $\lambda_p^*L/r$ – Posição "u" - separado por $\lambda_p$ . ....                       | 126 |
| Figura 71– Curva FEM/CSM versus $\lambda_p$ – Posição "u" - separado por $\lambda_p$ .....                              | 127 |
| Figura 72– Curva FEM/CSM versus $\lambda_p^*L/r$ – Posição n - Separado por $\lambda_p$ . ....                          | 128 |
| Figura 73– Curva FEM/CSM versus $\lambda_p$ – posição "n" - separado por $\lambda_p$ . ....                             | 129 |
| Figura 74– Curva FEM/EC3 versus $\lambda_p^*L/r$ para a proposta. ....  | 133 |
| Figura 75 – Curva FEM/EC3 versus $\lambda_p$ para a proposta. ....  | 134 |
| Figura 76 – Curva FEM/EC3 versus $\lambda_p^*L/r$ – Posição "u" - separado por classes para a proposta. ....            | 135 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 77 – Curva FEM/EC3 <i>versus</i> $\lambda_p$ – Posição "u" - separado por classes para a proposta. ....          | 136 |
| Figura 78 – Curva FEM/EC3 <i>versus</i> $\lambda_p^*L/r$ – Posição "n" - separado por classes para a proposta. ....     | 137 |
| Figura 79 – Curva FEM/EC3 <i>versus</i> $\lambda_p$ – Posição "n" - separado por classes para a proposta. ....          | 138 |
| Figura 80 – Proposta para momento efetivo da Classe 3 (Adaptado de [39]). ....  | 142 |
| Figura 81– Curva FEM/EC3 <i>versus</i> $\lambda_p^*L/r$ – para a proposta da classe 3. ....                             | 142 |
| Figura 82 – Curva FEM/EC3 <i>versus</i> $\lambda_p$ – para a proposta da classe 3. ....                                 | 143 |
| Figura 83 – Curva FEM/EC3 <i>versus</i> $\lambda_p^*L/r$ – para a proposta da classe 4. ....                            | 146 |
| Figura 84 – Curva FEM/EC3 <i>versus</i> $\lambda_p$ – para a proposta da classe 4. ....                                 | 146 |
| Figura 85 – Curva FEM/CSM <i>versus</i> $\lambda_p^*L/r$ para a proposta. ....  | 149 |
| Figura 86 – Curva FEM/CSM <i>versus</i> $\lambda_p$ para a proposta. ....   | 150 |
| Figura 87 – Curva FEM/CSM <i>versus</i> $\lambda_p^*L/r$ – posição "u" - separado por $\lambda_p$ para a proposta. .... | 151 |
| Figura 88 – Curva FEM/CSM <i>versus</i> $\lambda_p$ – posição "u" - separado por $\lambda_p$ para a proposta. ....      | 152 |
| Figura 89 – Curva FEM/CSM <i>versus</i> $\lambda_p^*L/r$ – posição "n" - separado por $\lambda_p$ para a proposta. .... | 153 |
| Figura 90 – Curva FEM/CSM <i>versus</i> $\lambda_p$ – posição "n" - separado por $\lambda_p$ para a proposta. ....      | 154 |
| Figura 91 – Posicionamento dos LVDTs. ....  | 166 |
| Figura 92 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-750-1. ....  | 167 |
| Figura 93 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-750-2. ....  | 168 |
| Figura 94 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-750-3. ....  | 169 |
| Figura 95 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-750-4. ....  | 170 |
| Figura 96 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-1500-1. ....   | 171 |
| Figura 97 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-1500-2. ....   | 172 |
| Figura 98 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-1500-3. ....   | 173 |
| Figura 99 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-1500-4. ....   | 174 |
| Figura 100 – Imperfeições perfil C80X80X3X3-1500-1. ....  | 175 |
| Figura 101 – Imperfeições perfil C80X80X3X3-1500-2. ....  | 176 |
| Figura 102 – Imperfeições perfil C80X80X3X3-1500-3. ....  | 177 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 103 – Imperfeições perfil C80X80X3X3-1500-4.....  | 178 |
| Figura 104 – Dimensões Medidas.....  | 179 |
| Figura 105 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 2 mm – parte 1, posição "n". .....    | 184 |
| Figura 105 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 2 mm – parte 1, posição "u". .....    | 185 |
| Figura 106 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 2 mm – parte 2, posição "n". .....    | 186 |
| Figura 106 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 2 mm – parte 2, posição "u". .....    | 187 |
| Figura 107 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 2 mm – parte 3, posição "n". .....    | 188 |
| Figura 107 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 2 mm – parte 3, posição "u". .....    | 189 |
| Figura 108 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 3,35 mm – parte 1, posição "n". ..... | 190 |
| Figura 108 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 3,35 mm – parte 1, posição "u". ..... | 191 |
| Figura 109 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 3,35 mm – parte 2, posição "n". ..... | 192 |
| Figura 109 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 3,35 mm – parte 2, posição "u". ..... | 193 |
| Figura 110 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 3,35 mm – parte 3, posição "n". ..... | 194 |
| Figura 110 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 3,35 mm – parte 3, posição "u". ..... | 195 |
| Figura 111 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 4,75 mm – parte 1, posição "n". ..... | 196 |
| Figura 111 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 4,75 mm – parte 1, posição "u". ..... | 197 |
| Figura 112 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 4,75 mm – parte 2, posição "n". ..... | 198 |
| Figura 112 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 4,75 mm – parte 2, posição "u". ..... | 199 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 113 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 4,75 mm – parte 3, posição "n". ..... | 200 |
| Figura 113 – Curvas $M/M_{pl}$ versus $\theta/\theta_{pl}$ dos perfis com espessura de 4,75 mm – parte 3, posição "u". ..... | 201 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Classificação da AISI/SEA [5].   | 24 |
| Tabela 2 – Fatores Parciais (Adaptado de [17]).   | 42 |
| Tabela 3 – Classificação dos elementos internos comprimidos de seções transversais (Adaptado de [17]).      | 43 |
| Tabela 4 – Comprimento efetivo para elementos internos sob compressão (Adaptado de [29]).                   | 45 |
| Tabela 5 – Comprimento efetivo para elementos externos sob compressão (Adaptado de [29]).                   | 46 |
| Tabela 6 – Sumário dos coeficientes do CSM para materiais metálicos (Adaptado de [21]).                     | 48 |
| Tabela 7 – Medidas mínimas e máximas obtida pelos transdutores de deslocamento do perfil C80X80X3X3.        | 55 |
| Tabela 8 – Medidas mínimas e máximas obtida pelos transdutores de deslocamento do perfil C40X40X5X5.        | 57 |
| Tabela 9 – Medidas das seções transversais dos perfis.  | 59 |
| Tabela 10 – Principais tipos de corpos de prova conforme o tipo de produto [35].                            | 61 |
| Tabela 11 – Dimensões dos corpos de prova [35].   | 61 |
| Tabela 12 – Dimensões típicas de corpos de prova planos (medidas em mm) [35].                               | 61 |
| Tabela 13 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de caracterização à tração do perfil C80x80x3x3.     | 64 |
| Tabela 14 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de caracterização à compressão do perfil C40x40x5x5. | 69 |
| Tabela 15 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de caracterização à compressão do perfil C80x80x3x3. | 70 |
| Tabela 16 – Geometria dos ensaios (Adaptado de [10]).   | 72 |
| Tabela 17 – Resultados experimentais do material (Adaptado de [10]).  | 73 |
| Tabela 18 – Parâmetros representativos para modelos segundo Ramberg-Osgood (Adaptado de [36]).              | 77 |
| Tabela 19 – Imperfeições iniciais da peça (Adaptado de [10]).   | 84 |
| Tabela 20 – Relação entre o modelo numérico em casca e os ensaios.  | 97 |
| Tabela 21 – Relação entre o modelo numérico sólido e os ensaios.  | 97 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 22 – Esforço computacional das análises. ....   | 103 |
| Tabela 23 – Dimensões da seção transversal – Etapa 1. ....   | 105 |
| Tabela 24 – Dimensões da seção transversal – Etapa 2. ....   | 105 |
| Tabela 25 – Dimensões da seção transversal – Etapa 3. ....   | 106 |
| Tabela 26 – Proposta de vãos.....  | 106 |
| Tabela 27 – Proposta para propriedades dos materiais. ....   | 107 |
| Tabela 28 – Propriedades dos materiais.....  | 108 |
| Tabela 29 – Resultados de $M_{m\acute{a}x} / M_{pl}$ para perfis com mesa de 40mm. ....                                  | 111 |
| Tabela 30 – Resultados de $M_{m\acute{a}x} / M_{pl}$ para perfis com mesa de 75mm. ....                                  | 112 |
| Tabela 31 – Resultados de $M_{m\acute{a}x} / M_{pl}$ para perfis com mesa de 80mm. ....                                  | 112 |
| Tabela 32 – Resultados de $M_{m\acute{a}x} / M_{pl}$ para perfis com mesa de 100mm. ....                                 | 113 |
| Tabela 33 – Resultados de $M_{m\acute{a}x} / M_{pl}$ para perfis com mesa de 125mm. ....                                 | 113 |
| Tabela 34 – Relação entre largura e espessura da mesa. ....  | 114 |
| Tabela 35 – Análises dos resultados para a comparação numérica e do Eurocode.<br>.....                                   | 116 |
| Tabela 36 – Análises dos resultados para a comparação numérica e do CSM. ....  | 130 |
| Tabela 37 – Análises dos resultados para a comparação numérica e do Eurocode<br>para a proposta. ....                    | 139 |
| Tabela 38 – Comparação dos resultados base e da proposta para a posição "u". .   | 139 |
| Tabela 39 – Comparação dos resultados base e da proposta para a posição n.....   | 140 |
| Tabela 40 – Análises dos resultados para a comparação numérica e do Eurocode<br>para a proposta. ....                    | 141 |
| Tabela 41 – Comparação dos resultados base e da proposta. ....   | 144 |
| Tabela 42 – Análises dos resultados para a comparação numérica e do Eurocode<br>para a proposta de dimensionamento. .... | 147 |
| Tabela 43 – Comparação dos resultados base e da proposta. ....   | 147 |
| Tabela 44 – Análises dos resultados para a comparação numérica e do CSM para a<br>proposta. ....                         | 155 |
| Tabela 45 – Comparação dos resultados base e da proposta. ....   | 155 |
| Tabela 46 – Medições perfil C40X40X5X5-750-1. ....   | 179 |
| Tabela 47 – Medições perfil C40X40X5X5-750-2. ....   | 180 |
| Tabela 48 – Medições perfil C40X40X5X5-750-3. ....   | 180 |
| Tabela 49 – Medições perfil C40X40X5X5-750-4. ....   | 180 |
| Tabela 50 – Medições perfil C40X40X5X5-1500-1. ....  | 181 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 51 – Medições perfil C40X40X5X5-1500-2. ....                       | 181 |
| Tabela 52 – Medições perfil C40X40X5X5-1500-3. ....                       | 181 |
| Tabela 53 – Medições perfil C40X40X5X5-1500-4. ....                       | 182 |
| Tabela 54 – Medições perfil C80X80X3X3-1500-1. ....                       | 182 |
| Tabela 55 – Medições perfil C80X80X3X3-1500-2. ....                       | 182 |
| Tabela 56 – Medições perfil C80X80X3X3-1500-3. ....                       | 183 |
| Tabela 57 – Medições perfil C80X80X3X3-1500-4. ....                       | 183 |
| Tabela 58 – Resultados para perfis com mesa igual a 40 mm – Parte 1. .... | 202 |
| Tabela 59 – Resultados para perfis com mesa igual a 40 mm – Parte 2. .... | 203 |
| Tabela 60 – Resultados para perfis com mesa igual a 40 mm – Parte 3. .... | 203 |
| Tabela 61 – Resultados para perfis com mesa igual a 75 mm – Parte 1. .... | 204 |
| Tabela 62 – Resultados para perfis com mesa igual a 75 mm – Parte 2. .... | 204 |
| Tabela 63 – Resultados para perfis com mesa igual a 80 mm. ....           | 205 |
| Tabela 64 – Resultados para perfis com mesa igual a 100 mm. ....          | 205 |
| Tabela 65 – Resultados para perfis com mesa igual a 125 mm. ....          | 206 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|          |   |
|----------|---|
| AISI     | <i>American Iron and Steel Institute</i> - Instituto Americano de Ferro e Aço   |
| SEA      | <i>Society of Automotive Engineers</i> - Sociedade de Engenheiros Automotivos   |
| ABNT     | Associação Brasileira de Normas Técnicas  |
| NBR      | Norma Brasileira  |
| CSM      | <i>Continuous Strength Method</i> – Método da Resistência Contínua  |
| ENA      | <i>Elastic Neutral Axis</i> – Eixo Neutro Elástico  |
| PNA      | <i>Plastic Neutral Axis</i> – Eixo Neutro Plástico  |
| DSM      | <i>Direct Strength Method</i> – Método da Resistência Direta  |
| SEI/ASCE | <i>Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers</i> – Instituto de Engenharia Estrutural da Sociedade Americana de Engenheiros Civis |
| AS/NZS   | <i>Australian/New Zealand Standard</i> – Padrão Australiano/Neozelandês   |
| EC3      | Eurocode 3  |
| UERJ     | Universidade do Estado do Rio de Janeiro  |
| LVDT     | <i>Linear Variable Differential Transformer</i> - Transformador Diferencial Variável Linear   |
| APDL     | <i>ANSYS Parametric Design Language</i> - Linguagem de Design Parametrizada do ANSYS  |
| FEM      | <i>Finite Element Modelling</i> – Método dos Elementos Finitos  |
| R-O      | Ramberg-Osgood  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|            |  |
|------------|--|
| A          | Área da seção transversal  |
| A          | Parcela do elemento sujeito a compressão para definição de classes do Eurocode 3   |
| A          | Coefficiente de flexão do CSM  |
| B          | Comprimento da alma  |
| $b_0$      | Largura para corpos de prova à tração  |
| C          | Comprimento do elemento comprimido para classificação do perfil segundo Eurocode 3 |
| $C_1$      | Fator de redução do CSM  |
| $C_2$      | Fator de redução do CSM  |
| $C_3$      | Fator de redução do CSM  |
| CA         | Comprimento do vão da viga   |
| CT         | Comprimento total da viga  |
| E          | Módulo de elasticidade   |
| $E_{0,2}$  | Módulo de elasticidade tangente no ponto de 0,2%                                   |
| $E_{sh}$   | Inclinação do ganho de resistência devido ao encruamento inicial                   |
| $f_u$      | Tensão última  |
| $f_y$      | Tensão de escoamento   |
| $f_{0,2}$  | Tensão de escoamento aproximada  |
| G          | Módulo de cisalhamento   |
| H          | Comprimento da mesa  |
| $I_T$      | Momento de inércia à torção  |
| $I_w$      | Momento de inércia à torção por empenamento da seção                               |
| $I_y$      | Momento de inércia   |
| L          | Comprimento do vão   |
| $L_0$      | Comprimento de medida inicial para corpos de prova à tração                        |
| $L_c$      | Comprimento paralelo mínimo para corpos de prova à tração                          |
| $k_\sigma$ | Fator de flambagem   |
| M          | Parâmetro do modelo proposto Ramberg-Osgood  |
| $M_{cr}$   | Momento elástico crítico para flexão lateral/torsional                             |

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $M_{csm,Rd}$          | Momento resistente pelo CSM  |
| $M_{pl}$              | Momento de plastificação   |
| $N$                   | Parâmetro do modelo proposto Ramberg-Osgood  |
| $N_{csm,Rd}$          | Força normal resistente pelo CSM   |
| $N_{Ed}$              | Força normal de cálculo  |
| $t$                   | Espessura do elemento comprimido para classificação do perfil segundo Eurocode 3   |
| $t_f$                 | Espessura da mesa  |
| $t_w$                 | Espessura da alma  |
| $W_0$                 | Maior imperfeição do perfil  |
| $W_{el,y}$            | Módulo resistente elástico da seção transversal                                    |
| $W_{fl1}$             | Maior imperfeição na mesa 1  |
| $W_{fl2}$             | Maior imperfeição na mesa 2  |
| $W_{pl,y}$            | Módulo resistente plástico da seção transversal                                    |
| $W_{web}$             | Maior imperfeição na alma  |
| $W_y$                 | Módulo resistente da seção transversal   |
| $\sigma_1$            | Maior tensão do elemento   |
| $\Sigma_2$            | Menor tensão do elemento   |
| $\varepsilon$         | Deformação   |
| $\varepsilon_{csm}$   | Deformação do CSM  |
| $\varepsilon_{csm,c}$ | Deformação de compressão da fibra mais externa                                     |
| $\varepsilon_{csm,t}$ | Deformação de tração da fibra mais externa   |
| $\varepsilon_{sh}$    | Deformação após encruamento  |
| $\varepsilon_{t0,2}$  | Deformação de escoamento   |
| $\varepsilon_u$       | Deformação última  |
| $\varepsilon_y$       | Deformação elástica  |
| $\gamma_{M0}$         | Fator parcial devido à resistência da seção transversal qualquer que seja a classe |
| $\gamma_{M1}$         | Fator parcial devido à resistência dos membros à instabilidade                     |
| $\gamma_{M2}$         | Fator parcial devido à resistência da seção transversal à tração                   |
| $\theta$              | Rotação do perfil  |
| $\theta_{pl}$         | Rotação plástica   |
| $\bar{\lambda}_p$     | Limite de esbeltez   |

|               |  |
|---------------|--|
| $\rho$        | Fator de redução para cálculo da base efetiva para perfis classe 4 |
| $\sigma_{cr}$ | Tensão crítica   |
| $\chi_{LT}$   | Relação entre momento atuante e momento de projeto                 |
| $\Psi$        | Relação $\sigma_2/\sigma_1$  |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>22</b> |
| <b>Generalidades</b> .....  | <b>22</b> |
| <b>Motivação</b> .....  | <b>27</b> |
| <b>Objetivo</b> .....   | <b>28</b> |
| <b>Estrutura da dissertação</b> .....                                       | <b>28</b> |
| <b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....  | <b>30</b> |
| <b>1.1 Introdução</b> .....   | <b>30</b> |
| <b>1.2 Características do aço inoxidável</b> .....                          | <b>30</b> |
| <b>1.3 Comportamento do perfil C em aço inoxidável</b> .....                | <b>32</b> |
| <b>1.4 Métodos de dimensionamento do perfil C</b> .....                     | <b>35</b> |
| 1.4.1 Eurocode 3 .....  | 35        |
| 1.4.2 Método da Resistência Contínua - CSM .....                            | 36        |
| <b>1.5 Efeito Catenária</b> .....   | <b>38</b> |
| <b>1.6 Ramberg-Osgood [22],[36]</b> .....                                   | <b>39</b> |
| <b>2 DIMENSIONAMENTO TEÓRICO</b> .....                                      | <b>41</b> |
| <b>2.1 Introdução</b> .....   | <b>41</b> |
| <b>2.2. Dimensionamento segundo o Eurocode 3</b> .....                      | <b>41</b> |
| 2.2.1 Classificação da seção transversal .....                              | 42        |
| 2.2.2 Resistência à flambagem para membros sob flexão .....                 | 43        |
| <b>2.3 Dimensionamento segundo o Método da Resistência Contínua - CSM47</b> |           |
| <b>3 ANÁLISES EXPERIMENTAIS</b> .....                                       | <b>52</b> |
| <b>3.1 Considerações iniciais</b> .....                                     | <b>52</b> |
| <b>3.2 Descrição dos Perfis C em aço inoxidável ensaiados</b> .....         | <b>53</b> |
| 3.2.1 Aferição das imperfeições geométricas iniciais .....                  | 53        |
| 3.2.2 Geometria dos perfis .....  | 57        |
| 3.2.3 Caracterização do material.....                                       | 59        |
| <b>4 ANÁLISE NUMÉRICA</b> .....   | <b>71</b> |
| <b>4.1 Modelo experimental base</b> .....                                   | <b>71</b> |
| <b>4.2 Modelo de elementos finitos</b> .....                                | <b>73</b> |

|  |            |
|--|------------|
| 4.2.1 Material e elementos escolhidos .....                      | 73         |
| 4.2.2 Estudo da malha .....                                      | 78         |
| 4.2.3 Geometria e condições de contorno.....                     | 78         |
| 4.2.4 Imperfeição geométrica inicial .....                       | 83         |
| <b>4.3 Validação do modelo numérico .....</b>                    | <b>93</b>  |
| <b>4.4 Configurações deformadas .....</b>                        | <b>97</b>  |
| <b>4.5 Escolha dos Modelos.....</b>                              | <b>103</b> |
| <b>5 ANÁLISE PARAMÉTRICA .....</b>                               | <b>104</b> |
| <b>5.1 Modelos estudados .....</b>                               | <b>104</b> |
| <b>5.2 Material.....</b>   | <b>107</b> |
| <b>5.3 Análise dos resultados numéricos .....</b>                | <b>108</b> |
| <b>6 VERIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO .....</b>        | <b>115</b> |
| <b>6.1 Comparação dos resultados numéricos e Eurocode 3.....</b> | <b>116</b> |
| <b>6.2 Comparação dos resultados numéricos e CSM .....</b>       | <b>123</b> |
| <b>7 PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO.....</b>                        | <b>131</b> |
| <b>7.1 Eurocode 3.....</b>                                       | <b>131</b> |
| 7.1.1 Alteração na tensão de escoamento ( $f_{0,2}$ ) .....      | 131        |
| 7.1.2 Alteração do momento efetivo da classe 3.....              | 140        |
| 7.1.3 Alteração do dimensionamento da classe 4.....              | 144        |
| <b>7.2 Método da Resistência Contínua - CSM .....</b>            | <b>148</b> |
| <b>CONCLUSÕES .....</b>  | <b>156</b> |
| <b>Generalidades.....</b>  | <b>156</b> |
| <b>Principais contribuições deste trabalho .....</b>             | <b>158</b> |
| <b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>                    | <b>159</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>160</b> |
| <b>APÊNDICE A .....</b>  | <b>166</b> |
| <b>APÊNDICE B .....</b>  | <b>179</b> |
| <b>APÊNDICE C .....</b>  | <b>184</b> |
| <b>APÊNDICE D .....</b>  | <b>202</b> |

## INTRODUÇÃO

### Generalidades

O uso do aço como elemento estrutural vem sendo difundido cada vez mais em diversos países ao redor do mundo [1]. Da mesma forma, no Brasil pode ser notado um aumento considerável de estruturas compostas inteira ou parcialmente por perfis metálicos. Esse fato é em grande parte decorrente do melhor entendimento que se tem hoje em dia do comportamento das estruturas devido ao número cada vez maior de pesquisas na área. Pode-se citar como vantagens da utilização do aço, a possibilidade de construções mais limpas e rápidas, acarretando menor interferência nos arredores, menor geração de resíduos, e maior agilidade nos processos construtivos, além de ser um material reciclável, reduzindo o impacto ambiental.

Outra vantagem deste material é a vasta gama de possibilidades que ele proporciona ao dimensionamento estrutural, visto que permitem ganho de espaço interno com a criação de grandes vãos e balanços sem interrupção por pilares ou paredes estruturais [2].

O aço inoxidável é um tipo de material definido pela sua resistência à corrosão, tendo em sua composição química um mínimo de 10,5% de cromo. Pode ser apresentado na forma de aço inoxidável austenítico, ferrítico, duplex, entre outras, sendo o primeiro o mais comum. Apesar de existirem uma série de semelhanças entre o aço inoxidável e o aço carbono, as diferenças em suas propriedades mecânicas exigem um tratamento separado nas normas de dimensionamento, sendo as duas características mais destacadas, a não existência de um patamar de escoamento bem definido e maior capacidade de deformação.

Diferentes propriedades mecânicas e físicas podem ser atribuídas ao aço inoxidável de acordo com o controle da adição de determinados elementos químicos, como cromo, níquel, molibdênio, titânio e cobre. Normalmente, a adição de cromo é a responsável pelas propriedades anticorrosivas do aço inoxidável, uma vez que quando exposto ao ar ou a outro ambiente agressivo, uma fina camada de óxido de cromo é formada na sua superfície, protegendo-o da corrosão [3]. Além disso,

devido à adição de níquel, o material apresenta grande ductilidade, ou seja, pode ser mais facilmente trabalhado, ao mesmo tempo em que apresenta maior resistência, principalmente com relação a altas temperaturas [4].

A organização dos aços inoxidáveis, assim como acontece para o aço carbono, é realizada por alguns sistemas de classificação que são necessários para facilitar e garantir o uso eficiente das ligas.

O sistema de nomenclatura mais usado atualmente é criado pelo Instituto Americano de Aço e Ferro e pela Sociedade de Engenheiros Automotivos, conhecido como sistema AISI/SEA (*American Iron and Steel Institute - AISI- e Society of Automotive Engineers - SAE*) [5], [6].

A designação do AISI/SAE conta com um sistema de 4 dígitos para os aços, onde o primeiro dígito representa a categoria geral dos aços e o segundo representa a presença de algum elemento secundário em quantidade significativa, que altera as propriedades do aço. Quando não há um elemento secundário presente, o segundo dígito é zero. Desta forma, os dois primeiros dígitos indicam o tipo de material presente na liga, e os dois últimos dígitos mostram a quantidade de carbono presente no aço, como pode ser visto na Figura 1. A Tabela 1 mostra o significado dos números possíveis do primeiro dígito.

Para os aços inoxidáveis foi implantado um sistema baseado em três dígitos, sendo definidos como inoxidáveis os aços que possuem participação de cromo de 4 a 6% em suas ligas, o que representa um aumento de resistência de 4 a 10 vezes maior do que a do aço carbono.



**Figura 1 – Classificação da AISI/SEA (Adaptado de [5]).**

**Tabela 1 – Classificação da AISI/SEA [5].**

| Designação SAE | Tipo                                 |
|----------------|--------------------------------------|
| 1xxx           | Ligas de Aço de Carbono              |
| 2xxx           | Ligas de Aço de Níquel               |
| 3xxx           | Ligas de Aço de Níquel-Cromo         |
| 4xxx           | Ligas de Aço de Molibdênio           |
| 5xxx           | Ligas de Aço de Cromo                |
| 6xxx           | Ligas de Aço de Cromo-Vanádio        |
| 7xxx           | Ligas de Aço de Tungstênio           |
| 8xxx           | Ligas de Aço de Níquel-Cromo-Vanádio |
| 9xxx           | Ligas de Aço de Silício-Manganês     |

As primeiras nomenclaturas foram determinadas por volta de 1930, sendo criadas três diferentes séries para melhor abordar as ligas [6]. Os aços da série 300 representam as ligas austeníticas de cromo-níquel, a série 400 as ligas ferríticas com alta concentração de cromo e presença de martensítico e, por fim, a série 500 indica as ligas com presença de cromo, com concentração de 4 a 6%. Em uma publicação de 1932, 46 ligas foram estabelecidas, das quais 38 ainda estão em uso hoje em dia. Algumas modificações foram feitas posteriormente para aprimorar a classificação, geralmente adicionando sufixos como a letra N que indica que determinado aço contém menos do que 50% de ferro e alta concentração de níquel, ou L que representa que o aço possui menos concentração de carbono do que o mesmo aço sem esse sufixo, o que o torna mais facilmente soldável [7].

O aço AISI 329 é o único aço inoxidável duplex que possui uma classificação designada pelo sistema AISI.

Na década de 60 foram propostas as séries 200 e 600, sendo a primeira representativa para aços austeníticos com grande concentração de manganês e a segunda para alguns aços com propriedades específicas. Entretanto, a série 600 nunca foi oficialmente adotada pela AISI, mesmo sendo usada ainda em alguns países.

Para os aços inoxidáveis os padrões da SAE abordam apenas uma fração dos aços retratados pelo AISI. O sistema desenvolveu uma pequena modificação em

relação ao AISI, sendo a sua designação feita por um sistema de 5 dígitos. Nela, é acrescentado “30” antes dos aços da série AISI 300 e “51” da série 400.

Essas classificações da AISI/SEA abordam aços que são usualmente divididos em três tipos. O primeiro é o grupo dos aços austeníticos, que são as ligas inoxidáveis mais utilizadas do mercado devido sua facilidade de conformação e resistência a rupturas e trincas, mesmo em baixas temperaturas.

O segundo grupo é dos aços ferríticos, que possuem custo mais baixo de fabricação do que os outros aços inoxidáveis, porém contam com dureza e resistência à corrosão limitadas devido sua composição química, que se assemelha muito ao aço carbono comum.

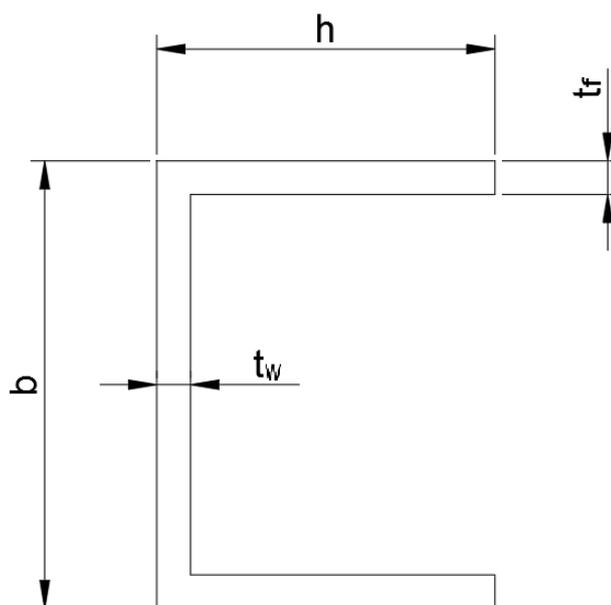
Por fim, os aços martensíticos, mais resistentes e duros, são muito similares ao aço carbono. Devido sua composição com altos índices de carbono, podem ter sua resistência aumentada por meio de tratamento térmico. Alguns exemplos são os endurecidos por precipitação, duplex e super ferríticos [8].

Além das três principais famílias citadas anteriormente, ainda existem algumas outras variações do aço inoxidável, utilizadas em escala muito menor e normalmente para fabricação de peças e equipamentos que demandam uma composição mais específica.

O perfil metálico C pode ser usado como viga estrutural, principalmente na construção de edifícios na engenharia civil. Sua seção transversal consiste em uma alma, normalmente orientada na posição vertical e duas abas, também definidas como mesas, conforme apresentado na Figura 2, onde  $b$  é o comprimento da alma,  $h$  o comprimento da mesa, e  $t_f$  e  $t_w$  são a espessura da mesa e da alma, respectivamente. Este perfil distingue-se do perfil I ou do perfil H por não possuir dupla simetria, de forma que seu eixo de flexão na menor inércia não é centralizado no comprimento das mesas.

A falta de estudos adequados para definição de parâmetros normativos à utilização do aço inoxidável para fins estruturais junto ao crescente aumento de construções utilizando aço no país, motivam o desenvolvimento de pesquisas científicas nesta área. Com dados mais precisos, o dimensionamento estrutural utilizando perfis C, tornar-se-á mais eficiente, aumentando seu campo de utilização. Desta forma, o presente trabalho pretende avaliar o comportamento estrutural de perfis C em aço inoxidável sujeitos à flexão, variando alguns dos parâmetros do perfil como espessura, comprimento e outros. Será avaliada também, a diferença de

resistência entre duas posições diferentes do perfil, cujas inércias e índices de esbeltez são os mesmos, fato que não é avaliado pelas normas de dimensionamento atuais. Para tal, será desenvolvida uma série de modelos numéricos de elementos finitos por meio do programa ANSYS [8], calibrando-os segundo os resultados experimentais desenvolvidos por Theofanous et al. [10].



**Figura 2 – Dimensões de um perfil C – apresentação simplificada.**

De acordo com Silva et al. [11], o perfil estrutural formado a frio em aço carbono, seguindo as indicações na ABNT NBR 6355 [12], é apresentado possuindo ou não enrijecedores, tendo alma variando de 50 a 300 mm, mesa de 20 a 160 mm e espessura de 1,2 a 6,3 mm. Usualmente os perfis menores costumam ser utilizados na confecção de paredes e tetos [13]. Já os maiores perfis podem ser utilizados como vigas e em lajes, ou ainda como longarinas de escadas interiores. Muitas vezes ele é encontrado na estrutura de telhados na posição das ripas [14]. Eles também podem ser unidos por meio de soldas em suas almas de forma a gerar um perfil semelhante a uma viga I com dimensões não usuais, sendo comumente usados dessa forma em pórticos com resistência sísmica, tubos, dutos, *racks* e outras estruturas em geral [15].

Outro aspecto importante dos perfis metálicos no geral é o processo de fabricação. O perfil C pode ser fabricado pelo processo de laminação, de chapa

dobrada ou de chapas soldadas. O perfil laminado é aquele obtido a partir da laminação dos tarugos. Suas dimensões são padronizadas e limitadas.

O segundo tipo de perfil é obtido pelo dobramento de chapas a frio. Neste caso são exigidos raios de curvaturas mínimos na dobragem para evitar fissuração ou alteração nas características do aço. Os perfis de chapas dobradas permitem grande variação de forma e dimensões das seções, mas podem, também, ser encontrados prontos e padronizados.

O perfil de chapas soldadas é obtido pela soldagem de chapas entre si. Permite grande variedade na forma e dimensões das seções. Devido ao custo de fabricação mais elevado, o perfil soldado é utilizado em obras de médio a grande porte. No entanto, quando o projeto exigir seções com formas especiais, essa solução pode ser usada em obras de menor porte [16].

## **Motivação**

A carência de estudos adequados para definição de parâmetros normativos à utilização do aço inoxidável em elementos estruturais junto ao crescente aumento de construções utilizando aço no país motivam o desenvolvimento de pesquisas científicas nesta área. As publicações atuais no meio técnico-científico que abordam o tema do comportamento estrutural do perfil C apresentam estudos experimentais que possibilitam comparações e sugestões para alguns dos métodos de dimensionamento. Entretanto, a variabilidade de seções transversais é muito pequena, limitando a verificação da adequação do dimensionamento. Com boas propriedades de resistência, as peças de aço inoxidável podem ampliar as aplicações das estruturas atuais em aço carbono. Por isso, por meio de uma maior variabilidade de análises na área, almeja-se o ganho de eficiência no dimensionamento estrutural utilizando perfis C em aço inoxidáveis, possibilitando um aumento de seu campo de utilização.

## **Objetivo**

O objetivo deste trabalho é apresentar o estudo de modelos numéricos de perfil C submetidos à flexão, que serão avaliados em comparação ao dimensionamento segundo o Eurocode 3 – Parte 1.4 [17] e Método da Resistência Contínua (CSM) [18]-[21], para verificação da eficácia destes métodos de dimensionamentos. Para o desenvolvimento dos modelos foi utilizado o programa de elementos finitos ANSYS 12.0 [9], com calibração baseada nos ensaios experimentais apresentados por Theofanous et al. [10], sendo modelados de forma a apresentar as condições de contorno e a malha que melhor se adequasse aos resultados experimentais. São também apresentadas propostas que modificam os dimensionamentos teóricos citados para torná-los mais eficientes.

## **Estrutura da dissertação**

Esta dissertação é composta pela introdução e oito capítulos, de forma a ampliar as pesquisas na área dos aços inoxidáveis para perfil do tipo C. A introdução apresenta uma contextualização do cenário atual da engenharia civil e da utilização do aço inoxidável como peça estrutural, assim como nomenclatura, modos de fabricação e composição química do aço e as diferentes utilizações para os vários tipos de materiais presentes no mercado atual, focando na seção transversal do perfil C que será objeto de estudo deste trabalho.

O capítulo um apresenta uma revisão bibliográfica, abordando os principais assuntos relacionados aos itens de interesse nesse trabalho, como estudos experimentais de perfis C em aço inoxidável e dimensionamento de estruturas segundo o modelo do CSM [21].

O capítulo dois é destinado em detalhar os modos de dimensionamentos teóricos que serão usados no presente estudo para execução e verificação de análises paramétricas executadas.

O capítulo três descreve os estudos experimentais realizados pelo autor para entender o comportamento do aço inoxidável dos perfis C estudados.

O quarto capítulo aborda o passo a passo da criação de modelos numéricos realizados com auxílio do programa ANSYS 12.0 [9] de calibração segundo os resultados de Theofanous et al. [10].

O capítulo cinco amplia os modelos numéricos que foram criados no capítulo anterior para realização de uma análise paramétrica, expandindo a quantidade de perfis utilizados de base para esta dissertação.

O capítulo seis verifica os resultados obtidos no capítulo cinco segundo os resultados teóricos executados a partir dos modos de dimensionamento descritos no capítulo três.

O capítulo sete aborda algumas propostas para melhoria dos modos de dimensionamento atuais a fim de aproximá-los aos resultados paramétricos obtidos. Isto visa garantir maior aproximação dos resultados obtidos e maior confiabilidade do dimensionamento.

Por fim, o capítulo de considerações finais apresenta os principais resultados encontrados, sua importância na análise, e sugestões de trabalhos futuros.

## 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica com as principais pesquisas existentes na literatura, referentes ao dimensionamento e entendimento do comportamento de elementos de aço inoxidável com seção transversal C submetidas à flexão.

Primeiramente, são apresentadas algumas considerações sobre o comportamento de elementos em aço inoxidável, focando no comportamento da curva tensão *versus* deformação e como é feita a determinação da tensão de escoamento para esse material. Em seguida, há uma descrição dos fenômenos de flambagem que ocorrem nesses elementos estruturais e como eles podem afetar o comportamento estrutural do perfil.

Também é abordado o comportamento do perfil C a flexão em aço inoxidável e há uma breve introdução aos métodos de dimensionamento utilizados atualmente, focando principalmente nas pesquisas mais recentes sobre o Método da Resistência Contínua, em inglês *Continuous Strength Method* (CSM) [18]-[21], e do Eurocode 3 – Parte 1.4 [17].

Por fim, são apresentadas algumas considerações sobre o efeito catenária bem como algumas propostas utilizadas para melhor desenvolvimento de análises numéricas em elementos finitos, citando as preposições de Ramberg-Osgood para desenvolvimento de curvas tensão *versus* deformação para perfis de aço inoxidável, incluindo sua adequação para elementos sem dupla simetria, como o caso do Perfil C [22].

### 1.2 Características do aço inoxidável

O comportamento da curva tensão *versus* deformação do aço inoxidável difere dos aços carbono em vários aspectos. Enquanto o aço carbono normalmente

exibe comportamento elástico linear até a tensão de escoamento e um patamar antes do encruamento por deformação, o aço inoxidável tem uma resposta mais arredondada sem tensão de escoamento bem definida, como representado na Figura 3.

A etapa plástica da deformação do aço inoxidável envolve o processo de encruamento, o que resulta em aumento na resistência ao escoamento, na resistência final e na dureza do material. Também é verificado que as curvas tensão *versus* deformação do aço inoxidável não apresentam simetria no caso de compressão e tração; tendendo a ser mais não lineares em tração do que em compressão.

Os aços inoxidáveis podem ser mais dúcteis do que os aços carbono, observado pela capacidade de se obter grandes deformações plásticas após escoarem, antes de ser atingida a resistência à tração final. Por exemplo, o alongamento do aço inoxidável austenítico pode ser superior a 45%, enquanto o aço carbono tem um alongamento usual de cerca de 25%.

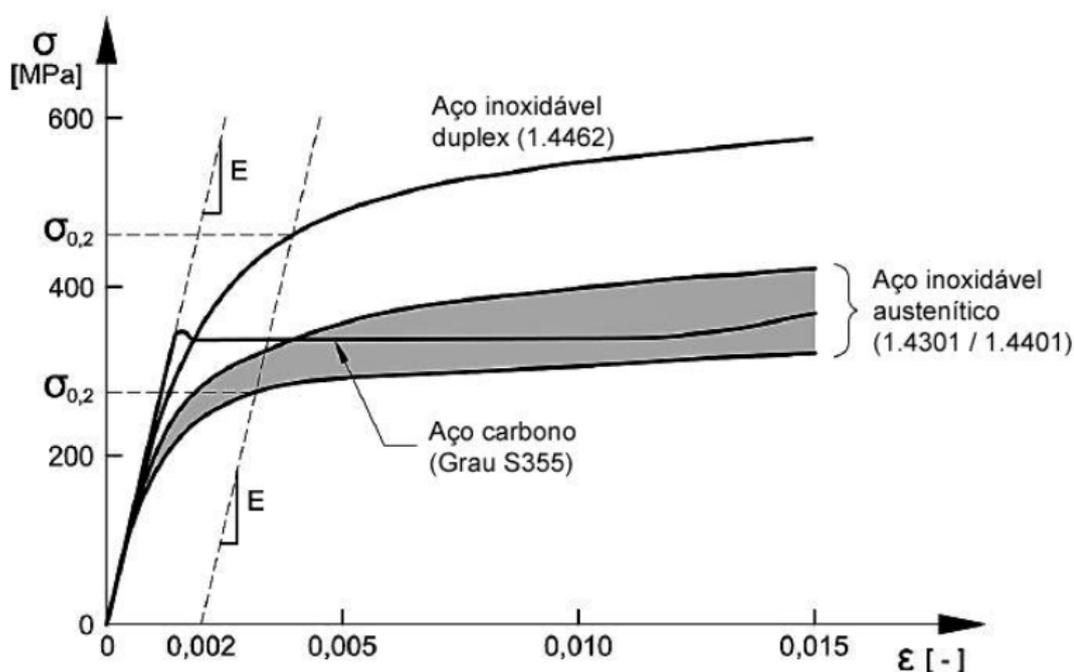


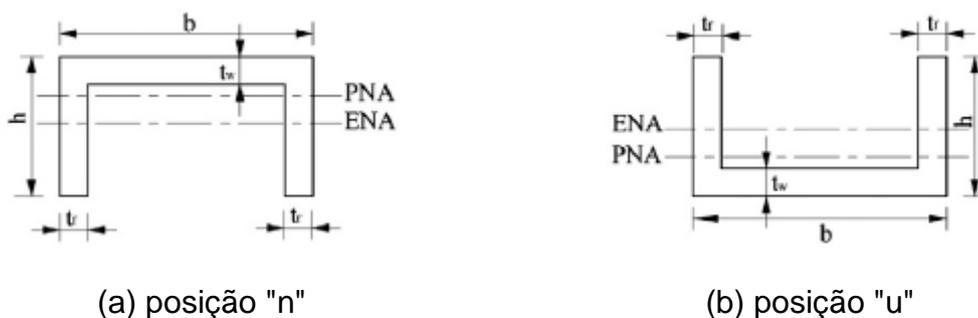
Figura 3 – Curva tensão *versus* deformação típicas do aço carbono e o aço inoxidável (Tylek e Kuctha, 2014 apud [23]).

### 1.3 Comportamento do perfil C em aço inoxidável

O estudo proposto por Theofanous et al. [10] buscou conhecer a resposta das vigas em perfil C em aço inoxidável austenítico soldadas a laser à flexão sobre o eixo de menor inércia, analisando sua deformação até a ruptura. O artigo objetiva entender melhor a resistência desse tipo de perfil, uma vez que as pesquisas atuais nessa área são muito escassas. Além disso, o trabalho também verificou a diferença de resistência apresentada por uma mesma seção transversal quando posicionado de forma inversa, mantendo a flexão na menor inércia. Essa desigualdade é decorrente da diferença que ocorre entre as posições quanto às tensões encontradas nas fibras mais extremas, tracionadas ou comprimidas, que são modificadas segundo a posição adotada.

É estudado também o comportamento da linha neutra que se desloca no estágio de plastificação quando a flexão induzida não está em um eixo de simetria. A teoria existente é de que, para materiais perfeitamente elásticos, na situação apresentada de flexão em um eixo que não o simétrico, a linha neutra move-se da linha neutra elástica (posição inicial) até a linha neutra plástica, conforme a tensão aumenta. Entretanto, esse deslocamento foi pouco estudado para materiais que não possuem patamar de escoamento definido, como é o caso dos aços inoxidáveis.

Foram testados perfis em duas orientações, com a alma sendo comprimida (posição "n") e com a alma sendo tracionada (posição "u"), conforme pode ser observado na Figura 4, onde ENA e PNA correspondem à linha neutra elástica e plástica, respectivamente.



**Figura 4 – Posições ensaiadas do perfil C (adaptado de [10]).**

Testou-se três diferentes geometrias, com índices de esbeltez diferentes, demonstrando que para os perfis mais rígidos, os valores de momento máximo não diferem significativamente para as orientações “u” e “n”; já para os perfis mais esbeltos é possível notar uma diferença. Nestes casos, a orientação onde a mesa está comprimida (posição "n") resultou em um valor superior de resistência e deformação comparada à outra posição, reforçando que os perfis na posição “u” tem maior suscetibilidade a flambagem local, uma vez que as fibras mais comprimidas possuem bordo livre.

Os resultados revelaram que diferente do aço carbono, no aço inoxidável austenítico a posição da linha neutra após atingir a linha neutra plástica tende a se mover de volta em direção à linha neutra elástica. Isso ocorre devido ao encruamento do perfil para grandes valores de deformação, observados neste tipo de material.

A comparação da capacidade última de perfis C sujeitos a flambagem na alma para diferentes valores de rigidez também foi testado por Chen et al. [24]. Os valores da relação  $h_t/t_w$  das seções variaram de 14,22 a 23,41. Esperava-se comprovar que a capacidade final da flambagem local da placa diminuía com o aumento da rigidez, oriundo do aumento da espessura da alma (e não outras magnitudes). A resistência última a flambagem da alma está relacionada tanto à razão  $h_t/t_w$  quanto à espessura da alma  $t_w$  de forma que a capacidade de carga pode aumentar, basicamente, com o aumento da relação  $h_t/t_w$ . No entanto, seus resultados mostraram que a resistência última máxima alcançada dá-se para seções com  $h_t/t_w$  entre 18 e 19, uma vez que as vigas mais rígidas que estas apresentaram baixa ductilidade, afetando sua resistência.

Nas normas atuais para o dimensionamento de elementos estruturais em aço inoxidável, a flambagem local é considerada por meio de um sistema de classificação da seção transversal que é baseada em um modelo de material elástico ou perfeitamente plástico, o mesmo usado para o aço carbono. No entanto, para seções rígidas, a norma impõe um limite de 0,2% da resistência última sem considerar o efeito de encruamento do aço inoxidável. Para seções esbeltas, o método da largura efetiva é utilizado sem considerar o efeito da interação dos elementos do perfil, uma vez que a classificação é feita analisando-se os elementos separadamente e utilizando a classe do elemento menos resistente.

O artigo de Wang et al.. [25] estudou o comportamento de vigas de parede fina, focando sua avaliação no modo de falha que representa uma interação de flambagem local e flambagem lateral. O autor busca relacionar o modo de falha com as dimensões da seção transversal da viga, bem como com a esbeltez da mesma.

Usando o conceito da largura efetiva, os autores propuseram o uso de um método baseado em elementos finitos para modelar um perfil que simulasse adequadamente o comportamento de vigas após a ocorrência da flambagem local, analisando a estabilidade lateral da viga e a consequente redução da resistência total em comparação com a viga quando não há ocorrência desse efeito localizado.

Constatou-se que apesar de se iniciar uma falha localmente no perfil, as vigas ainda são capazes de apresentar alguma resistência de forma global, não afetando tanto sua instabilidade lateral. Porém, para situações de vãos intermediários, onde novas flambagens laterais ocorreram após o início da análise, a resistência lateral das vigas é mais significativamente alterada, resultando em valores de resistência última baixos. Os autores ressaltaram que devem ser realizados mais estudos sobre o tema, de forma que o dimensionamento para vigas nessas situações seja mais efetivo e seguro.

Yun et al.. [19] apontam que essas considerações têm gerado dimensionamentos conservadores quando comparado o resultado do Eurocode aos resultados experimentais. Dessa forma, uma nova metodologia vem sendo desenvolvida de forma a utilizar adequadamente a resistência do aço inoxidável. O chamado Método da Resistência Contínua (*Continuous Strength Method - CSM*), é uma proposta baseada na relação da rigidez da seção transversal e sua capacidade de deformação, empregando um modelo de resistência bilinear para melhor aproveitamento do encruamento do aço inoxidável. Zhao et al. [21] estabelece propostas de dimensionamento para uma série de seções transversais de aço inoxidável sujeitos a compressão ou flexão, estabelecendo parâmetros para a aplicabilidade do CSM também para perfis esbeltos laminados.

## 1.4 Métodos de dimensionamento do perfil C

### 1.4.1 Eurocode 3

Pesquisas realizadas nas últimas décadas levaram a elaboração de um código europeu destinado ao uso de aço inoxidável, o Eurocode 3 – Parte 1.4 [17], que apresenta as proposições adicionais que devem ser modificadas ou substituídas em relação ao aço carbono. Aproximações como a definição dos limites de classe do aço inoxidável, considerando as existentes para o aço carbono, ainda são utilizadas pelo código. A fim de apresentar melhorias às formulações existentes, baseadas em novas diretrizes para o material, foram estabelecidos grupos de trabalho desde 2010 [26] dedicados a aprimorar o conhecimento sobre aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos e duplex, revisando fatores importantes como a classificação da seção transversal e dos parâmetros utilizados para o dimensionamento, além de aprofundar o conhecimento sobre sua resistência ao fogo e aumentar a gama de aços inoxidáveis atendidos adequadamente pelo dimensionamento do Eurocode.

Afshan et al. [3] avaliaram por meio dos valores de tensão máxima resistente e do coeficiente de variação da resistência média do material, os dados de diversos fabricantes de aços inoxidáveis e também de dados fornecidos pela literatura. Seu objetivo era reavaliar os atuais parâmetros de resistência presentes no Eurocode 3 – Parte 1.4 [17],  $\gamma_{M0}$ ,  $\gamma_{M1}$  e  $\gamma_{M2}$ , de forma a adequá-los ao uso do dimensionamento em aço inoxidável. A pesquisa concluiu que os valores  $\gamma_{M0}$  e  $\gamma_{M1}$  não são adequados para o material, uma vez que não representaram resultados coerentes para todas as situações de carregamento e de seções transversais do perfil, devendo ser reduzidos em alguns casos. Nenhuma redução no valor de  $\gamma_{M2}$  foi prevista.

Os resultados, no entanto, não garantem que apenas as alterações dos fatores resultarão em um dimensionamento de elementos estruturais em aço inoxidável adequado, podendo não ser suficientes para uma vasta gama de perfis, de forma que podem ser necessárias modificações adicionais nas equações de projeto do código.

#### 1.4.2 Método da Resistência Contínua - CSM

Utilizando seções transversais em I e tubulares sujeitas à compressão uniforme e a flexão pura, Yun et al. [19] faz a comparação de resultados do CSM com outros métodos existentes, como Método da Resistência Direta (DSM – *Direct Strength Method*), o Eurocode, a norma americana SEI/ASCE-8 e a norma australiana/neo zelandesa AS/NZS 4673.

Primeiramente desenvolvido para atender seções transversais duplamente simétricas, como seções I ou seções tubulares, o CSM foi então estendido para cobrir o projeto de seções não duplamente simétricas (por exemplo, perfis C, seções em T e cantoneiras) em flexão, onde a deformação resultante e distribuições de tensão geralmente não são simétricas em relação a linha neutra [20].

A metodologia de dimensionamento proposta foi comparada com dados experimentais existentes e resultados numéricos gerados, utilizando o modelo de material de Ramberg–Osgood, que depois foi convertido no formato de tensão verdadeira. Foram incorporadas as imperfeições geométricas iniciais locais a partir das análises de autovalores dos modos de flambagem elástica sob as condições de carregamento aplicadas.

A etapa principal para estender o CSM para cobrir seções transversais não duplamente simétricas na flexão consiste na determinação da posição da linha neutra na ruptura e, em seguida, na integração da distribuição de tensão não simétrica ao longo da profundidade da seção transversal. Para seções transversais esbeltas foi geralmente descoberto que a posição do eixo neutro no momento último está aproximadamente localizada na linha neutra elástica (ENA).

Desta forma, é possível determinar as deformações máximas de compressão e tração das fibras externas, que não são iguais. A deformação compressiva máxima é determinada seguindo a mesma formulação das seções transversais simétricas,  $\epsilon_{CSM,c}$ , enquanto a deformação de tração da fibra externa correspondente  $\epsilon_{CSM,t}$  pode então ser obtida, com base na suposição de uma distribuição de deformação variando linearmente, como demonstrado na Figura 5.

Os resultados da comparação da proposta com os valores experimentais e numéricos podem ser vistos na Figura 6. Dentre eles estão os resultados

experimentais de Theofanous et al. [10] que serão utilizados para calibração dos modelos estudados nesse trabalho apresentados na Figura 7.

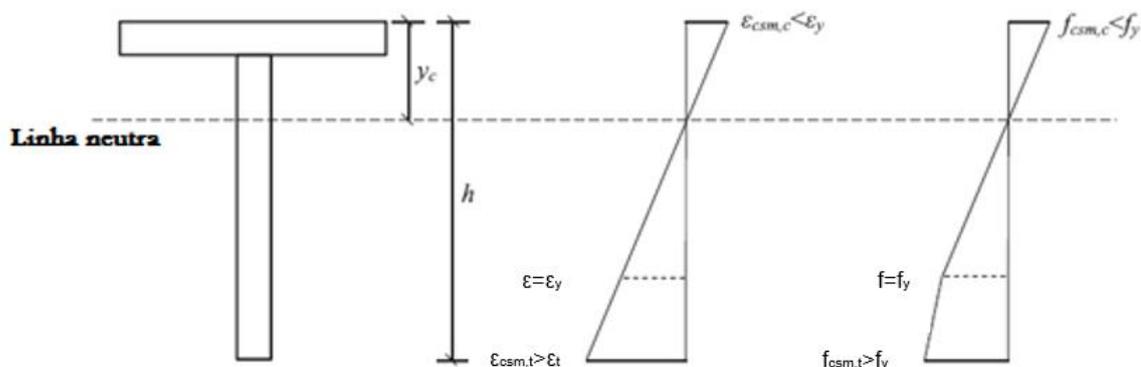


Figura 5 – Demonstração da distribuição de seções de um Perfil T para o CSM [20].

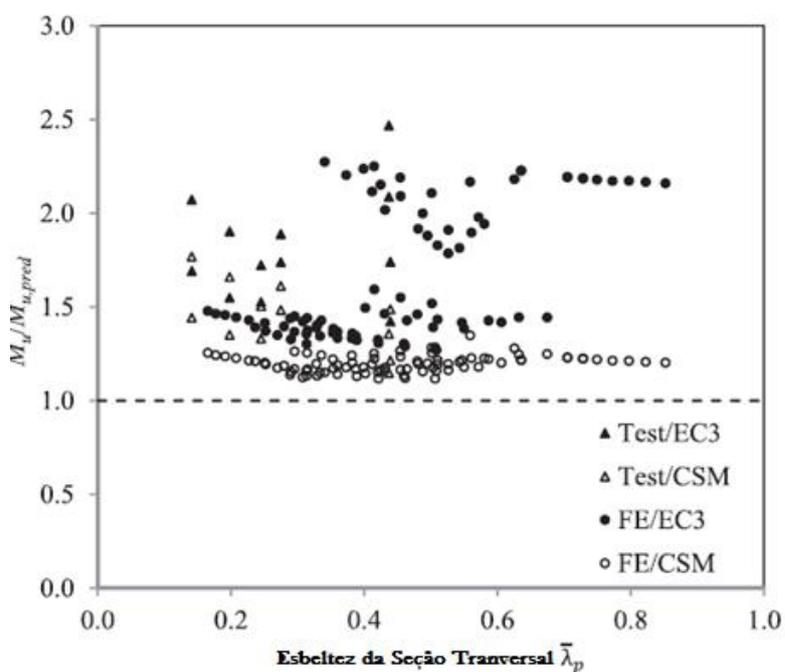
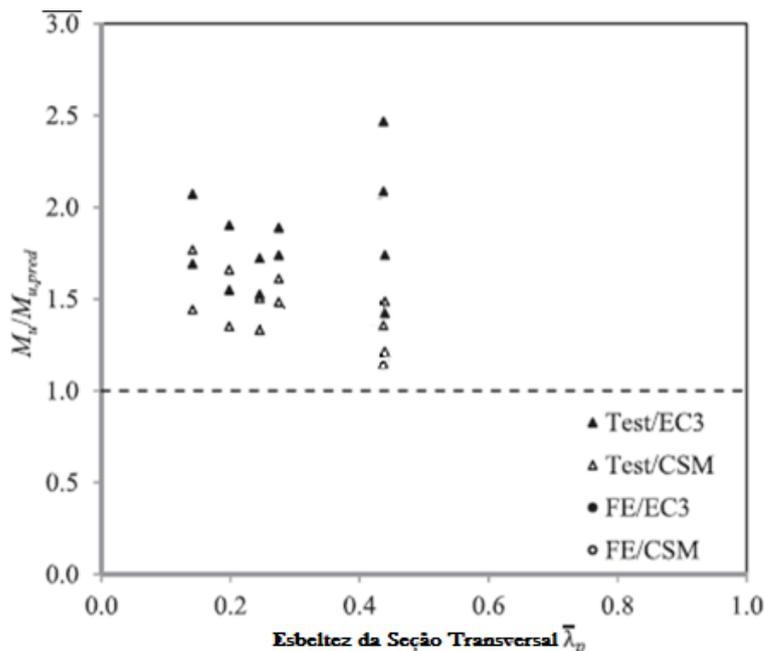


Figura 6 – Comparação dos resultados experimentais e numéricos com a proposta do CSM e o dimensionamento do Eurocode 3, Parte 1.4, para perfis C [20].



**Figura 7 – Comparação dos resultados experimentais e numéricos com a proposta do CSM e o dimensionamento do Eurocode 3, Parte 1.4, para perfis C ensaiados experimentalmente por Theofanous et al. (Adaptado de [20]).**

### 1.5 Efeito Catenária

A ocorrência do efeito catenária pode ser outro ponto importante a ser considerado na determinação da resistência última de uma seção transversal em aço inoxidável. Ele ocorre em estruturas sujeitas a grandes deformações. Seu efeito é estudado em situações onde forças que geram esforços cortantes são resistidas por meio de esforços de tração como, por exemplo, na situação desse estudo, de uma viga biapoiada sujeita a carregamento no meio do seu vão. De acordo com Naji [27], a ação do efeito catenária em uma viga biapoiada não ocorre até que as deformações sejam suficientemente elevadas e a seção transversal da estrutura passe a trabalhar a tração nas fibras superiores, onde antes apresentava tensões de compressão, funcionando quase como um cabo tracionado, outro nome conhecido para o efeito. Essa força é composta por uma componente vertical, que resiste a ação da gravidade, e uma componente horizontal que é transmitida ao elemento adjacente resultando em um aumento da resistência última do perfil.

Chen et al. [24] também analisa um modelo de viga biapoiada para verificação do efeito catenária. O autor desenvolve formulações para o cálculo da resistência da viga nessa situação e faz a avaliação de um pórtico onde é estabelecida uma situação para ocorrência do efeito. Seus resultados são comparados com dados experimentais, demonstrando resultados com boa precisão.

### 1.6 Ramberg-Osgood [22],[36]

Mirambell e Real [22] analisaram a formulação existente proposta por Ramberg-Osgood apresentada no Eurocode 3, Parte 1.4 [17] para determinação de uma curva tensão *versus* deformação representativa para uma seção transversal quadrada SHS 80x80 de aço inoxidável AISI 304. Com a realização de ensaios experimentais, foi possível fazer uma comparação entre resultados obtidos diretamente pelo ensaio e a proposta de Ramberg-Osgood para peças planas. Além disso, também foi analisada uma terceira curva seguindo a formulação de Ramberg-Osgood, porém adotando um ajuste nos coeficientes presentes nas equações para os valores experimentais. Os resultados podem ser verificados na Figura 8.

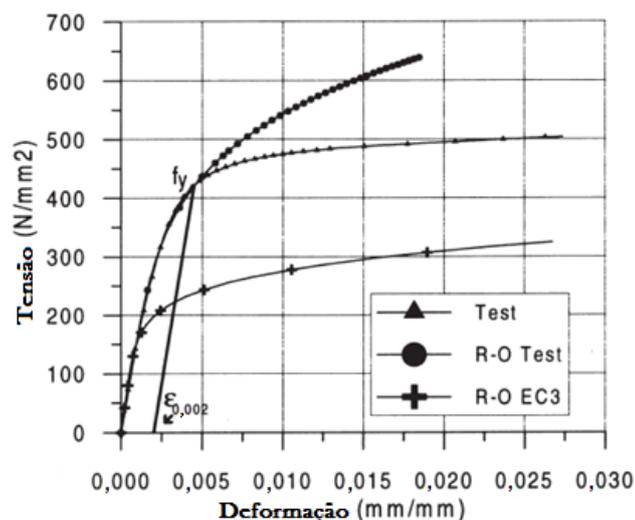
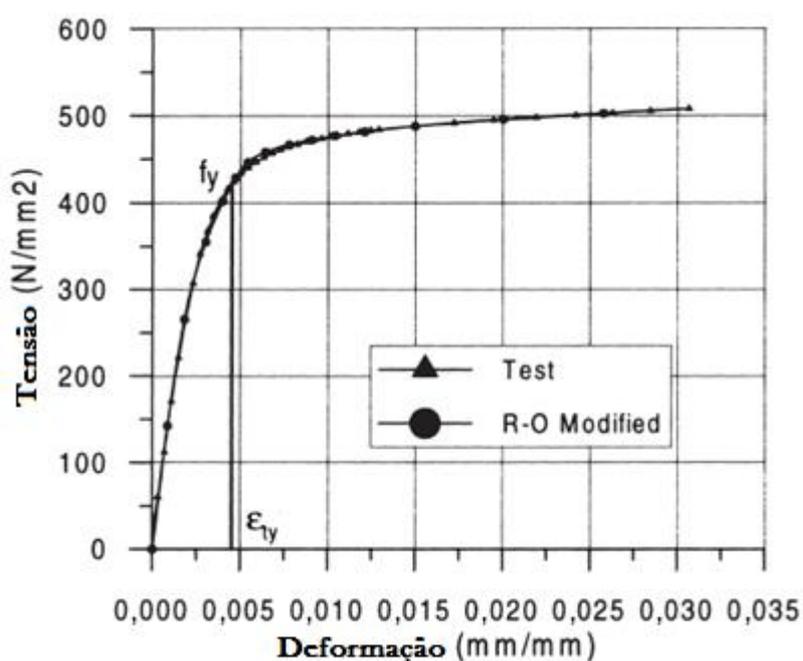


Figura 8 – Curva tensão *versus* deformação para perfil de aço inoxidável SHS 80x80 [22].

A partir desses resultados, pode-se concluir que a correlação entre os resultados experimental e a curva obtida por meio da fórmula de Ramberg-Osgood (R-O *Test*) é adequada para níveis de tensão abaixo do limite de escoamento equivalente. No entanto, para altos níveis de deformação, a correlação não é adequada. Por esse motivo, foi desenvolvida pelos autores, uma nova fórmula baseada na expressão de Ramberg-Osgood para analisar o comportamento à flexão das vigas de aço inoxidável. O resultado para o mesmo perfil SHS 80x80 pode ser verificado na Figura 9. Conclusões semelhantes são obtidas para os aços inoxidáveis para outras seções transversais testadas.



**Figura 9 – Curva tensão *versus* deformação para perfil de aço inoxidável SHS 80x80 com Ramberg-Osgood modificado [22].**

A formulação de Ramberg-Osgood nas formas propostas feitas por Mirambell e Real [22], têm sido comumente usada para descrever a resposta tensão *versus* deformação não linear de aços inoxidáveis em estudos de modelagem numérica de componentes estruturais desse material. A descrição precisa da resposta tensão *versus* deformação do material é de crucial importância para uma boa modelagem numérica, sendo esta curva afetada por diversas características, como a composição química do material e também do processo de fabricação, em particular, o nível de trabalho a frio experimentado.

## **2 DIMENSIONAMENTO TEÓRICO**

### **2.1 Introdução**

Este capítulo apresenta, de forma sintetizada, a descrição do método de dimensionamento para perfis de aço inoxidável apresentado pelo Eurocode 3 – Parte 1.4 [17] e também as formulações para utilização do CSM [21], restringindo-se em ambos os casos, as considerações importantes para o perfil de interesse submetidos a situações de flexão no eixo de menor inércia.

### **2.2. Dimensionamento segundo o Eurocode 3**

O dimensionamento segundo o código europeu é baseado no Eurocode 3 – Parte 1.4 [17], sendo necessária para sua aplicação a utilização em conjunto do Eurocode 3 – Parte 1.1 [28] e Eurocode 3 – Parte 1.5 [29]. Dentre os aços inoxidáveis possíveis na descrição do código estão o aço austenítico, ferrítico e duplex. Esse código será utilizado para avaliação e comparação com os resultados numéricos desenvolvidos neste trabalho. Ressalta-se que existe uma limitação para o emprego das descrições apresentadas, estando ligada a tensão nominal do material, devendo ser menor ou igual a 480 N/mm<sup>2</sup>.

O Eurocode 3 – Parte 1.4 [17] considera diferentes características do material para determinação dos fatores de dimensionamento correto para o cálculo estrutural. Características como o tipo de aço inoxidável, processo de fabricação, a forma do produto e sua espessura, bem como o módulo de elasticidade são considerados. A Tabela 2 apresenta os valores empregados para os fatores parciais, relacionados à resistência da seção estudada.

**Tabela 2 – Fatores Parciais (Adaptado de [17]).**

|  |               |      |
|--|---------------|------|
| Fator parcial de resistência da seção transversal qualquer que seja a classe | $\gamma_{M0}$ | 1,10 |
| Fator parcial de resistência dos membros à instabilidade                     | $\gamma_{M1}$ | 1,10 |
| Fator parcial de resistência da seção transversal à tração                   | $\gamma_{M2}$ | 1,25 |

### 2.2.1 Classificação da seção transversal

A classe dos elementos segundo o Eurocode 3 – Parte 1.4 [17] é definida pelos elementos submetidos a tensões normais de compressão, podendo ser classificados como classe 1, 2, 3 ou 4. Essa classificação se dá pela relação entre largura e espessura do membro analisado, sendo apresentado o limite para cada uma das classes na Tabela 3 e pela Equação (1). As seções classe 1 são aquelas que podem formar rótulas plásticas sem a redução da resistência. A classe 2 corresponde as seções transversais que podem desenvolver sua resistência até o momento plástico, mas tem capacidade de rotação limitada. Já a classe 3 corresponde aos elementos cuja seção sofre flambagem local antes de atingir o momento plástico resistente. As seções classe 4 são as seções esbeltas.

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5} \quad (1)$$

Onde,

E é módulo de elasticidade;

$f_y$  é a tensão de escoamento em N/mm<sup>2</sup>.

Para aplicação dos limites de classe existe uma limitação entre a largura e a espessura do elemento analisado. Nesse caso, a largura não deve exceder um valor 400 vezes maior do que a espessura.

**Tabela 3 – Classificação dos elementos internos comprimidos de seções transversais (Adaptado de [17]).**

| Classe   | Tipo de Seção              | Elemento submetido à compressão | Elemento submetido à flexão e compressão   |   |
|--|----------------------------|---------------------------------|--|---|
|  |                            |                                 | Em compressão                              | Em tração   |
| Distribuição de tensão nos elementos (compressão positiva) |                            |                                 |  |   |
| 1  | Formadas à frio e soldadas | $c/t \leq 9 \epsilon$           | $c/t \leq \frac{9 \epsilon}{\alpha}$       | $c/t \leq \frac{9 \epsilon}{\alpha \sqrt{\alpha}}$  |
| 2  | Formadas à frio e soldadas | $c/t \leq 10 \epsilon$          | $c/t \leq \frac{10 \epsilon}{\alpha}$      | $c/t \leq \frac{10 \epsilon}{\alpha \sqrt{\alpha}}$ |
| Distribuição de tensão nos elementos (compressão positiva) |                            |                                 |  |   |
| 3  | Formadas à frio e soldadas | $c/t \leq 14 \epsilon$          | $c/t \leq 21,0 \epsilon \sqrt{k_{\sigma}}$ |   |

### 2.2.2 Resistência à flambagem para membros sob flexão

O Eurocode 3 – Parte 1.4 [17] estabelece algumas de suas verificações baseadas nas preposições previstas no Eurocode 3 – Parte 1.1 [28] para dimensionamento segundo resistência a flambagem, norma vigente para o trabalho com aço carbono.

De acordo com o item 6.2.5 do Eurocode 3 – Parte 1.1 [29] o momento fletor atuante ( $M_{Ed}$ ) deve ser menor do que a resistência de projeto da seção transversal

$(M_{b,Rd})$ ; essa relação é denominada  $\chi_{LT}$  e pode ser vista na Equação (2). O valor de  $M_{b,Rd}$  é obtido pela Equação (3).

$$\chi_{LT} = \frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (2)$$

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} W_z f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3)$$

Onde,

$W_z$  é o módulo resistente da seção, sendo  $W_{pl,z}$  sobre o eixo principal para a classe 1 e 2 e  $W_{el,z}$  para a classe 3; e  $W_{eff,z}$ , para classe 4.

Os valores de  $W_z$  podem ser calculados por meio da página da internet CalcResource [30], para os casos de perfis que não apresentam estes cálculos tabelados.

Para seções classe 4 torna-se necessário o cálculo das propriedades efetivas da seção transversal segundo a Tabela 4 e Tabela 5, onde, para definição do valor  $\rho$ , usa-se da Equação (4) a Equação (6). E o limite de esbeltez  $\bar{\lambda}_p$  é definido pela Equação (7).

Para elementos internos soldados ou formados a frio:

$$\rho = \frac{0,772\bar{\lambda}_p - 0,125}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \quad (4)$$

Para elementos externos formados a frio:

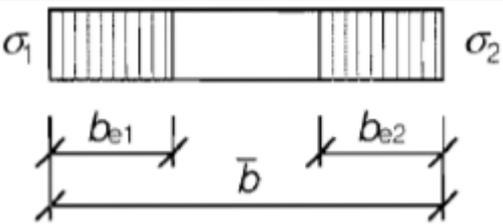
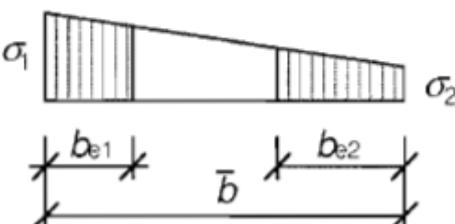
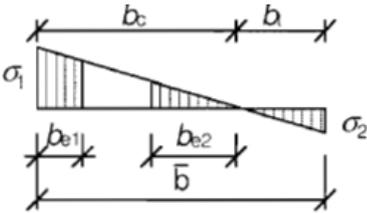
$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,231}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \quad (5)$$

Para elementos externos soldados:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,242}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \quad (6)$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (7)$$

Tabela 4 – Comprimento efetivo para elementos internos sob compressão (Adaptado de [29]).

| Distribuição de tensões normais<br>(compressão positiva)                           |     |                       |      | Largura efetiva ( $b_{eff}$ )  |      |                     |
|--|-----|-----------------------|------|--|------|---------------------|
|   |     |                       |      | $\Psi = 1$<br>$b_{eff} = \rho \bar{b}$<br>$b_{e1} = 0,5 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,5 b_{eff}$                          |      |                     |
|   |     |                       |      | $1 > \Psi \geq 0$<br>$b_{eff} = \rho \bar{b}$<br>$b_{e1} = \frac{2}{5-\Psi} b_{eff} \quad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$ |      |                     |
|  |     |                       |      | $\Psi < 0$<br>$b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1-\Psi)$<br>$b_{e1} = 0,4 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,6 b_{eff}$    |      |                     |
| $\Psi = \sigma_2 / \sigma_1$   | 1   | $1 > \Psi > 0$        | 0    | $0 > \Psi > -1$  | -1   | $-1 > \Psi \geq -3$ |
| Fator de flambagem $k_\sigma$  | 4,0 | $8,2 / (1,05 + \Psi)$ | 7,81 | $7,81 - 6,29\Psi + 9,78\Psi^2$   | 23,9 | $5,98(1 + \Psi)^2$  |

**Tabela 5 – Comprimento efetivo para elementos externos sob compressão (Adaptado de [29]).**

| Distribuição de tensões normais (compressão positiva) |      |                         | Largura efetiva ( $b_{eff}$ )                            |                                |      |
|---|------|-------------------------|--|--------------------------------|------|
|   |      |                         | $1 > \Psi \geq 0$<br>$b_{eff} = \rho c$                  |                                |      |
|   |      |                         | $\Psi < 0$<br>$b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \Psi)$ |                                |      |
| $\Psi = \sigma_2 / \sigma_1$                          | 1    | 0                       | -1   | $1 > \Psi \geq -3$             |      |
| Fator de flambagem $k_\sigma$                         | 0,43 | 0,57                    | 0,85   | $0,57 - 0,21\Psi + 0,07\Psi^2$ |      |
|   |      |                         | $1 > \Psi \geq 0$<br>$b_{eff} = \rho c$                  |                                |      |
|   |      |                         | $\Psi < 0$<br>$b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \Psi)$ |                                |      |
| $\Psi = \sigma_2 / \sigma_1$                          | 1    | $1 > \Psi > 0$          | 0  | $0 > \Psi \geq -1$             | -1   |
| Fator de flambagem $k_\sigma$                         | 0,43 | $0,578 / (\Psi + 0,34)$ | 1,70   | $1,7 - 5\Psi + 17,1\Psi^2$     | 23,8 |

Para definição das propriedades plásticas da seção transversal, tem-se que o momento plástico ( $M_{pl}$ ) da seção transversal e a respectiva rotação desse momento ( $\theta_{pl}$ ) são apresentados na Equação (8) e na Equação (9). Vale destacar que para cálculo da rotação do meio da viga, é realizada a soma dos valores de rotação em ambos os apoios.

$$M_{pl} = W_{pl,z} f_y \quad (8)$$

$$\theta_{pl} = \frac{M_{pl} L}{2EI} \quad (9)$$

Onde,

$M_{pl}$  é o momento plástico da seção;

$W_{pl,z}$  é o módulo plástico da seção;

$f_y$  é a tensão de escoamento;

$\theta_{pl}$  é a rotação referente ao momento plástico;

$L$  é o comprimento do vão;

$I$  é momento de inércia;

$E$  é módulo de elasticidade.

### 2.3 Dimensionamento segundo o Método da Resistência Contínua - CSM

Muitos dos principais conceitos de dimensionamento de estruturas metálicas atuais são baseados com base em modelos de comportamento bilinear. O Método de Resistência Contínua (CSM) representa uma alternativa a essa abordagem, baseando-se na relação contínua entre a esbeltez e a flambagem local, avaliando a deformação do elemento estudado permitindo o aproveitamento do ganho de resistência devido ao encruamento do material [18]. O CSM foi originalmente desenvolvido para seções não esbeltas duplamente simétricas (por exemplo, seções tubulares e seções I) e foi recentemente estendido para cobrir o dimensionamento de seções esbeltas e seções não duplamente simétricas [21].

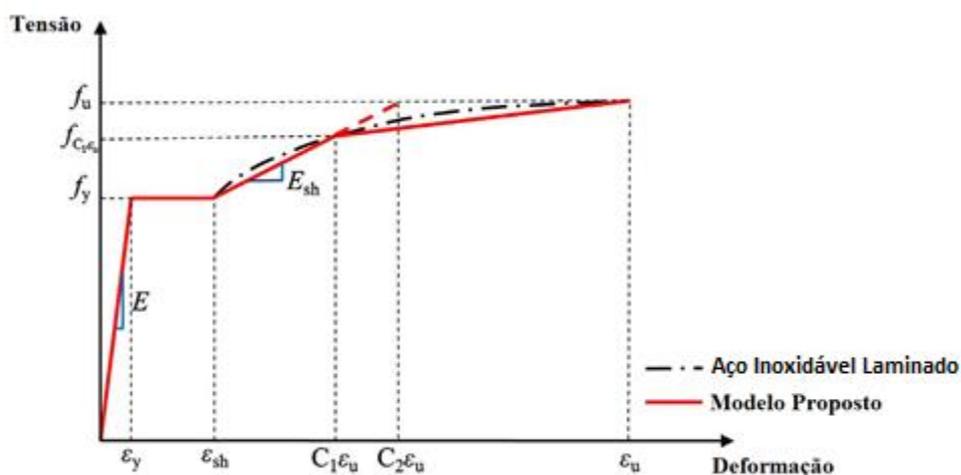
As equações apresentadas são baseadas nas preposições de Yun et al. [19], onde é tratado o dimensionamento de seções transversais laminadas. Além disso, foram verificadas as condições propostas por Zhao [21] que abrange o campo de atuação possível para uma gama maior de situações, inclusive perfis esbeltos, e o estudo de Liang et al. [32],[33] que desenvolveu um estudo paramétrico e experimental para perfis C, com esbeltezes variadas, sob ação combinada de compressão e flexão sob o eixo de menor inércia.

Por meio dos coeficientes da Tabela 6 é possível determinar uma série de parâmetros que serão utilizados para o dimensionamento do CSM, segundo um modelo quadrilinear que pode ser observado na Figura 10.

**Tabela 6 – Sumário dos coeficientes do CSM para materiais metálicos (Adaptado de [21])**

| Material                            | C1   | C2   | C3   |
|-------------------------------------|------|------|------|
| Aço carbono laminado a quente *     | -    | -    | -    |
| Aço carbono formado a frio          | 0,40 | 0,45 | 0,60 |
| Aço de alta resistência             | 0,40 | 0,45 | 0,60 |
| Aço inoxidável austenítico e duplex | 0,10 | 0,16 | 1,00 |
| Aço inoxidável ferrítico            | 0,40 | 0,45 | 0,60 |
| Alumínio                            | 0,50 | 0,50 | 0,13 |

\* Valores para o aço carbono laminado a quente ainda estão sendo desenvolvidos.



**Figura 10 – Curva típica do aço inoxidável laminado a quente e modelo proposto [19].**

O parâmetro  $E_{sh}$  representa a inclinação do ganho de resistência devido ao encruamento inicial e pode ser calculado segundo a Equação (10). A relação da deformação máxima segundo o CSM e a deformação de escoamento são determinadas para perfis esbeltos e curtos, que são definidos segundo o limite de 0,68 para o limite de esbelteza  $\bar{\lambda}_p$  dado pela Equação (11), onde  $\epsilon_{sh}$  é a deformação após encruamento e  $\sigma_{cr}$  é a tensão crítica.

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \epsilon_u - \epsilon_{sh}} \quad (10)$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \epsilon \sqrt{k_\sigma}} \quad (11)$$

É válido destacar que para cálculo do valor de  $\bar{\lambda}_p$ , Zhao e Gardner [20] utilizam-se da primeira parte da Equação (11) e calculam  $\sigma_{cr}$  com o auxílio do programa CUFSM [31], sendo este a tensão de flambagem local crítica, obtida do modo de flambagem relevante em uma análise de autovalor corresponde à tensão do corpo de prova de 0,2% (tensão de escoamento). Deve-se notar que este procedimento leva em conta a interação dos elementos do perfil, enquanto a segunda parte da Equação (11) analisa cada elemento separadamente e utiliza o mais crítico.

Para o cálculo do valor da tensão crítica de flambagem, são adicionadas no CUFSM [31], todas as características do perfil estudado, incluindo sua tensão de escoamento, tensão última, módulo de Young e propriedades geométricas. O resultado é mostrado na forma de um fator de carregamento, que pode ser visto na Figura 11, que deve ser multiplicado pela tensão de escoamento para obtenção da tensão desejada.

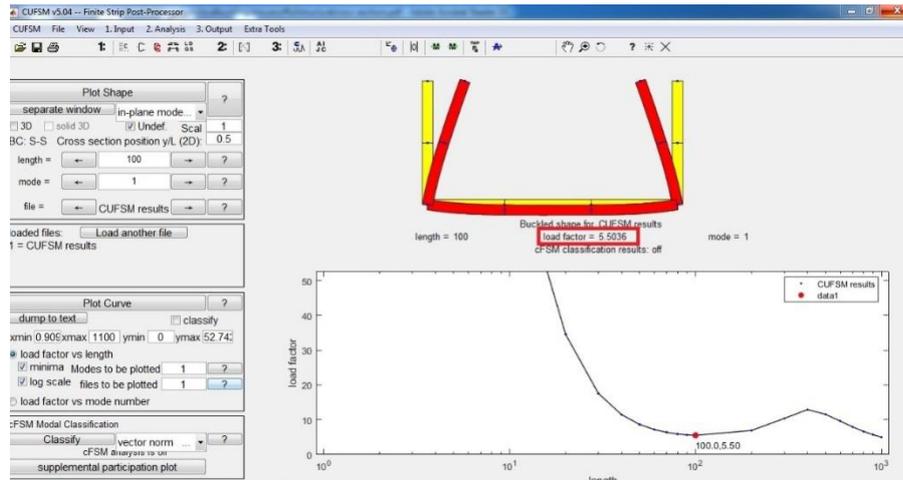


Figura 11 – Resultados do CUFSM. [31]

Para cálculo da relação  $\epsilon_{csm} / \epsilon_y$  que será utilizada para obtenção do momento resistente, tem-se a Equação (12) e a Equação (13).

Para  $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ :

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \text{mínimo} \left( \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{3,6}}; 15; \frac{C_1 \epsilon_u}{\epsilon_y} \right) \quad (12)$$

Para  $\bar{\lambda}_p > 0,68$ :

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \left( 1 - \frac{0,222}{\bar{\lambda}_p^{1,050}} \right) \frac{1}{\bar{\lambda}_p^{1,050}} \quad (13)$$

O momento resistido é calculado segundo a Equação (14) e a Equação (15). Onde  $\alpha$  é o coeficiente de flexão do CSM, que para o caso de perfis C em flexão na menor inércia é igual a 1,5 [20].

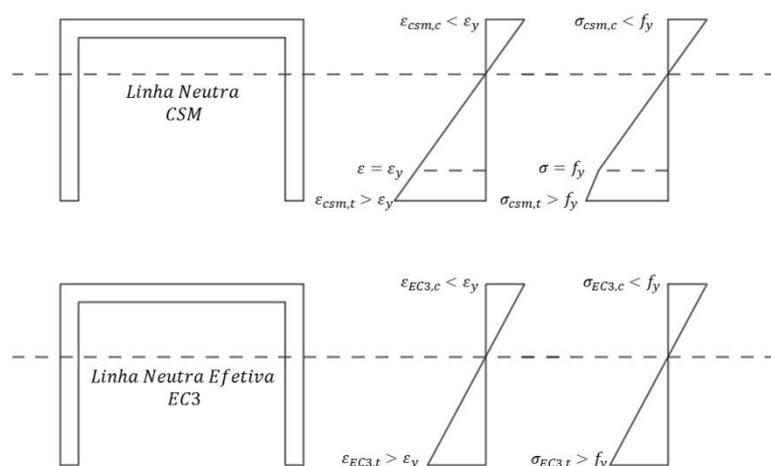
Para  $\epsilon_{csm} \geq \epsilon_y$ :

$$M_{csm,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{Y_{M0}} \left[ 1 + \frac{E_{sh}}{E} \frac{W_{el}}{W_{pl}} \left( \frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} - 1 \right) - \left( 1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}} \right) / \left( \frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} \right)^\alpha \right] \quad (14)$$

Para  $\epsilon_{csm} < \epsilon_y$ :

$$M_{\text{csm,Rd}} = \frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} \frac{W_{\text{el}} f_y}{Y_{\text{M0}}} \quad (15)$$

Também foi observado que para perfis C esbeltos (ou seja,  $\bar{\lambda}_p > 0,68$ ) sob a orientação “n”, onde a linha neutra de projeto é mais próximo da fibra externa compressiva, embora a deformação de compressão  $\varepsilon_{\text{csm,c}}$  seja menor que a deformação de escoamento  $\varepsilon_y$ , a tensão de tração  $\varepsilon_{\text{csm,t}}$  pode ser significativamente maior do que este valor, como visto na Figura 12. Esse benefício surge da propagação da plasticidade e do endurecimento por tensão, permitindo resistências finais de momento fletor maiores do que a capacidade do momento plástico. Esse comportamento, previsto pelo CSM [21] e observado em testes experimentais [10], contrasta com a capacidade efetiva de momento determinada pela Eurocode 3 - Parte 1.4 [17]. As distribuições de tensão normal para uma seção esbelta, fletindo no eixo de menor inércia na orientação “n” podem ser vistas na Figura 12.



**Figura 12 – Comparação da distribuição de tensões normais para seções esbeltas segundo o EN 1993-1-4 e o CSM (Adaptado de [32]).**

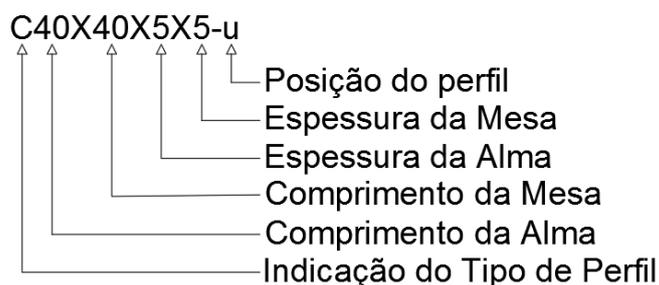
### 3 ANÁLISES EXPERIMENTAIS

#### 3.1 Considerações iniciais

O presente capítulo apresenta a metodologia inicial de caracterização dos materiais e geometria referente à execução do programa experimental que seria desenvolvido no Laboratório de Fonseca Telles da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

O programa experimental tinha como objetivo, investigar o comportamento do aço inoxidável AISI 304 de perfis C feitos em chapa dobrada. Devido a limitações impostas pela pandemia do Sars-CoV-2, foram realizados apenas testes a compressão em corpos de prova dos perfis C C40X40X5X5 e C80X80X3X3, e testes a tração de corpos de provas retirados do perfil C80X80X3X3.

Além disso, foram aferidas as medições das imperfeições geométricas locais e globais de perfis C40X40X5X5 e C80X80X3X3. A nomenclatura do perfil segue o modelo apresentado na Figura 13, onde a última parte, que indica a posição do perfil, não é utilizada em algumas etapas, pois ainda não é identificada a configuração de carregamento que eles serão testados.



**Figura 13 – Nomenclatura dos modelos.**

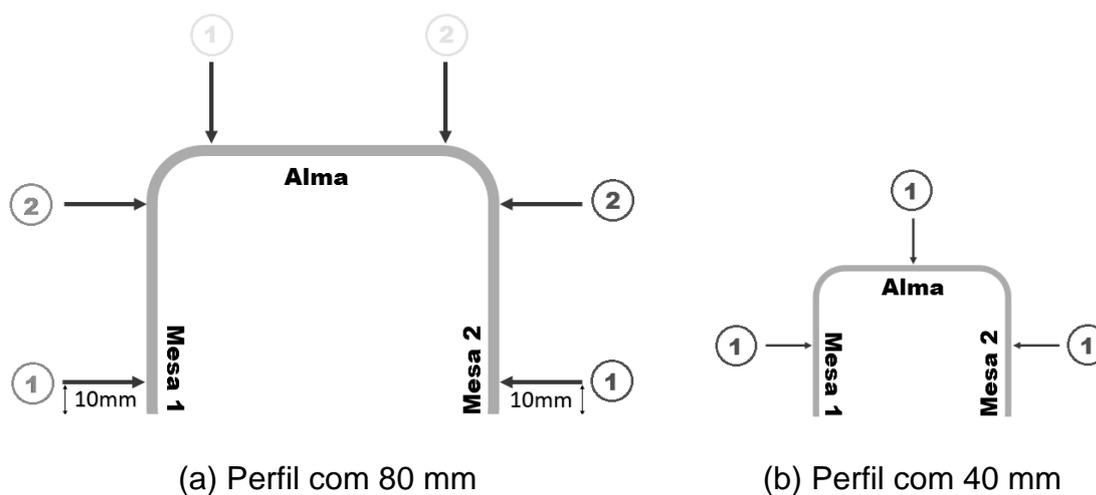
### 3.2 Descrição dos Perfis C em aço inoxidável ensaiados

Os perfis estudados aqui, diferente dos ensaiados por Theofanaus et al. [10], são fabricados pelo processo de dobra a frio, sendo feito do mesmo material AISI 304. Esse fato é importante, pois os perfis desenvolvidos numericamente não terão alterações devido a essa diferença do modo de fabricação, pois, segundo Eurocode 3, Parte 1-3 [34], a influência singular dos cantos arredondados que ocorrem em chapas dobradas pode ser desconsiderada em casos onde o raio interno dessas bordas é menor do que cinco vezes a espessura do perfil.

Entretanto, os perfis formados a frio possuem diferença quanto aos perfis laminados principalmente na questão do acúmulo de tensões em suas quinas ou cantos, o que é interessante para ser observado nas comparações entre análises experimentais e numéricas para verificar se essas tensões resultarão em diferença significativa do comportamento esperado, uma vez que os primeiros resultados foram calibrados segundo os ensaios realizados por Theofanaus et al. [10].

#### 3.2.1 Aferição das imperfeições geométricas iniciais

As imperfeições geométricas iniciais, ao longo do comprimento dos perfis foram medidas por meio da leitura de transdutores de deslocamento, LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) em cada uma das mesas e da alma da seção transversal. Para os perfis com 80 mm de dimensão foram utilizados dois LVDTs para cada etapa, posicionados na parte plana do perfil, imediatamente após a curvatura do canto e a 10 mm de distância das bordas das mesas. Para o perfil de 40 mm, apenas um LVDT foi utilizado em cada um dos lados, devido a limitação de espaço para posicionamento do mesmo, posicionado no meio do comprimento dos mesmos.



**Figura 14 – Posicionamento dos LVDTs.**

A medição é realizada com o auxílio de um carrinho móvel onde o perfil a ser medido é fixado. Este conjunto, carrinho-perfil, é um sistema que se desloca de 100 em 100 mm, de forma que os LVDTs, que estão fixados em uma barra auxiliar, possam realizar a medida das imperfeições ao longo do comprimento do perfil. A Figura 14 ilustra esse sistema. Dessa forma, a medida é realizada três vezes, de forma a diminuir a interferência humana no resultado, para cada uma das mesas da seção transversal, bem como para a alma. A identificação dos LVDTs é utilizada para posterior análise de cada elemento do perfil.

No total, foram realizadas as medições de 12 perfis: 8 perfis C40X40X5X5, sendo 4 com comprimento total de 850 mm cada e 4 com comprimento de 1600 mm; e 4 perfis C80X80X3X3, com comprimento de 1600 mm.

A Figura 16 apresenta a evolução dos deslocamentos medidos pelos LVDTs ao longo do comprimento de um dos perfis C80X80X3x3, denominado C80X80X3x3-1, sendo ilustrado por meio de um eixo vertical, o deslocamento total em milímetros, e um eixo horizontal que representa o comprimento do vão do perfil de forma normalizada. As demais imperfeições podem ser vistas no APÊNDICE A. Nota-se que as mesas são numeradas considerando sempre que as medições foram realizadas segundo a posição do perfil apresentada na Figura 14, sendo a Mesa 1, o elemento da esquerda e a Mesa 2, o da direita.

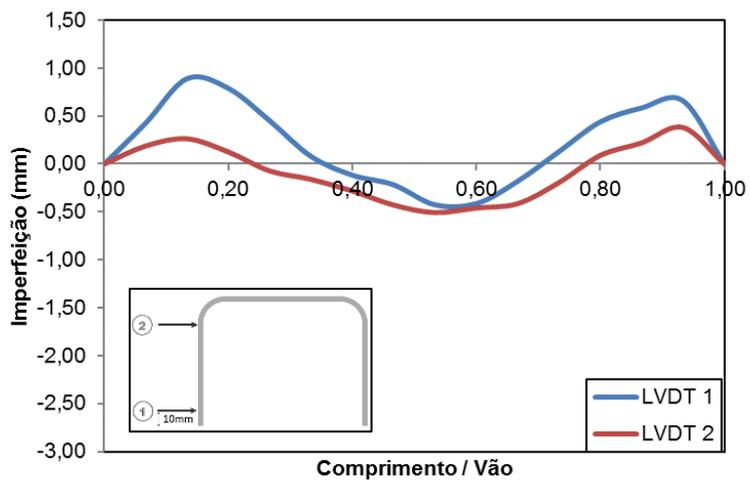
A Tabela 7 e a Tabela 8 apresentam as leituras mínimas e máximas dos transdutores de deslocamento obtidas para cada um dos ensaios. O sinal dos valores deve ser interpretado como deslocamento em direção ao interior da seção transversal (positivo) ou para fora (negativo). A Figura 15 mostra uma das medições que foi executada cujo resultado pode ser visto na Figura 16.



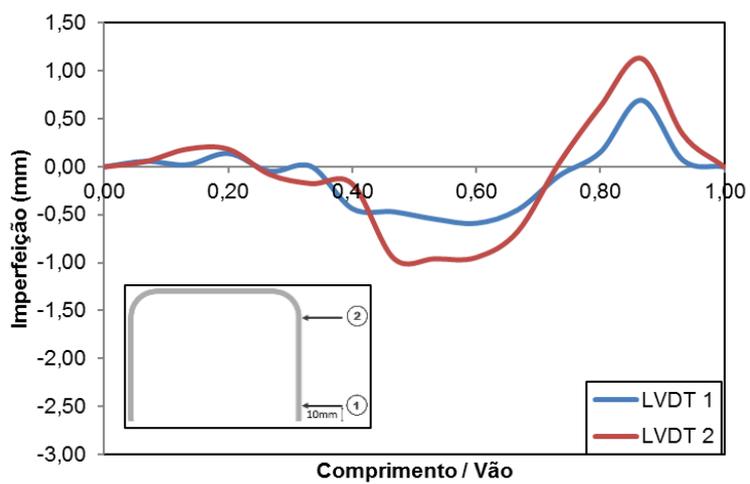
**Figura 15 – Configuração da verificação das imperfeições iniciais da alma do perfil C80X80X3X3.**

**Tabela 7 – Medidas mínimas e máximas obtida pelos transdutores de deslocamento do perfil C80X80X3X3.**

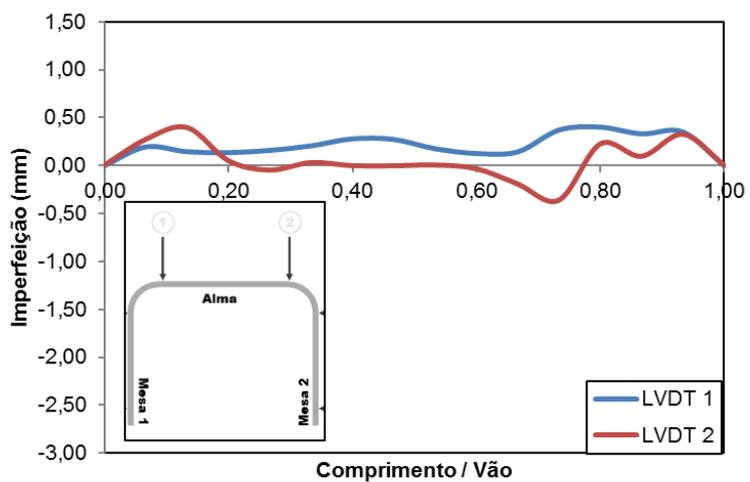
| Perfil     | Vão    | Alma          |               | Mesa1         |               | Mesa2         |               |
|------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|            |        | LVDT1<br>(mm) | LVDT2<br>(mm) | LVDT1<br>(mm) | LVDT2<br>(mm) | LVDT1<br>(mm) | LVDT2<br>(mm) |
| C80X80X3X3 | 1500-1 | 0,40          | 0,66          | 1,25          | 0,53          | 0,94          | 0,90          |
|            |        | -1,14         | 0,00          | 0,00          | -0,01         | 0,11          | -0,01         |
|            | 1500-2 | 0,49          | 0,45          | 0,98          | 0,74          | 0,55          | 1,16          |
|            |        | 0,00          | -0,01         | -0,65         | -0,51         | -0,65         | -0,51         |
|            | 1500-3 | 0,40          | 0,39          | 0,89          | 0,38          | 0,69          | 1,13          |
|            |        | 0,00          | -0,36         | -0,43         | -0,51         | -0,43         | -0,51         |
|            | 1500-4 | 0,33          | 0,25          | 0,66          | 1,02          | 0,80          | 0,29          |
|            |        | -0,06         | -0,07         | -0,42         | -1,30         | -0,42         | -1,30         |



(a) Mesa 1



(b) Mesa 2



(b) Alma

**Figura 16 – Desenvolvimento das leituras dos LVDTs ao longo comprimento do perfil C80X80X3x3 denominado 1500-1.**

**Tabela 8 – Medidas mínimas e máximas obtida pelos transdutores de deslocamento do perfil C40X40X5X5.**

| Perfil     | Vão    | Alma      | Mesa1     | Mesa2     |
|------------|--------|-----------|-----------|-----------|
|            |        | LVDT (mm) | LVDT (mm) | LVDT (mm) |
| C40X40X5X5 | 750-1  | 0,00      | 0,40      | 0,09      |
|            |        | -0,61     | 0,00      | -0,07     |
|            | 750-2  | 0,04      | 0,49      | 0,28      |
|            |        | -0,68     | -0,10     | -0,22     |
|            | 750-3  | 0,00      | 0,04      | 0,61      |
|            |        | -0,76     | -0,19     | 0,00      |
|            | 750-4  | 0,00      | 0,06      | 0,46      |
|            |        | -0,61     | -0,14     | 0,00      |
|            | 1500-1 | 0,07      | 0,48      | 0,23      |
|            |        | -0,77     | -0,22     | -0,22     |
|            | 1500-2 | 0,00      | 0,72      | 0,00      |
|            |        | -1,10     | 0,00      | 0,35      |
|            | 1500-3 | 0,08      | 0,00      | 1,01      |
|            |        | -1,00     | -2,33     | -2,33     |
|            | 1500-4 | 0,28      | 0,48      | 0,00      |
|            |        | -0,33     | 0,00      | 0,12      |

Os valores encontrados se mostraram coerentes, com imperfeições pequenas que não devem afetar o comportamento do perfil, chegando a máximos de -1,14 mm e 1,25 mm para o perfil C80X80X3X3 e de -2,33 mm e 1,01 mm para o perfil C40X40X5X5.

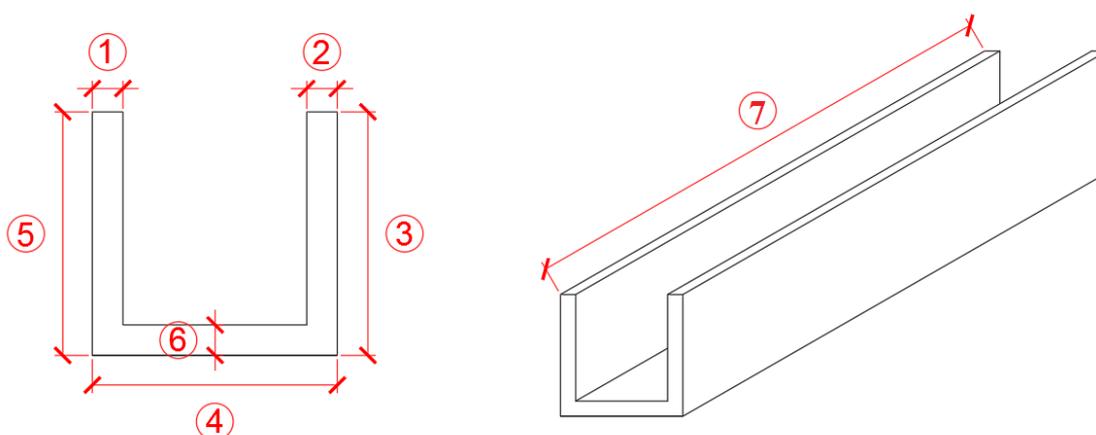
### 3.2.2 Geometria dos perfis

Além da verificação das imperfeições iniciais, também foram aferidas as medidas reais da seção transversal dos 12 perfis disponíveis. A realização dessas medidas buscou uma verificação da padronização da fabricação dos mesmos, bem como determinar as reais dimensões das seções para permitir

uma melhor modelagem numérica das mesmas, aproximando ao máximo, o modelo experimental do numérico para melhor avaliação dos resultados.

Cada perfil teve seis dimensões medidas, sendo elas as espessuras das duas mesas ( $t_r$ ), correspondente as medições 1 e 2, a espessura da alma ( $t_w$ ), referente a medição 6, o comprimento das mesas ( $h$ ), medidas em 3 e 5, e da alma ( $b$ ), por meio da medição 4, e o comprimento total do perfil ( $L$ ), referente a medição 7, como visto na Figura 17. Todas as dimensões foram medidas um total de três vezes para garantir melhor precisão dos dados. Os resultados podem ser vistos no APÊNDICE B.

Uma vez obtidas todas as medidas, uma média para os valores da seção transversal foi realizada, que pode ser vista na Tabela 9. Vale ressaltar que as medidas foram retiradas com o auxílio de um paquímetro digital, com exceção do comprimento total do perfil que foi medido a partir de uma trena manual.



**Figura 17 – Dimensões medidas.**

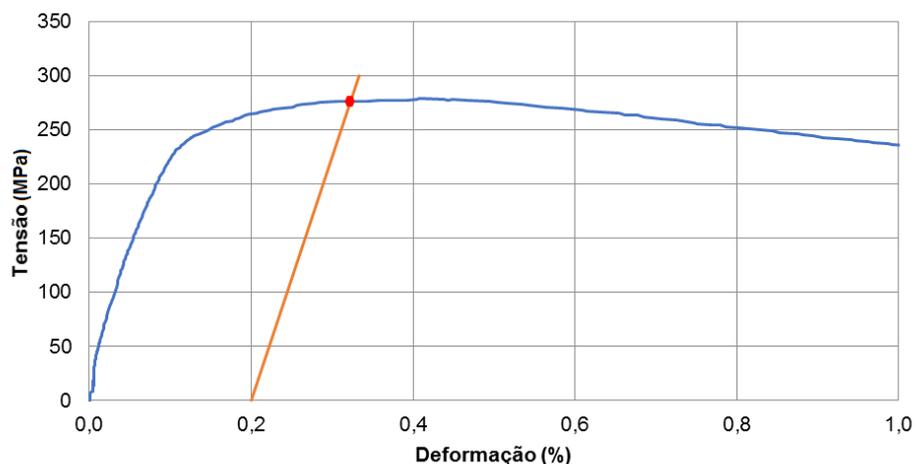
**Tabela 9 – Medidas das seções transversais dos perfis.**

| Dimensão | C40x40x5x5x1500 | C40x40x5x5x750 | C80x80x3x3x1500 |
|----------|-----------------|----------------|-----------------|
| $t_w$    | 5,19            | 5,06           | 3,24            |
| $t_f$    | 5,14            | 5,06           | 3,29            |
| $b$      | 41,18           | 41,37          | 81,53           |
| $h$      | 40,16           | 40,16          | 81,01           |
| $L$      | 1600,00         | 850,00         | 1607,50         |

### 3.2.3 Caracterização do material

A caracterização do material é importante para a verificação das reais propriedades mecânicas do material, obtidas por meio de ensaios experimentais, que permitem uma melhor avaliação dos perfis em análises experimentais e numéricas possíveis. Neste trabalho, os perfis C40x40x5x5 e C80x80x3x3 feitos de chapa dobrada de aço inoxidável austenítico AISI 304 serão caracterizados mediante os esforços de compressão e tração na direção paralela à laminação.

Uma característica importante do aço inoxidável é que este material não possui patamar de escoamento bem definido nas curvas tensão *versus* deformação, isto é, o escoamento ocorre gradativamente e, portanto, não é possível determinar facilmente sua tensão de escoamento. Portanto, para o cálculo dessa propriedade será adotado um procedimento padrão onde uma reta, com inclinação igual ao do módulo de elasticidade, é posicionada no ponto de deformação de 0,2% e o valor da tensão de escoamento é o ponto de interseção desta reta com a curva tensão *versus* deformação, procedimento esse ilustrado na Figura 18.



**Figura 18 – Exemplo de determinação da tensão de escoamento aproximada ( $f_{0,2}$ ).**

### 3.2.3.1 Caracterização à tração

O ensaio de tração é o método mais utilizado para se obter as propriedades mecânicas do aço, e consiste em aplicar uma força crescente uniaxial de tração (força de sentido único) em corpos de prova padronizados, provocando um alongamento do material até que ocorra a ruptura. Deste modo, obtêm-se as propriedades mecânicas do material quando submetido ao esforço de tração.

Para realização desse ensaio são necessários corpos de prova, que são retirados do perfil de interesse, com dimensões definidas de acordo com a NBR 6892 [35]. Com auxílio da Tabela 10 é possível determinar o anexo da norma que deve ser usado para cálculo.

De forma a se adequar aos perfis propostos nesse trabalho, foram realizadas análises segundo o ANEXO B da norma, para perfis com espessura entre 0,1 mm e 3 mm, cujos padrões de dimensões podem ser vistos da Tabela 11, e também o ANEXO D da Norma, dimensões na Tabela 12, para produtos com espessura igual ou superior a 3 mm.

Tabela 10 – Principais tipos de corpos de prova conforme o tipo de produto [35].

| Tipo de Produto  |  | Anexo correspondente |
|--|--|----------------------|
| <p>Chapas — Placas —<br/>Produtos planos</p>  <p>Espessura<br/><i>a</i></p> | <p>Fio — Barras — Perfis</p>  <p>Diâmetro ou lado</p> |                      |
| $0,1 \leq a < 3$   | -  | B                    |
| -  | $< 4$  | C                    |
| $a \geq 3$   | $\geq 4$   | D                    |
| Tubos  |  | E                    |

Tabela 11 – Dimensões dos corpos de prova [35].

| Tipo de corpo de prova | Largura $b_0$ | Comprimento de medida inicial $L_0$ | Comprimento paralelo $L_c$ |             | Comprimento livre entre garras para corpo de prova de lados paralelos |
|------------------------|---------------|-------------------------------------|----------------------------|-------------|---|
|                        |               |                                     | Mín.                       | Recomendado |   |
| 1                      | $12,5 \pm 1$  | 50                                  | 57                         | 75          | 87,7  |
| 2                      | $20 \pm 1$    | 80                                  | 90                         | 120         | 140   |
| 3                      | $25 \pm 1$    | $50^a$                              | $60^a$                     | -           | Não definido  |

a - Os quocientes  $L_0/b_0$  e  $L_c/b_0$  para um corpo de prova do tipo 3, em comparação com um dos tipos 1 e 2 são muito baixos. Como consequência, as propriedades, especialmente o alongamento após fratura (valor absoluto e amplitude de valores individuais), medido com esse corpo de prova, serão diferentes dos de corpos de prova de outros tipos.

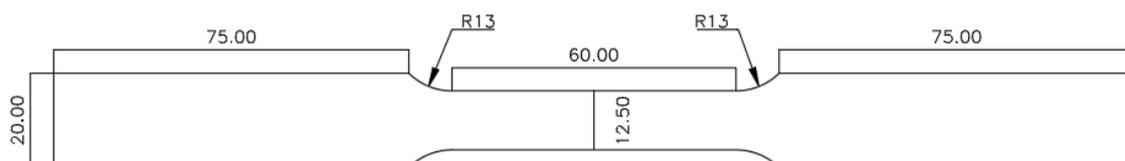
Tabela 12 – Dimensões típicas de corpos de prova planos (medidas em mm) [35].

| Largura $b_0$ | Comprimento de medida inicial $L_0$ | Comprimento paralelo mínimo $L_c$ | Comprimento total aproximado $L_c$ |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 40            | 200                                 | 220                               | 450                                |
| 25            | 200                                 | 215                               | 450                                |
| 20            | 80                                  | 90                                | 300                                |

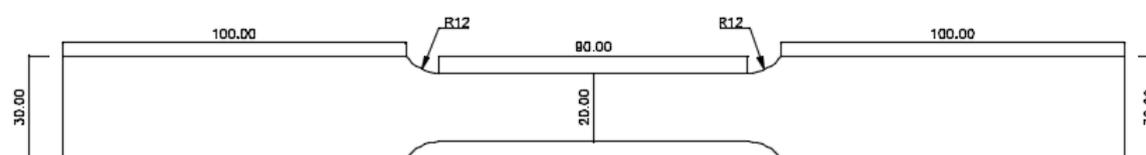
Os corpos de prova foram então definidos para esse estudo e podem ser vistos na Figura 19 e na Figura 20. Vale destacar que apesar da definição dos dois padrões, optou-se por seguir com as medidas adequadas ao Anexo D para as duas seções transversais, uma vez que ao serem aferidas as medidas reais do Perfil C80X80X3X3 foi possível verificar que todas as espessuras passavam dos 3 mm especificados pelo fabricante, e assim, empregou-se os modelos referentes a espessuras maiores que os 3 mm limitados pela norma.

Uma vez definidas as dimensões dos corpos de prova, foi determinada a quantidade a ser retirada de cada perfil de forma que gerassem uma quantidade de dados viáveis segundo o material disponível, tendo sido 10 corpos para C80x80x3x3 e 10 para o C40x40x5x5, sendo: 3 perfis retirados das almas, garantido que não sejam todos da mesma alma, 3 perfis da mesa e 2 perfis das quinas.

A extração dos corpos de prova foi feita utilizando-se técnicas de corte por jato d'água e tentando aproveitar a região mais afastada possível dos cantos dos perfis, de forma a evitar o máximo possível, o surgimento de tensões residuais. Além disso, o corte totalmente a frio não altera as propriedades mecânicas do material.



**Figura 19 – Corpos de prova segundo o anexo B.**



**Figura 20 – Corpos de prova segundo o anexo D.**

Os ensaios foram realizados na máquina INSTRON 3382, utilizando o *software* Bluehill 3 para obtenção dos dados. Para realização dos ensaios são incluídas as propriedades geométricas dos corpos de prova, definidas na Figura 20, além da velocidade desejada para o carregamento do ensaio.

Apesar da máquina já fornecer uma medida de deformação para o ensaio, é utilizado também um *clip gage* para auxiliar na aferição das deformações iniciais, até 5% de alongamento, garantindo maior redundância nessa etapa. Esse acessório, que pode ser visto na Figura 21, deve ser retirado manualmente do ensaio ao atingir uma deformação de 5%.



Figura 21 – Corpos de prova na máquina INSTRON 3382.

A Figura 22 apresenta o alongamento ocorrido em um dos corpos de prova desses ensaios. A Figura 23 apresenta as curvas tensão *versus* deformação obtidas dos corpos de prova da alma e da mesa do perfil C80x80x3x3. Devido à situação atípica da pandemia de COVID-19, esses foram os únicos ensaios que puderam ser realizados antes da paralisação das atividades presenciais no laboratório.

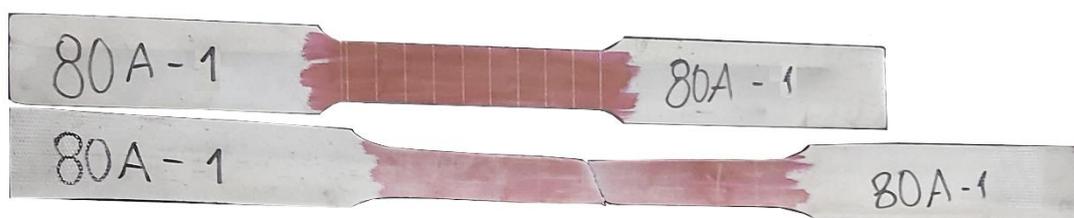
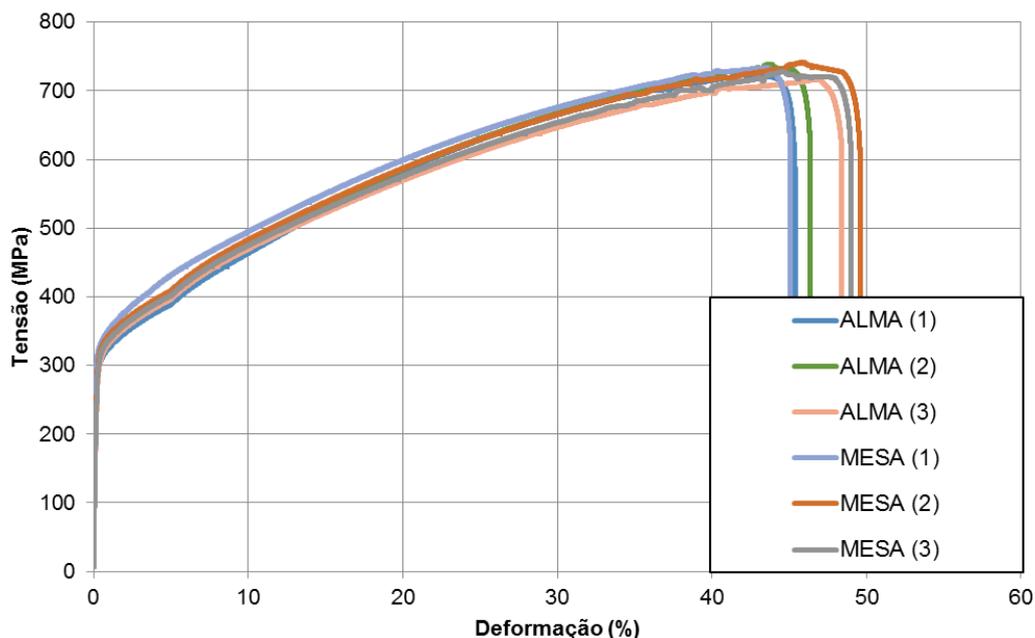


Figura 22 – Corpos de prova na antes e depois do ensaio.



**Figura 23 – Curvas tensão *versus* deformação C80x80x3x3.**

As propriedades mecânicas obtidas dos seis corpos de prova para a seção transversal são apresentadas na Tabela 13, características como módulo de elasticidade ( $E$ ); tensão de escoamento aproximada ( $f_{0,2}$ ), calculada por meio de uma aproximação com uma reta de inclinação equivalente ao módulo de elasticidade em 0,2% de deformação, tensão máxima ( $f_u$ ); deformação correspondente a tensão máxima ( $\epsilon_u$ ) e deformação final na ruptura do corpo de prova ( $\epsilon_f$ ).

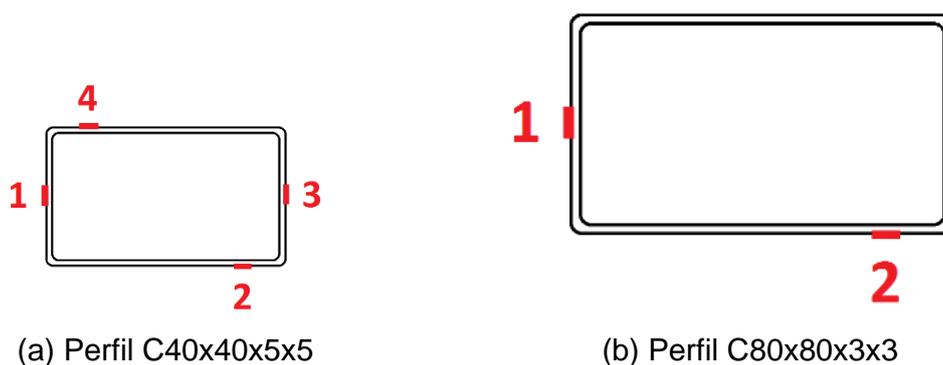
**Tabela 13 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de caracterização à tração do perfil C80x80x3x3.**

| Ensaio |   | $E$ (GPa) | $f_{0,2}$ (MPa) | $f_u$ (MPa) | $\epsilon_u$ (%) | $\epsilon_f$ (%) |
|--------|---|-----------|-----------------|-------------|------------------|------------------|
| Alma   | 1 | 267,4     | 291,8           | 725,3       | 41,9             | 45,5             |
|        | 2 | 175,2     | 311,5           | 739,1       | 43,7             | 46,4             |
|        | 3 | 144,3     | 306,1           | 716,5       | 46,9             | 48,4             |
| Mesa   | 1 | 156,0     | 252,9           | 590,7       | 62,3             | 64,5             |
|        | 2 | 177,7     | 313,9           | 741,1       | 45,9             | 49,6             |
|        | 3 | 151,9     | 313,4           | 727,7       | 44,6             | 49,0             |
| Média  |   | 178,7     | 298,3           | 706,7       | 47,5             | 50,6             |

### 3.2.3.2 Caracterização à compressão

Foram realizados dois ensaios de caracterização à compressão, um ensaio para cada seção transversal, a fim de se obter as curvas tensão *versus* deformação do material nesta condição. Para execução mais precisa do ensaio, foi utilizada uma configuração, juntando dois perfis C pelas mesas de forma a se obter um perfil tubular. Para tanto, empregou-se solda intermitente ao longo do comprimento do perfil para garantir boa estabilidade na execução do ensaio.

Os perfis foram preparados e incluídos os extensômetros, conforme Figura 24. O perfil C40x40x5x5 foi confeccionado com 200 mm de altura e quatro extensômetros ao longo da sua seção transversal. Uma vez que eram esperadas deformações com valores menores, e a fim de permitir uma melhor captação desses resultados, foram adicionados um número maior de extensômetros para garantir a qualidade das medições. Para o perfil C80x80x3x3 foram utilizados apenas dois extensômetros e o corpo de prova possuía 300 mm de comprimento. Em ambos os perfis foram utilizados extensômetros lineares, posicionados na meia altura do perfil para medição de deformações verticais.



**Figura 24 – Localização dos extensômetros nos perfis.**

A preparação dos corpos de prova também contou com um processo para definir uma malha que auxilia na avaliação visual das deformadas ao longo do processo do ensaio. Além disso, foram tomados os devidos cuidados

nas extremidades do perfil, de forma a evitar desalinhamentos que pudessem provocar rotações iniciais no perfil que, por consequência, pudessem gerar excentricidades na carga aplicada. No fim de todo esse processo, foi verificado a qualidade da solda, do funcionamento dos extensômetros e o nivelamento dos perfis, bem como o comprimento final do perfil que foi alterado devido ao processo de nivelamento. O resultado pode ser visto na Figura 25, ficando assim os perfis com comprimentos finais de 170 mm e 290 mm.



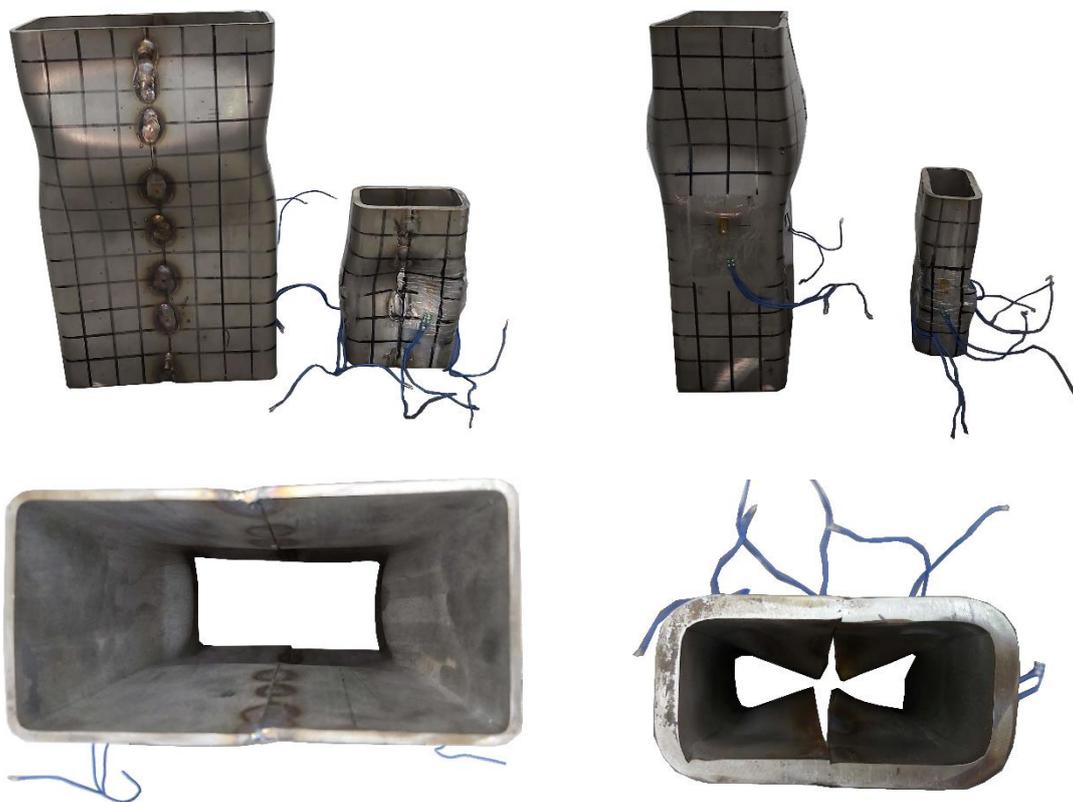
**Figura 25 – Perfis preparados para o ensaio.**

Os ensaios de compressão foram executados na prensa hidráulica alemã Losenhausenwerk. Para garantir compressão uniformemente distribuída, utilizaram-se duas chapas apoiadas, uma na extremidade superior e outra na extremidade inferior da coluna. Também foram adicionados dois LVDTs localizados em duas quinas opostas na base da prensa hidráulica para verificar os deslocamentos da mesma durante o ensaio. A configuração do ensaio pode ser vista na Figura 26.

A Figura 27 mostra as deformadas finais dos perfis após a execução dos ensaios a compressão. Pode ser verificada a ocorrência do fenômeno da flambagem local, o que era esperado para esses perfis uma vez que perfis curtos têm características de plastificação seguida de flambagem local ao se manter a aplicação de força.



**Figura 26 – Perfil preparado para o ensaio.**



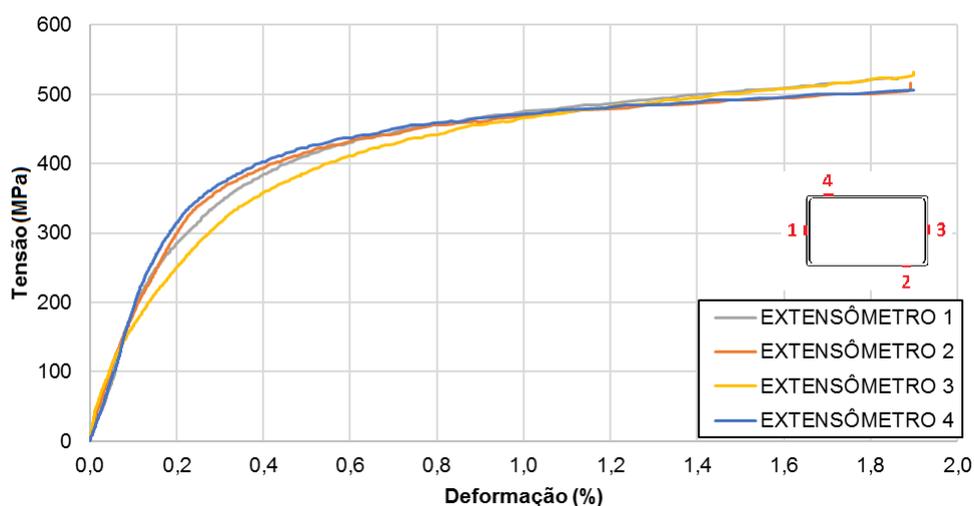
**Figura 27 – Deformadas dos perfis após os ensaios.**

As curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de caracterização à compressão podem ser verificadas na Figura 28 e na Figura 29. Pode ser notado que os ensaios chegaram a deformações máximas próximas de 2% e que houve um comportamento diferenciado na leitura de um dos extensômetros do perfil de 80 mm. Isso ocorreu devido ao surgimento de

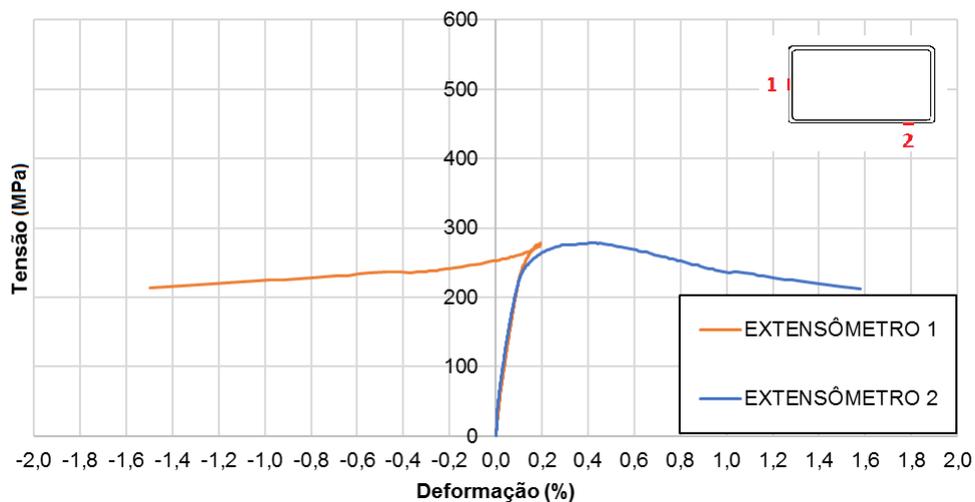
uma deformação local na região da alma onde o extensômetro estava posicionado, resultando em uma alteração de medidas de compressão para tração.

As tensões exibidas anteriormente foram calculadas admitindo-se uma distribuição uniforme de tensões normais em toda a área da seção transversal do perfil, ou seja, pela razão da força aplicada pela prensa e a área da seção transversal do perfil. As propriedades mecânicas dos ensaios de caracterização podem então ser obtidas a partir de fórmulas e dos gráficos resultando nos dados apresentados na Tabela 14 e na Tabela 15, onde se têm o módulo de elasticidade ( $E$ ) e a tensão de escoamento aproximada ( $f_{0,2}$ ), calculada por meio de uma aproximação com uma reta de inclinação equivalente ao módulo de elasticidade em 0,2% de deformação.

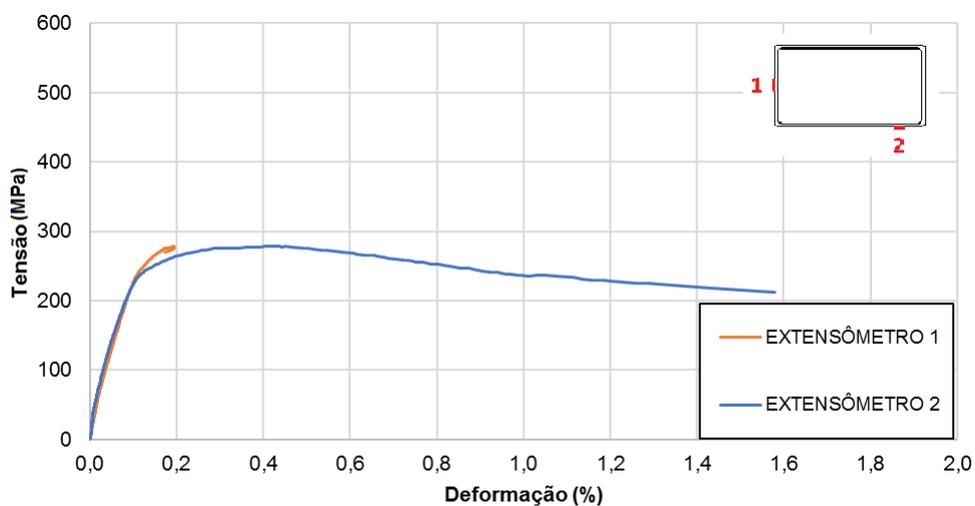
Vale destacar que o resultado da tensão de escoamento do extensômetro 1 do perfil C80x80x3x3 não foi obtido uma vez que a reta paralela que começa no 0,2% de deformação não consegue obter um ponto de interseção com a curva tensão *versus* deformação devido ao problema de flambagem local que ocorreu nesta medição. Apesar disso, o módulo de elasticidade é obtido normalmente uma vez que depende apenas da inclinação desta curva.



**Figura 28 – Curva tensão versus deformação do ensaio à compressão do perfil C40x40x5x5.**



(a) Ensaio 1



(b) Ensaio 2

**Figura 29 – Curva tensão versus deformação do ensaio à compressão do perfil C80x80x3x3.**

**Tabela 14 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de caracterização à compressão do perfil C40x40x5x5.**

| Perfil | Extensômetro | E (GPa) | $f_{0,2}$ (MPa) |
|--------|--------------|---------|-----------------|
| 40X40  | 1            | 196,074 | 384,517         |
|        | 2            | 171,111 | 404,044         |
|        | 3            | 129,023 | 388,591         |
|        | 4            | 200,557 | 401,999         |
| Média  |              | 174,191 | 394,788         |

**Tabela 15 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de caracterização à compressão do perfil C80x80x3x3.**

| Perfil | Extensômetro | E (GPa) | f <sub>0,2</sub> (MPa) |
|--------|--------------|---------|------------------------|
| 80X80  | 1            | 226,415 | -                      |
|        | 2            | 225,283 | 275,867                |
| Média  |              | 225,849 | 275,867                |

## 4 ANÁLISE NUMÉRICA

Este capítulo tem o objetivo de apresentar as etapas realizadas no desenvolvimento dos modelos numéricos usados para se avaliar o comportamento das vigas em perfis C de aço inoxidável estudadas neste trabalho. Para tanto, inicialmente será feita uma comparação entre um modelo base e o modelo numérico proposto, sendo discutidas suas características e estágios de execução.

O modelo número foi desenvolvido por meio do programa computacional de elementos finitos ANSYS 12.0 [9]. Para tanto, foi escrito um código APDL (*ANSYS Parametric Design Language*) de forma mais otimizada possível, permitindo a alteração de características do perfil, tais como comprimento, espessura e tensão de escoamento, por exemplo, aproveitando um mesmo código para diversos modelos. Com o modelo numérico calibrado, será possível utilizar o mesmo código, com as devidas alterações, para a análise paramétrica posterior.

### 4.1 Modelo experimental base

Os ensaios base, utilizados para calibração do modelo numérico, correspondem aos realizados por Theofanous et al. [10], sendo três perfis C fletidos na menor inércia e posicionados na posição “u”, com a alma tracionada, e três posicionados na posição “n”, ou seja, com a alma comprimida, todos em situação de três pontos de aplicação de força. Isso corresponde a uma situação de viga biapoiada com o carregamento sendo aplicado no centro do vão. Vale destacar que apesar da utilização da nomenclatura C40X40X5X5-n e C40X40X5X5-u esses perfis são ligeiramente diferentes dos considerados no capítulo anterior, aqui respeitando as medidas reais aferidas por Theofanous et al. [10]. Esses modelos só foram utilizados nessa etapa de calibração.

Um exemplo de ensaio realizado para a posição “n” é apresentado na Figura 30. A Tabela 16 apresenta as configurações dos ensaios utilizados,

sendo CT e CA, o comprimento total e do vão da viga, respectivamente, e as dimensões da seção transversal, dadas pela largura da alma (h), largura da mesa (b), espessura da mesa ( $t_f$ ) e espessura da alma ( $t_w$ ).



**Figura 30 – Ensaio Experimental [10].**

**Tabela 16 – Geometria dos ensaios (Adaptado de [10]).**

| Ensaio        | Orientação         | CT<br>(mm) | CA<br>(mm) | b<br>(mm) | h<br>(mm) | $t_f$<br>(mm) | $t_w$<br>(mm) |
|---------------|--------------------|------------|------------|-----------|-----------|---------------|---------------|
| C40X40X5X5-n  | Alma em compressão | 848        | 750        | 39,89     | 40,01     | 4,81          | 4,67          |
| C40X40X5X5-u  | Alma em tração     | 850        | 750        | 39,95     | 39,94     | 4,78          | 4,64          |
| C100X50X4X4-n | Alma em compressão | 836        | 750        | 50,02     | 100,29    | 3,95          | 4,01          |
| C100X50X4X4-u | Alma em tração     | 835        | 750        | 49,96     | 100,97    | 3,94          | 3,85          |
| C100X50X6X9-n | Alma em compressão | 849        | 750        | 49,47     | 100,38    | 8,73          | 5,98          |
| C100X50X6X9-u | Alma em tração     | 849        | 750        | 49,51     | 100,35    | 8,84          | 5,96          |

Todos os perfis são fabricados utilizando-se placas de aço inoxidável formadas a quente e soldadas a laser de forma a gerar a seção transversal do Perfil C. Por se tratar de uma solda muito precisa, foram considerados cantos retos para os perfis. Ressalta-se que os valores para C100x50x6x9 foram

calculados como a média do valor da alma e da mesa, dos dados disponíveis em Theofanaus et al. [10].

Os dados dos perfis de interesse para esse estudo, como tensão de escoamento, tensão última e outros, podem ser vistos na Tabela 17.

**Tabela 17 – Resultados experimentais do material (Adaptado de [10]).**

| Ensaio      | E (N/mm <sup>2</sup> ) | f <sub>0,2</sub><br>(N/mm <sup>2</sup> ) | f <sub>u</sub><br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ε <sub>u</sub> (%) | ε <sub>f</sub> (%) |
|-------------|------------------------|--|--|--------------------|--------------------|
| C40x40x5x5  | 190200                 | 292                                      | 659                                    | 57                 | 69                 |
| C100X50X4X4 | 190100                 | 289                                      | 687                                    | 60                 | 69                 |
| C100X50X6X9 | 190250                 | 267                                      | 590                                    | 50                 | 66                 |

## 4.2 Modelo de elementos finitos

### 4.2.1 Material e elementos escolhidos

O modelo foi desenvolvido testando-se dois tipos de elementos: de casca e sólido. Para o elemento de casca foi escolhido para a análise o elemento SHELL181 [9]. A escolha desse elemento é devido a sua capacidade para representar situações de perfis de chapas finas, atendendo a situação dos perfis C estudados neste trabalho. O elemento é apresentado na Figura 31(a). O elemento SHELL181 [9] possui quatro nós com seis graus de liberdade cada um, sendo três graus referentes às translações nos eixos x, y e z, e três graus que permitem a rotação em torno dos eixos x, y e z.

A modelagem utilizando elementos sólidos foi feita com dois tipos de elementos diferentes, o SOLID 185 (Figura 31(b)) e SOLID 186 (Figura 31(c)). Ambos são ideais para representar comportamentos de plasticidade, hiper elasticidade, encruamento, grandes deformações e alta capacidade de carga. A diferença entre eles se dá na quantidade de nós, onde o primeiro possui apenas oito nós e o segundo vinte nós. Em ambos os elementos, todos os nós

possuem três graus de liberdade referente às translações nos eixos x, y e z. Em suma, a diferença entre os elementos sólidos é que o elemento SOLID 186 apresenta uma análise mais refinada, possuindo um número muito maior de nós que serão analisados. Logo, sua utilização demanda maior esforço computacional, mas pode gerar resultados mais precisos em casos onde é necessária uma análise mais detalhada dos modelos.

A geometria do modelo irá seguir o experimental realizado por Theofanaus et al. [10], onde é incluída no ANSYS 12.0 [9], a modelagem da geometria do ensaio. Em seguida, é feita a inclusão das propriedades do material. A forma de inclusão, para representar a melhor aproximação do resultado experimental, é por meio da caracterização multilinear da curva tensão *versus* deformação. Porém, como o artigo base só fornece alguns valores característicos, como tensão de escoamento, tensão última e módulo de elasticidade, e não a curva completa, algumas aproximações foram realizadas. Desta forma, realizaram-se algumas tentativas diferentes para verificar a curva multilinear que melhor se adequasse ao resultado experimental.

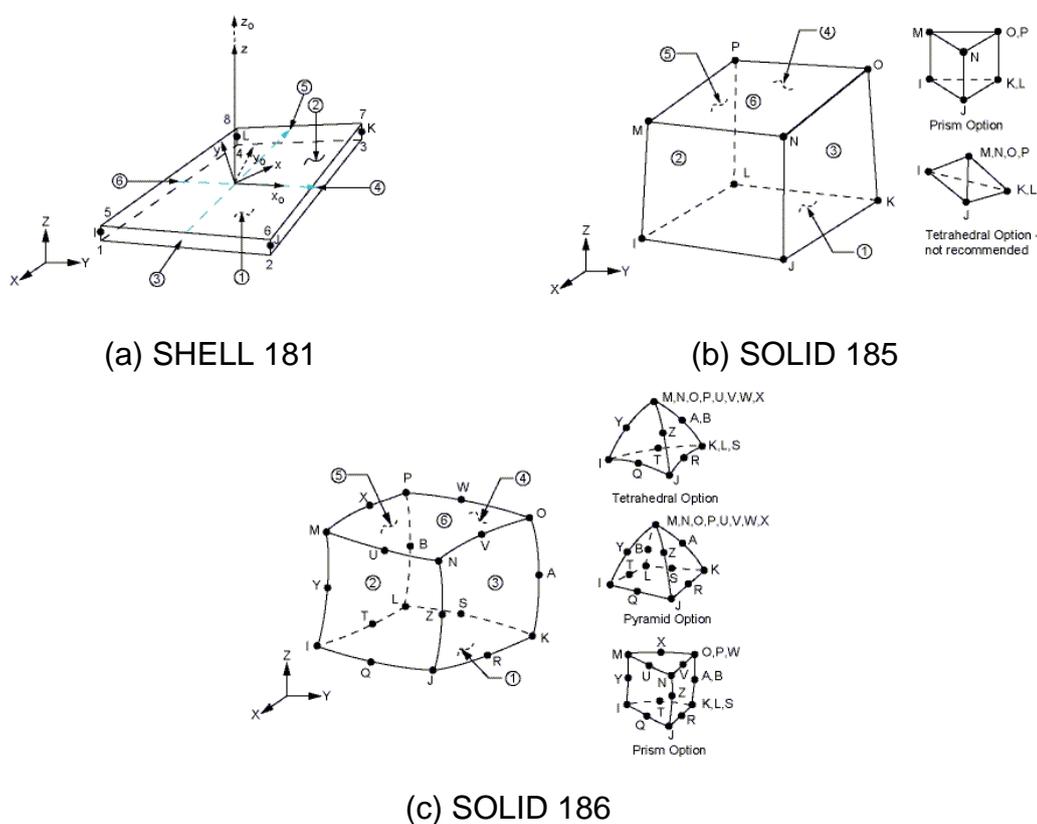


Figura 31 – Elementos empregados no modelo numérico [9].

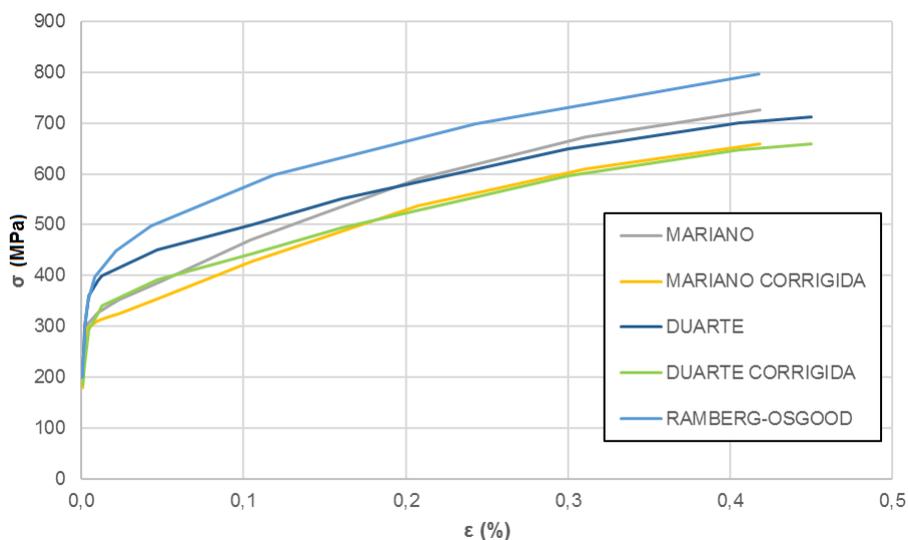
Assim, iniciou-se a análise da curva do material empregando os resultados do ensaio a tração para o aço inoxidável austenítico realizado por Duarte [38], por apresentar valor próximo de tensão de escoamento apresentado por Theofanaus et al. [10]. Outras curvas utilizadas para aproximação foram as curvas dos ensaios de tração e compressão para o aço inoxidável austenítico, desenvolvidos no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) para este trabalho. Também foram empregadas, como tentativa de aproximação da curva do material, a formulação proposta por Ramberg-Osgood [22] que é comumente aceita no meio acadêmico para descrever o comportamento de diversos materiais, inclusive os que apresentam comportamento não linear, como o aço inoxidável austenítico.

Além das curvas citadas, foram feitas tentativas de curvas alternativas, correspondentes a versões corrigidas das curvas já propostas, para se aproximarem mais dos valores característicos de Theofanaus et al. [10]. Também foram feitas as transformações de todas as curvas de valores nominais para verdadeiros, ou seja, considerando a diminuição da seção transversal que ocorre com o aumento da deformação e, conseqüentemente do encruamento. Estas análises foram realizadas de forma a se obter uma boa gama de possibilidades para verificação de qual seria a melhor curva para representar os ensaios base.

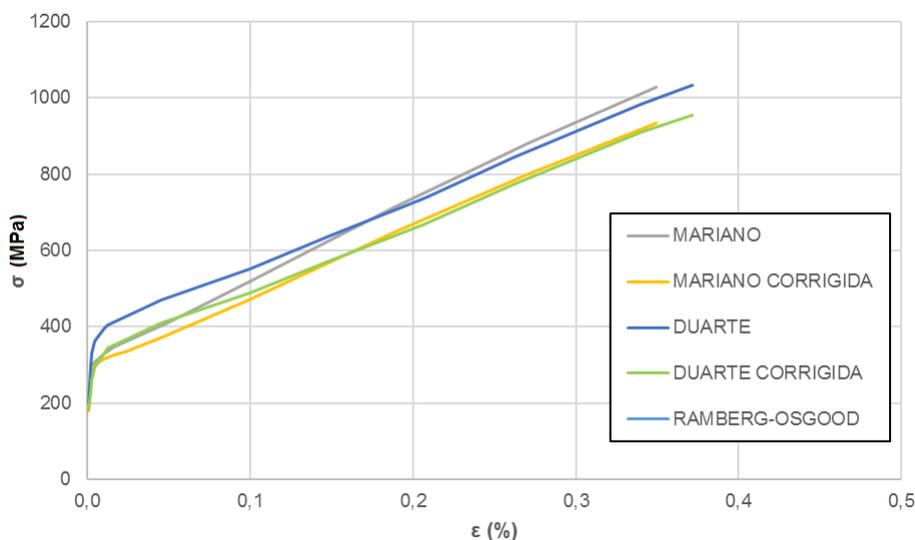
Os valores característicos estão representados na Tabela 17. Os resultados das curvas elaboradas podem ser vistas na Figura 32(a) e na Figura 32(b), onde a primeira mostra os resultados nominais das curvas propostas e a segunda os valores transformados em tensões e deformações verdadeiras.

A nomenclatura das curvas é feita de acordo com as tentativas propostas anteriormente, sendo “MARIANO” e “MARIANO CORRIGIDA” as curvas feitas a partir dos resultados de caracterização deste trabalho, sendo respectivamente, uma sem nenhum tipo de correção e outra, feita uma alteração da curva para aproximação dos valores de tensão última e tensão de escoamento quando comparados com as características do material de Theofanaus et al. [10]. Da mesma forma, as curvas “DUARTE” e “DUARTE CORRIGIDA” seguem este procedimento. A curva “RAMBERG-OSGOOD” segue a formulação proposta por Afshan et al. [36].

Para o desenvolvimento da curva Ramberg-Osgood foi utilizada a formulação descrita por Afshan et al. [36], que é a extensão do modelo originalmente criado para representar a resposta dos comportamentos de perfis em alumínio, para respostas de modelos numéricos de aço austenítico. Esse modelo consiste em duas etapas que podem ser vistas na Equação (16) e na Equação (17).



(a) Curvas nominais



(b) Curvas verdadeiras

Figura 32 – Curva tensão *versus* deformação do material – tentativas MEF.

$$\varepsilon = \frac{f}{E} + 0,002 \left( \frac{f}{f_y} \right)^n \quad \text{Para } f \leq f_y \quad (16)$$

$$\varepsilon = \frac{f-f_y}{E_{0,2}} + \left( \varepsilon_u - \varepsilon_{t0,2} - \frac{f_u-f_y}{E_{0,2}} \right) \left( \frac{f-f_y}{f_u-f_y} \right)^m \quad \text{Para } f_y < f \leq f_u \quad (17)$$

Onde,

$\varepsilon$  é a deformação do perfil;

$f$  é a tensão do perfil;

$E$  é o módulo de Young ou módulo de elasticidade;

$f_y$  é a tensão de escoamento;

$f_u$  é a tensão última;

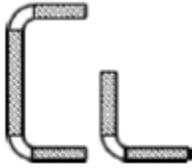
$\varepsilon_u$  é a deformação última;

$\varepsilon_{t0,2}$  é a deformação de escoamento;

$E_{0,2}$  é o módulo de elasticidade tangente no ponto de 0,2%;

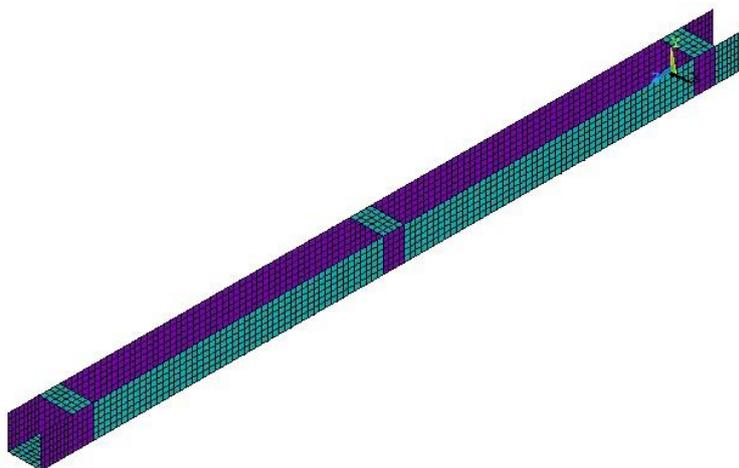
$m$  e  $n$  são parâmetros do modelo proposto que podem ser vistos na Tabela 18.

**Tabela 18 – Parâmetros representativos para modelos segundo Ramberg-Osgood (Adaptado de [36]).**

| Tipo de Material                             | Seção transversal   | $f_y$<br>(MPa) | $f_u$<br>(MPa) | $\varepsilon_u$<br>(%) | $n$  | $m$ |
|--|---|----------------|----------------|------------------------|------|-----|
| Regiões planas de perfis dobrados a frio     |  | 280            | 580            | 0,50                   | 9,1  | 2,3 |
|  |   | 530            | 770            | 0,30                   | 9,3  | 3,6 |
|  |   | 320            | 480            | 0,16                   | 17,2 | 2,8 |
| Regiões dos cantos de perfis dobrados a frio |  | 640            | 830            | 0,20                   | 6,4  | 7,1 |
|  |   | 800            | 980            | 0,03                   | 6,1  | 6,7 |
|  |   | 560            | 610            | 0,01                   | 5,7  | 6,8 |

#### 4.2.2 Estudo da malha

Outro passo importante para o desenvolvimento do modelo numérico corresponde a escolha da malha a ser empregada. Para tal, é realizado um estudo variando o tamanho dos elementos na malha, de forma a verificar a diferença entre os resultados obtidos. Nota-se que para tamanhos diferentes de elementos, têm-se quantidades totais diferentes de elementos no perfil, influenciando no esforço computacional da análise, e no comportamento global do modelo numérico. Esses dois fatores serão levados em conta para escolha do modelo a ser seguido de forma a otimizar o tempo gasto nas análises, sem perder qualidade no resultado. Um exemplo de malha é apresentado na Figura 33.



**Figura 33 – Exemplo de malha – Elemento de casca.**

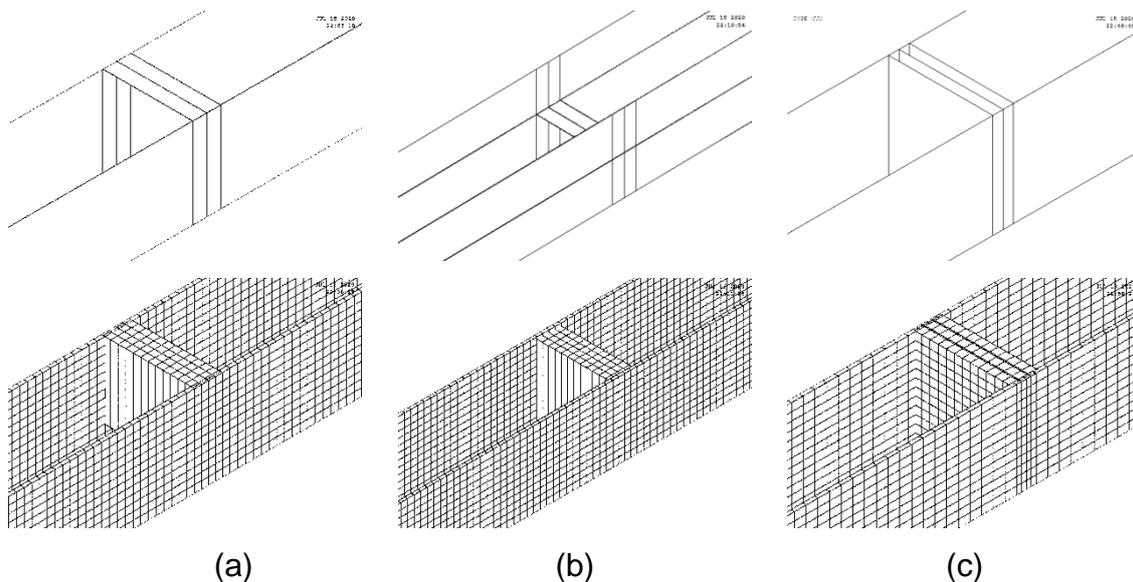
#### 4.2.3 Geometria e condições de contorno

Foram incluídas peças metálicas nos ensaios nas regiões de aplicação de carga e nos pontos de apoio, de forma a aumentar a resistência local e evitar que as falhas locais naquelas seções ocorressem devido à deformação significativa na peça. Assim, tais peças foram também representadas no

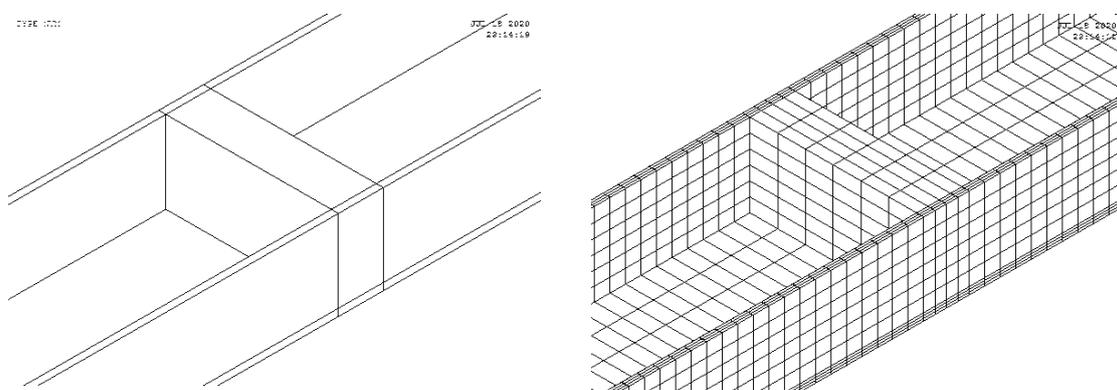
modelo numérico. Esses elementos podem ser observados no ensaio por meio da Figura 34. Para simular essa situação, foram feitas três tentativas no modelo numérico utilizando elemento de casca, e uma para o modelo com elemento sólido, apresentadas na Figura 35 e na Figura 36, respectivamente. Foi testada também, a variação do resultado segundo a alteração da quantidade de elementos de cada um dos modelos para otimização.



**Figura 34 – Peças intermediárias no perfil C [10].**



**Figura 35 – Peças intermediárias simuladas para os elementos de casca.**



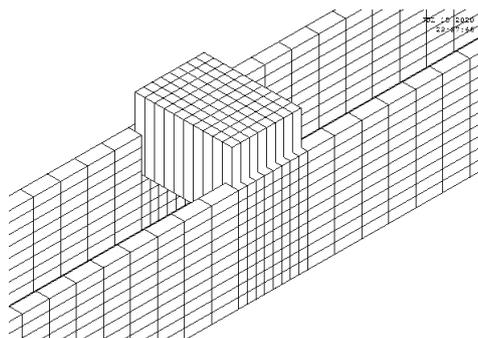
**Figura 36 – Peças intermediárias simuladas para os elementos sólidos.**

Salienta-se que a existência de três modelos para o elemento de casca é justificada pois todas as representações aproximam-se do modelo base de forma parecida ao ser adicionada a espessura do elemento posteriormente, enquanto o modelo de elemento sólido já é feito levando-se em conta a espessura de cada parte do perfil, sendo feito apenas um modelo para alcançar o idealizado segundo o modelo base.

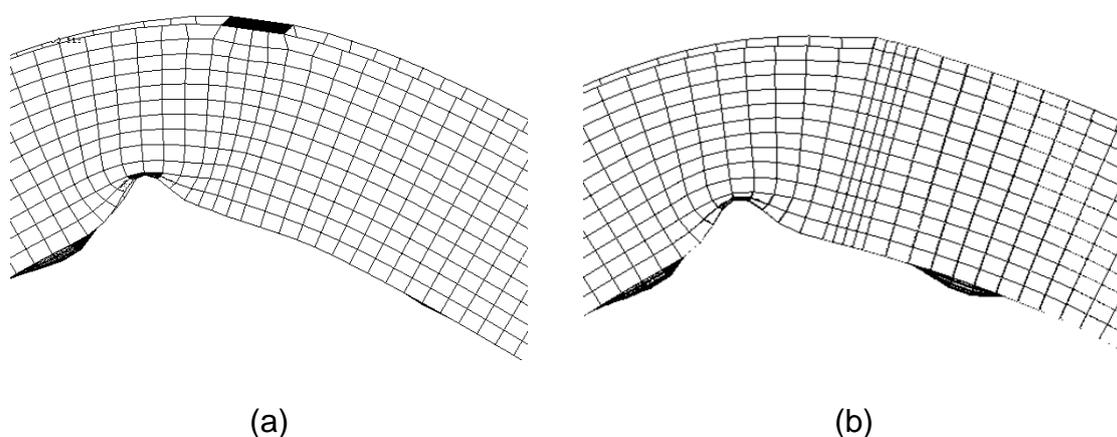
A tentativa inicial, apresentada na Figura 35(a), representando a chapa intermediária de forma horizontal no bordo livre das mesas, não conseguiu simular adequadamente o ganho de rigidez esperado nessas regiões com a inclusão desta peça, para o estudo do perfil submetido à flexão na posição “n”. A tentativa subsequente, Figura 35(b), teve o intuito de verificar se haveria alguma melhoria nos resultados ao se colocar a chapa no meio do comprimento das mesas, de forma a centralizar a região de conectividade dos nós e fornecer uma melhor distribuição da resistência. Vale ressaltar que as duas primeiras opções de modelagem apresentaram alguns erros em relação a posição da aplicação da espessura da chapa intermediária, uma vez que a representação padrão do ANSYS 12.0 [9] é na metade da espessura do elemento, como pode ser visto na Figura 37. Porém, nas versões finais da modelagem, foi corrigida a representação da espessura dos elementos, como pode ser observado na Figura 35.

Após os dois primeiros testes, foi desenvolvido o modelo da Figura 35(c), considerando a inclusão da placa de forma vertical, garantindo a conectividade dos nós ao longo do comprimento de toda a mesa. A escolha da utilização de três placas verticais com  $1/3$  da espessura e não apenas uma placa com a espessura total foi realizado para garantir uma conectividade melhor, atingindo três linhas de elementos e não apenas uma.

A diferença da eficiência dos modelos propostos em relação à rigidez das regiões de interesse pode ser vista na Figura 38, onde é destacada a região no centro do vão da viga, onde ocorre a aplicação da força. Como pode ser visto as retas verticais na região central do vão permaneceram inalteradas na Figura 38(b), enquanto são bastante afetadas na Figura 38(a). Vale ressaltar que não houve diferença significativa do comportamento entre a Figura 35(a) e a Figura 35(b), e por isso foi representado apenas um modelo nesta etapa.



**Figura 37 – Erro na representação da espessura do elemento de casca no modelo.**

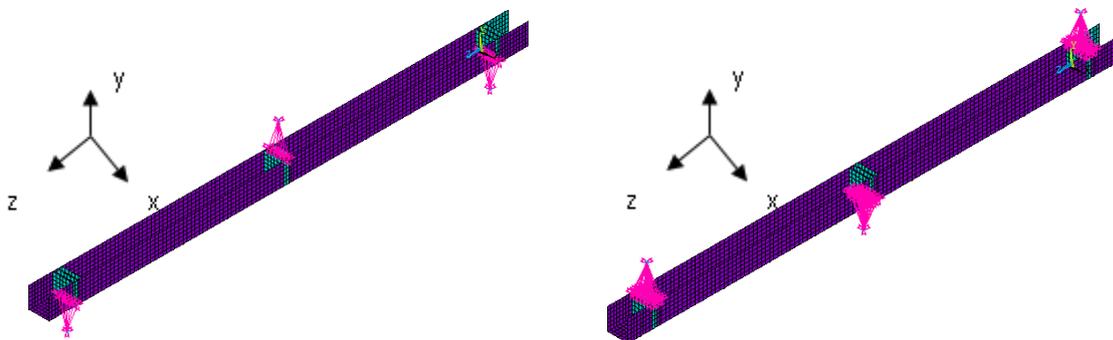


**Figura 38 – Avaliação do modo de falha da seção no meio do vão – elementos de casca.**

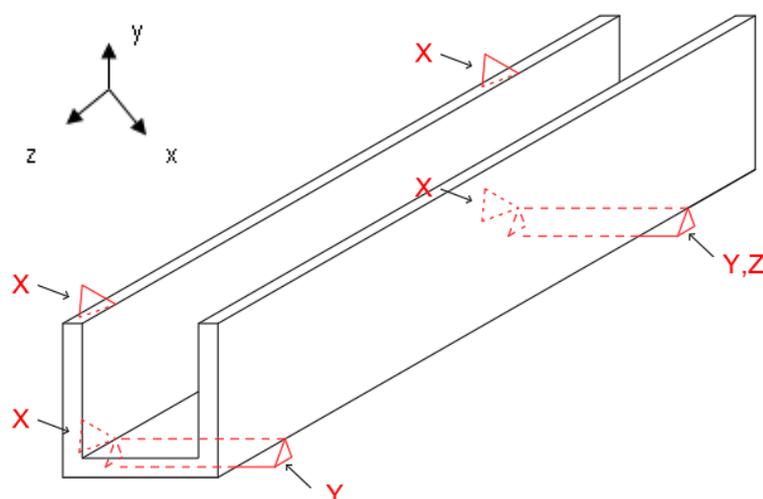
Para inclusão das condições de contorno e a carga aplicada foram implementados elementos de massa no modelo. Tais elementos servem para distribuir os efeitos nos pontos conectados, de forma a auxiliar e facilitar a aplicação dos esforços e a obtenção dos resultados. Foram utilizados três elementos de massa no modelo: dois para representar os apoios e um para a aplicação da carga. A Figura 39 apresenta o posicionamento dos elementos para ambas as posições de carregamento.

As condições de contorno da viga estudada simulam uma viga biapoiada. Desta forma, foram incluídas para os dois apoios restrições de deslocamento em  $y$ , além de uma restrição na direção  $z$  em um dos apoios para evitar o deslocamento longitudinal da viga no espaço. Também foram incluídas restrições de movimento no eixo  $x$  ao longo da mesa na seção

transversal dos apoios para evitar a rotação destas, conforme apresenta na Figura 40.



**Figura 39 – Elementos de massa.**

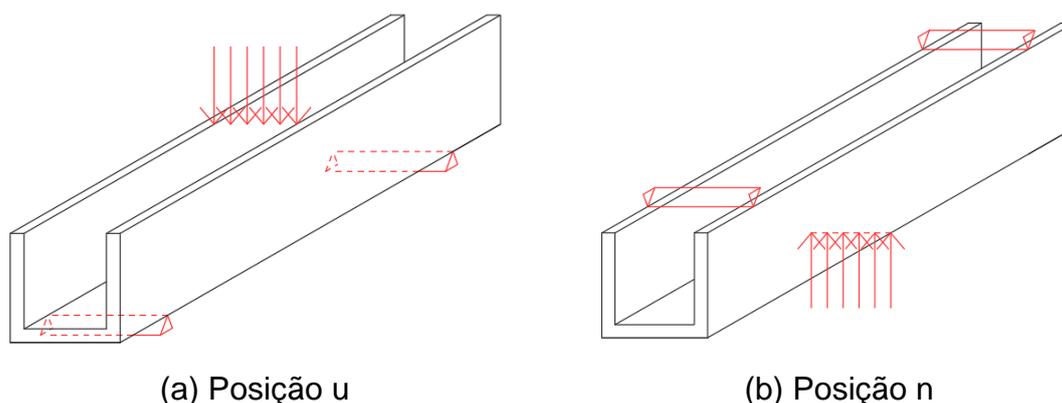


**Figura 40 – Restrições no perfil.**

Para execução eficaz do modelo, de forma a poder obter toda a curva carga *versus* deslocamento, optou-se pela aplicação de deslocamento na região central, e não de carga, para que seja possível se observar também a redução da força em função do aumento do deslocamento de forma gradual. Para a escolha do deslocamento máximo a ser aplicado na viga, foram realizadas diversas tentativas, de forma a obter resultados que não gerassem dados excessivos após a falha, pois muitas vezes, a análise numérica continua sendo executada até valores muito superiores ao deslocamento real da peça, o que aumenta o tempo das análises e diminui a eficiência do estudo.

Ressalta-se que os perfis no espaço parecem simular apenas a posição “u”. Isso se dá devido à estratégia utilizada, onde para o desenvolvimento do

modelo na posição “n” foram modificadas apenas o posicionamento dos elementos de massa do modelo na posição “u”, de forma que as condições de contorno alteradas simulam perfeitamente essa nova condição, sem a necessidade do desenvolvimento de outro modelo totalmente diferente, como pode ser visto no esquema da Figura 41.



**Figura 41 – Esquema da aplicação de carga para as posições do perfil.**

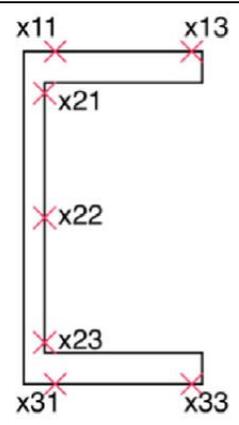
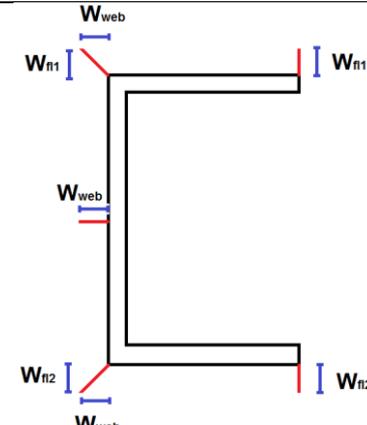
#### 4.2.4 Imperfeição geométrica inicial

A implementação da imperfeição inicial no modelo tem como objetivo aproximar o modelo numérico das situações reais encontradas no laboratório ou no dia a dia em estruturas metálicas, onde os perfis não são perfeitos, contendo imperfeições que afetam seu desempenho estrutural. Para o modelo estudado foram realizados dois processos para a consideração das imperfeições iniciais: o primeiro consiste em colocar as imperfeições iniciais que foram fornecidas por Theofanous et al. [10]; o segundo consiste na inclusão de imperfeições iniciais por meio da análise de flambagem no próprio ANSYS 12.0 [9], considerando a análise de autovetores e autovalores, que fornece níveis de imperfeições para todos os elementos do modelo, que são multiplicadas por um fator, que neste trabalho será em função do vão para atender de forma padronizada os diversos modelos que serão executados que possuem diferentes valores de vãos.

Essas imperfeições foram adicionadas no modelo de casca apresentado na Figura 35(c), modelo esse escolhido para dar prosseguimento com as análises desse trabalho, pois foi o que melhor se adequou aos estudos, existindo mais pontos de conectividade entre o suporte auxiliar e o perfil C, além de que as três opções apresentaram respostas similares de comportamento nas análises preliminares. A Tabela 19 apresenta os valores de imperfeições utilizados na primeira análise, obtidos por Theofanous et al. [10], que foram inseridos de forma linear em todo o comprimento do vão do perfil, conforme esquema ilustrado na mesma tabela.

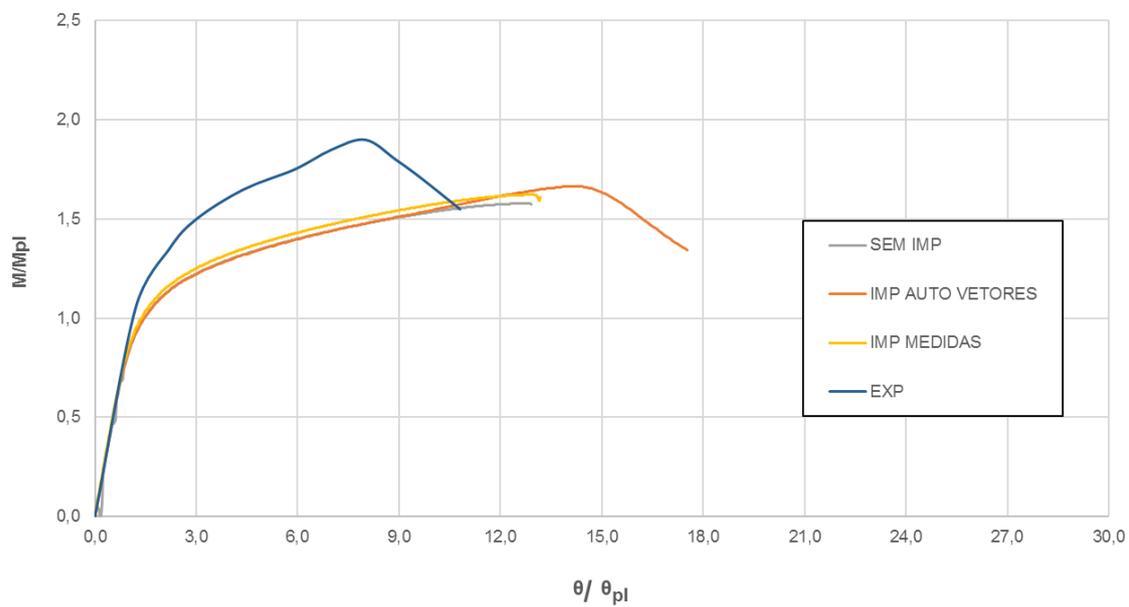
Vale ressaltar que esses testes foram primeiramente realizados no modelo com elemento de casca por se tratar de um modelo mais “simples” sendo possível alterá-lo mais facilmente para adição das imperfeições fornecidas pelos autores, que é feita de forma manual.

**Tabela 19 – Imperfeições iniciais da peça (Adaptado de [10]).**

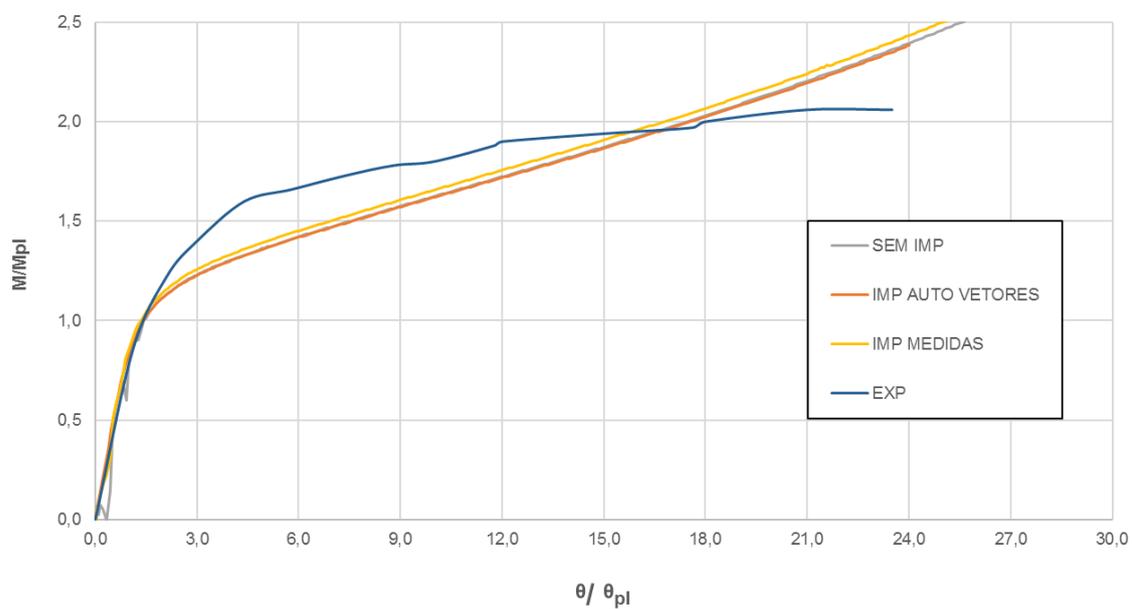
|  |                |  |                |            |
|---|----------------|--|----------------|------------|
| Ensaio  | $w_{fl1}$ (mm) | $w_{fl2}$ (mm)   | $w_{web}$ (mm) | $w_0$ (mm) |
| C40x40x5x5  | 0,48           | 0,29   | 0,30           | 0,48       |
| C100X50X4X4   | 0,51           | 0,72   | 0,36           | 0,72       |
| C100X50X6X9   | 0,38           | 0,21   | 0,13           | 0,38       |

Nos gráficos da Figura 42 a Figura 44 podem ser vistos os resultados para as duas diferentes análises, para as duas posições da viga, sendo “IMP AUTO VETORES” a denominação dos resultados utilizando o método de autovalores e autovetores do programa e “IMP MEDIDAS” a denominação para os modelos cuja imperfeição foi adicionada manualmente segundo os

resultados demonstrados na Tabela 19. Além disso, foi adicionado um modelo sem nenhuma imperfeição inicial como base de comparação.

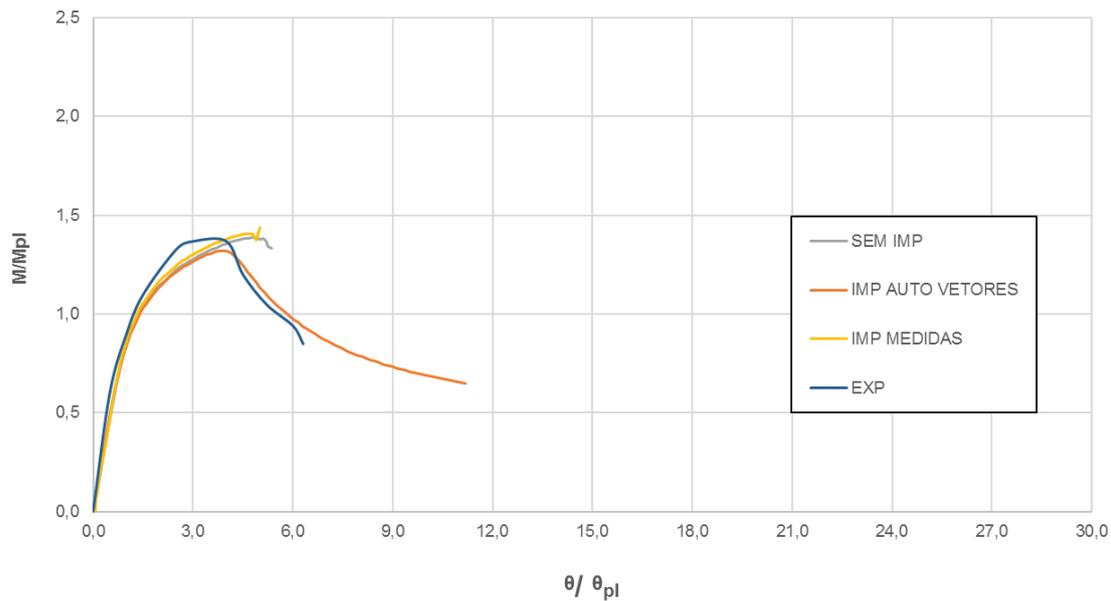


(a) Posição "u"

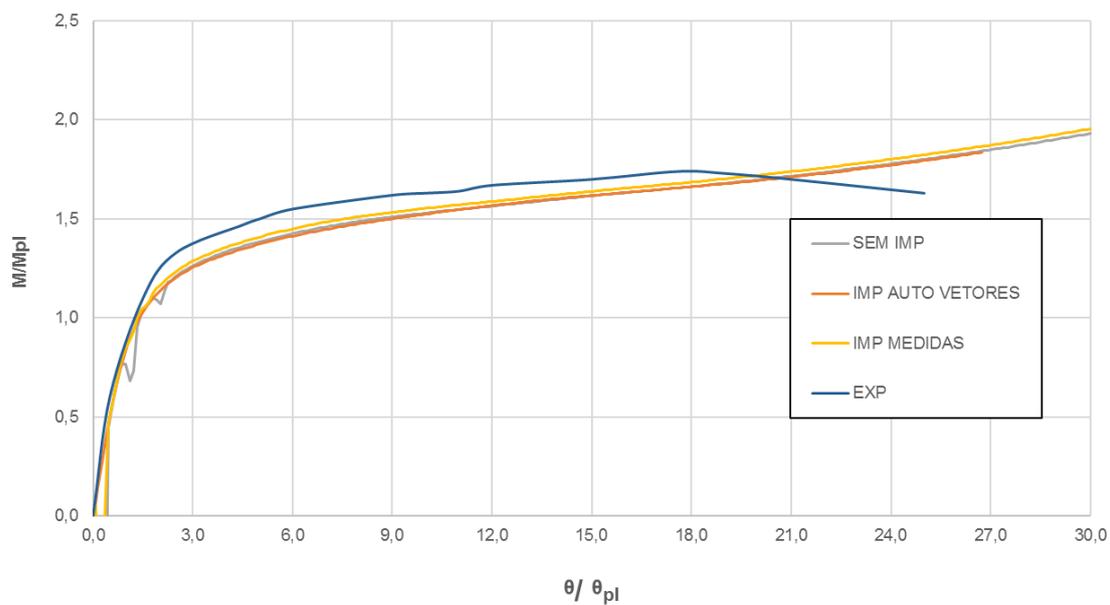


(b) Posição "n"

**Figura 42 – C40X40X5X5 - Curva  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  - Imperfeição.**

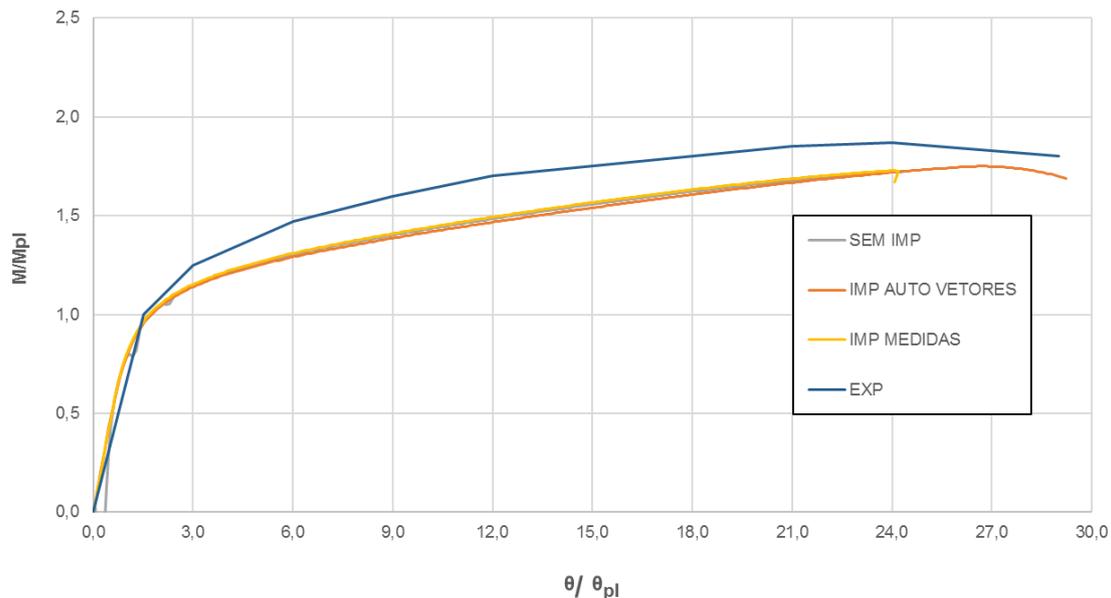


(a) Posição "u"

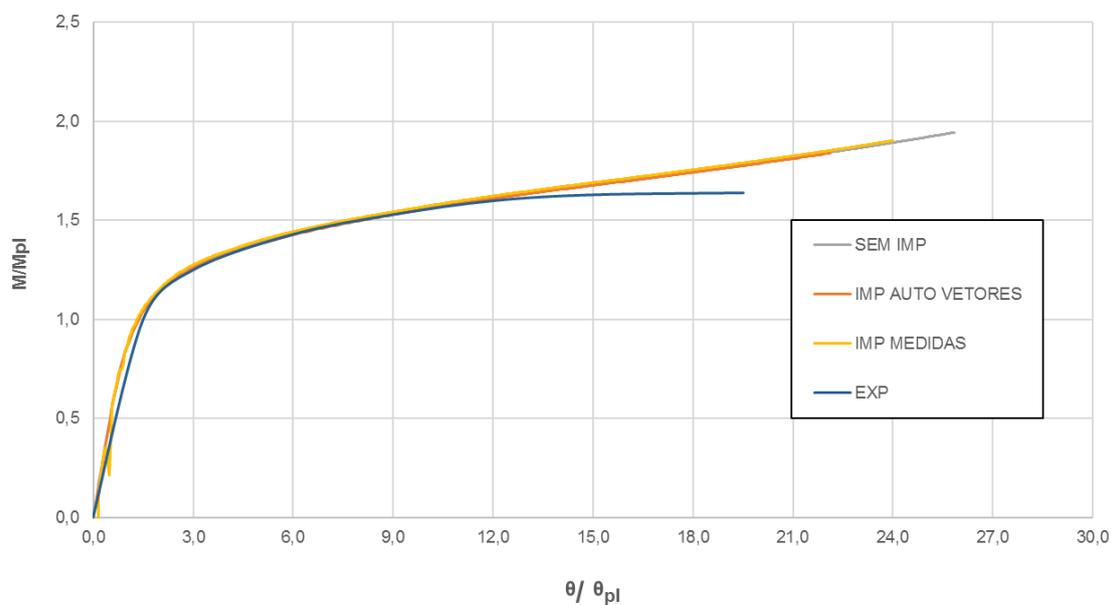


(b) Posição "n"

**Figura 43 – C100X50X4X4 - Curva  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  - Imperfeição.**



(a) Posição "u"



(b) Posição "n"

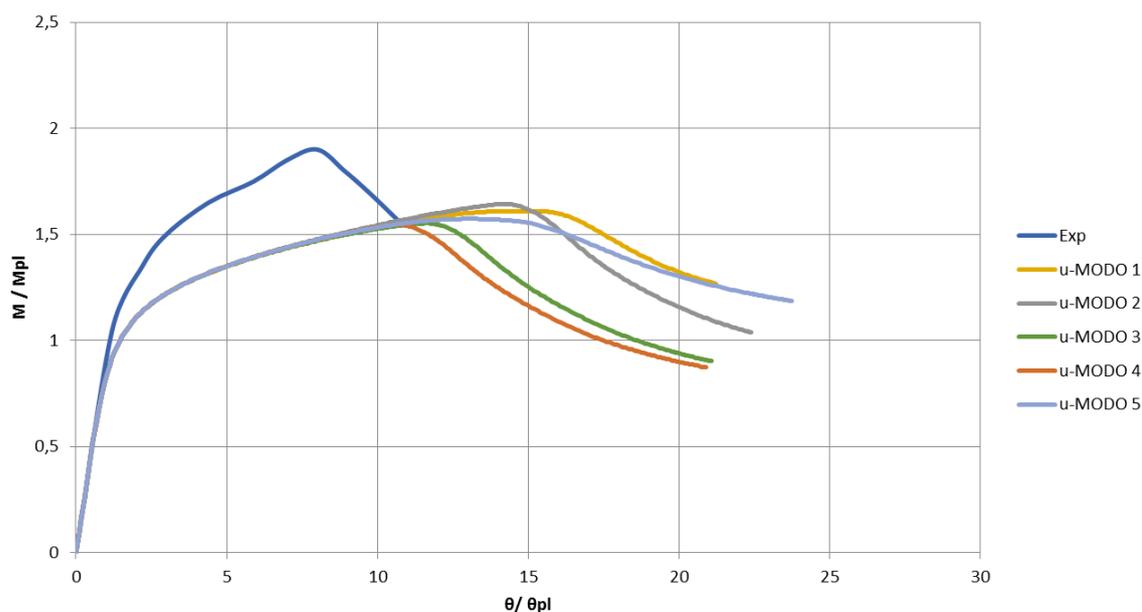
**Figura 44 – C100X50X6X9 - Curva  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  - Imperfeição.**

Com base nos resultados obtidos, optou-se pela utilização do modelo com a imperfeição inicial gerada pelo ANSYS 12.0 [9] para a análise paramétrica, uma vez que ambas as análises representaram comportamentos bem similares e com custo computacional próximo.

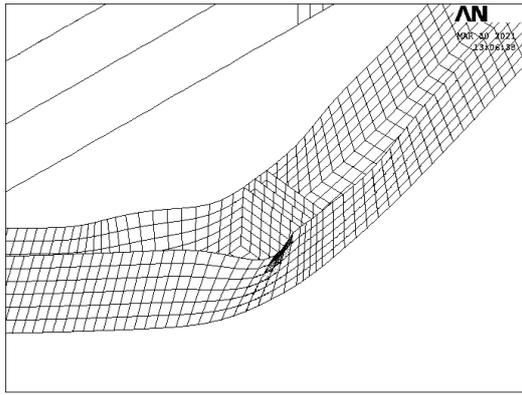
Vale ressaltar que essa forma de imperfeição de auto valores e auto vetores é influenciada por dois fatores, o modo de imperfeição e o fator de

amplificação. O sistema gera diversas opções de modo de imperfeições iniciais que são majorados pelo fator  $\alpha$  a ser definido. Dessa forma, esses dois pontos foram avaliados para definição do modelo que foi proposto nos gráficos anteriores.

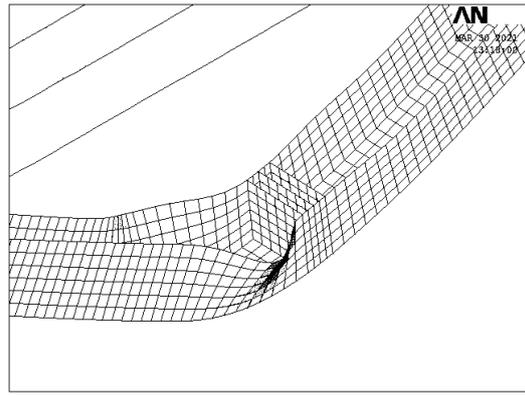
Os testes iniciais foram feitos para o perfil C40X40X5X5, onde foram executados 5 modos de imperfeição inicial que geraram modelos com resultados de imperfeições finais que podem ser vistos na Figura 46 e na Figura 47, para as posições "u" e "n", respectivamente. Os comportamentos de momento resistente e rotação desses modelos podem ser vistos na Figura 45 e na Figura 48, sendo definido o modo 2 como o modo a ser seguido para as análises, uma vez que foi o modelo que melhor representou a resistência ao momento em comparação ao modelo base na posição "u". Na posição "n" o modo de falha não representou alteração para os modelos.



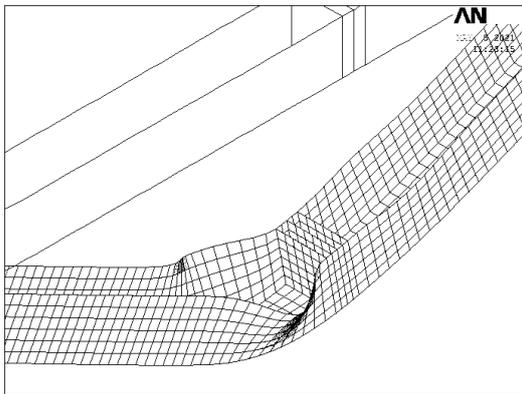
**Figura 45 – Curva  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  para modelos na posição "u" com diferentes modos de falha.**



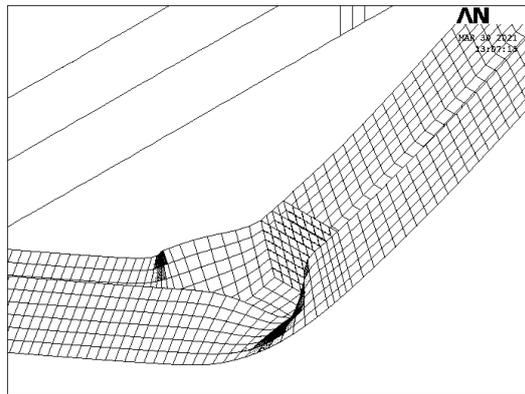
(a) Modo 1



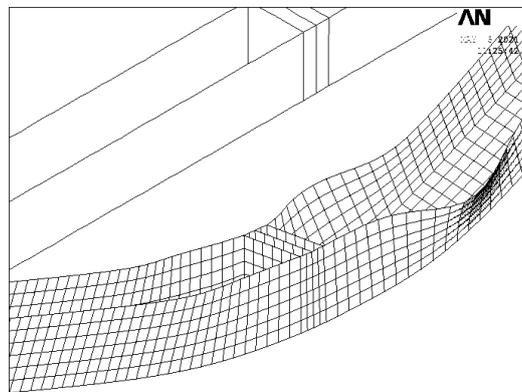
(b) Modo 2



(c) Modo 3

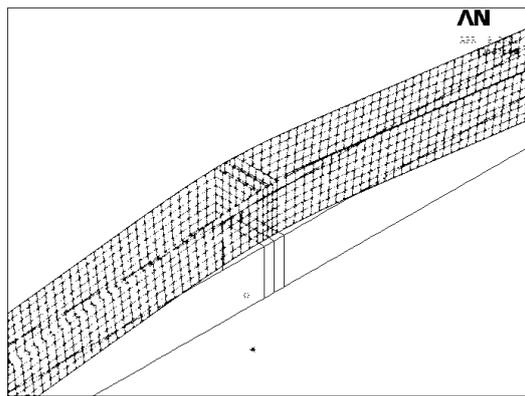


(d) Modo 4

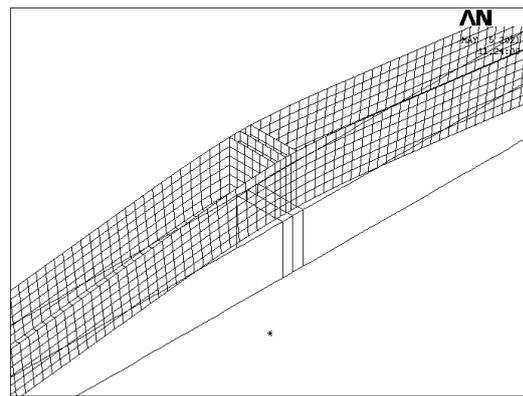


(e) Modo 5

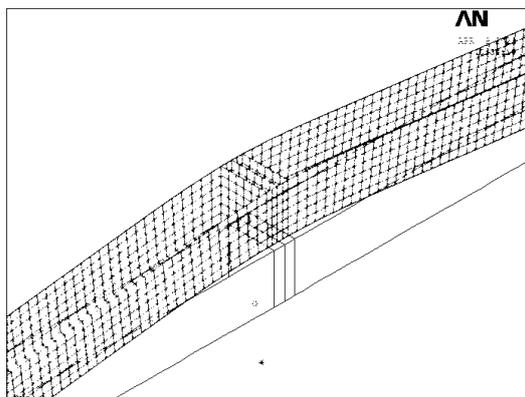
**Figura 46 – Deformadas finais para os modelos na posição "u" com diferentes modos de falha.**



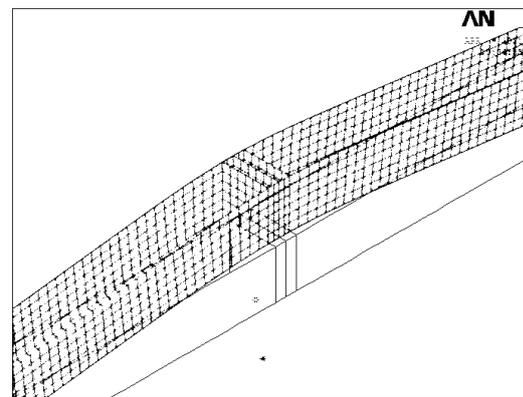
(a) Modo 1



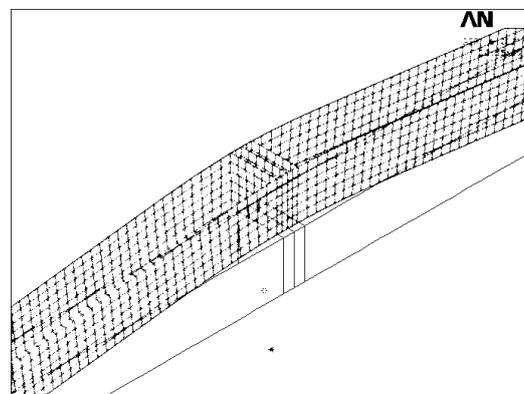
(b) Modo 2



(c) Modo 3

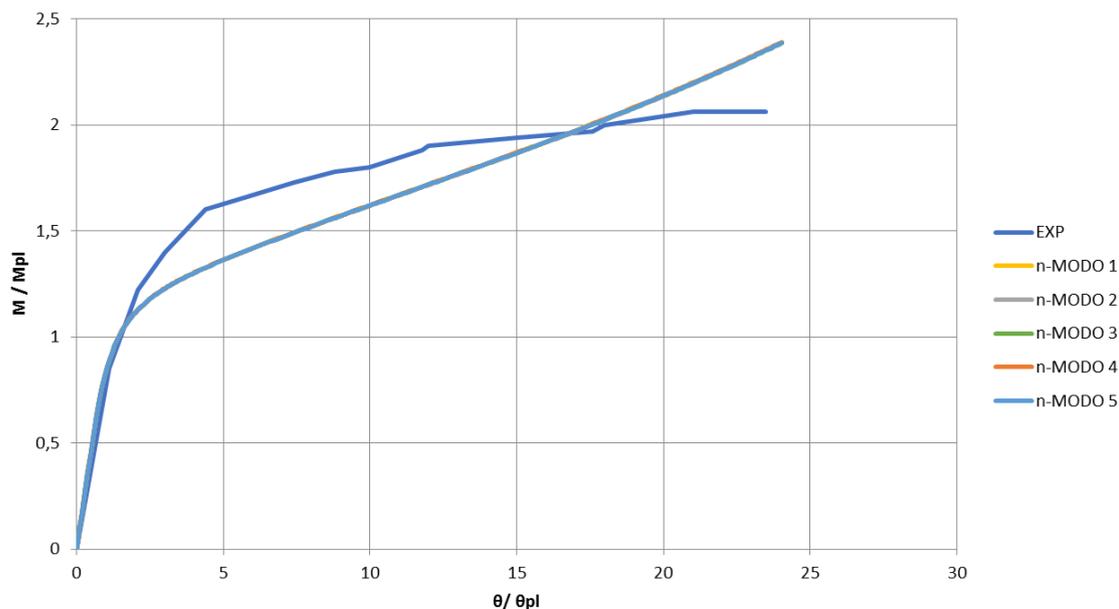


(d) Modo 4



(e) Modo 5

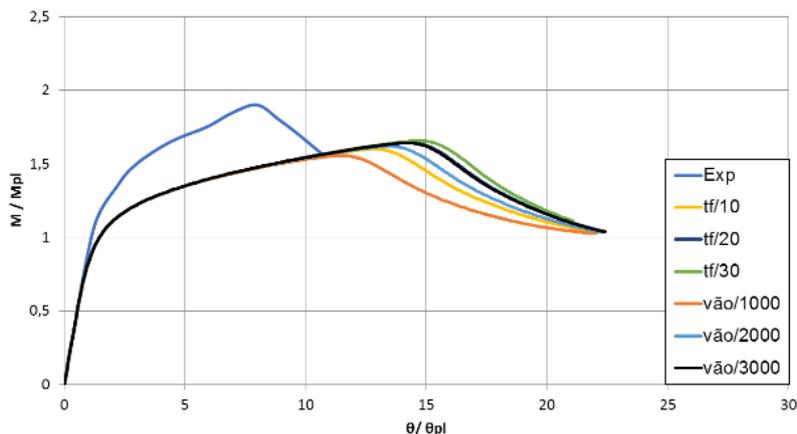
**Figura 47 – Deformadas finais para os modelos na posição "n" com diferentes modos de falha.**



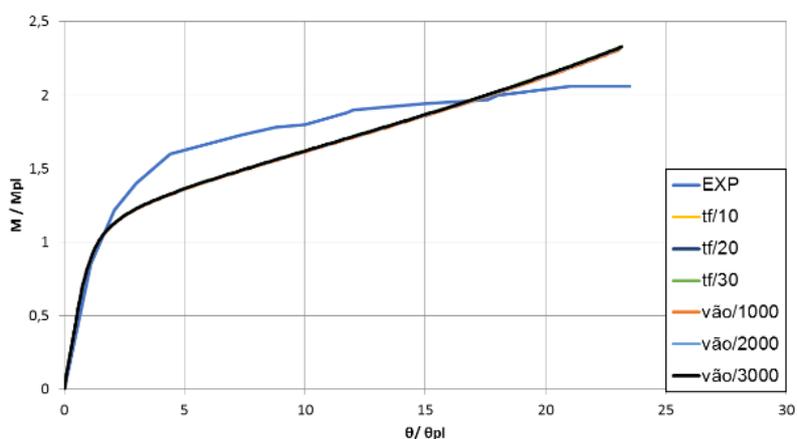
**Figura 48 – Curva  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  para modelos na posição "n" com diferentes modos de falha.**

Além disso, foram testados alguns fatores de amplificação para o modo de falha escolhido, majorando ou reduzindo o quanto de imperfeição inicial será adicionada em função dos autovetores. Para este trabalho, foram feitas algumas propostas preliminares em função do vão e da espessura da mesa ( $t_f$ ) pra o perfil C40X40X5X5, que podem ser vistos na Figura 49. Pode-se verificar que a mudança do fator de amplificação é significativa para a imperfeição inicial apenas na posição "u". Para prosseguimento desse trabalho, visando atender melhor aos modelos que serão propostos na análise paramétrica mantendo um padrão de fator de amplificação satisfatório para todas as análises, optou-se por adotar um valor igual ao vão, em mm, dividido por 3000, aplicado ao modo 2 da análise de flambagem realizada no ANSYS 12.0 [9].

Sendo assim, optou-se por utilizar os resultados do modelo com imperfeições do ANSYS, principalmente pela melhor capacidade de aplicação das imperfeições para diversos modelos diferentes, uma vez que a imperfeição fornecida pelo artigo limita-se apenas aos perfis ensaiados e que seria necessário fazer estimativas numéricas para poder implementar imperfeições dessa forma para os demais modelos.



(a) Posição "u"



(b) Posição "n"

**Figura 49 – Propostas com diferentes fatores de amplificação para a imperfeição do ANSYS para o C40X40X5X5.**

Além disso, a imperfeição fornecida por Theofanous et al. [10], para a calibração, não é precisa o suficiente para garantir grande similaridade entre o modelo numérico e o experimental, pois o artigo fornece apenas a imperfeição máxima encontrada em cada um dos elementos do perfil ao longo do seu comprimento. Dessa forma, no modelo é implementada uma imperfeição geral e igual para todo o vão e não localizada e pontual variando para diversas partes do elemento.

Da mesma forma, como o modelo de casca, o modelo com elementos sólidos seguirá utilizando as imperfeições geradas pelo *software*, não sendo feita também essa avaliação anterior. Essa escolha deu-se devido a complexidade da inserção das imperfeições do artigo e pelos resultados encontrados nas análises dos elementos de casca, onde a imperfeição inicial

não representou grandes alterações no comportamento do perfil em nenhuma das duas alternativas.

### 4.3 Validação do modelo numérico

A validação dos resultados numéricos dá-se pela avaliação das deformadas e do comportamento do momento e rotação dos modelos, que foram comparados aos dados apresentados por Theofanous et al. [10]. Para a efetivação da comparação, é realizada a normalização que consiste em dividir o momento e rotação obtidos no meio da viga pelo momento plástico ( $M_{pl}$ ) da seção transversal e a respectiva rotação desse momento ( $\theta_{pl}$ ). Para o cálculo da rotação do meio da viga, é realizada a soma dos valores de rotação em ambos os apoios (Figura 50), que é facilmente determinada pelo ANSYS 12.0 [9]. As curvas obtidas são apresentadas da Figura 51 a Figura 53.

Observa-se que ambos os modelos em elemento sólido e casca parecem representar bem o comportamento do perfil estudado; em alguns casos, o modelo de casca parece ter um desempenho um pouco melhor; em outros, o sólido. Para facilitar a análise dos resultados, foi calculada a relação entre momento máximo dividido pelo momento plástico e a rotação pela rotação plástica dos modelos numéricos e dos ensaios experimentais, na Tabela 20 e na Tabela 21, para elementos de casca e sólido, respectivamente. Para os modelos na posição “n” foi necessário fazer uma aproximação para comparação dos resultados, uma vez que algumas dessas análises numéricas não apresentaram um patamar de escoamento bem definido ou uma queda que representasse de forma direta o momento máximo da peça. Nesses casos, foram utilizados o último valor apresentado nos gráficos anteriores para determinação desses valores.

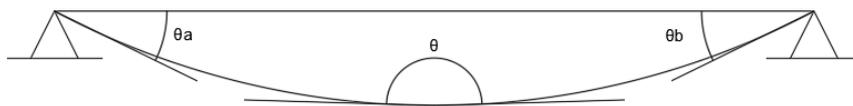
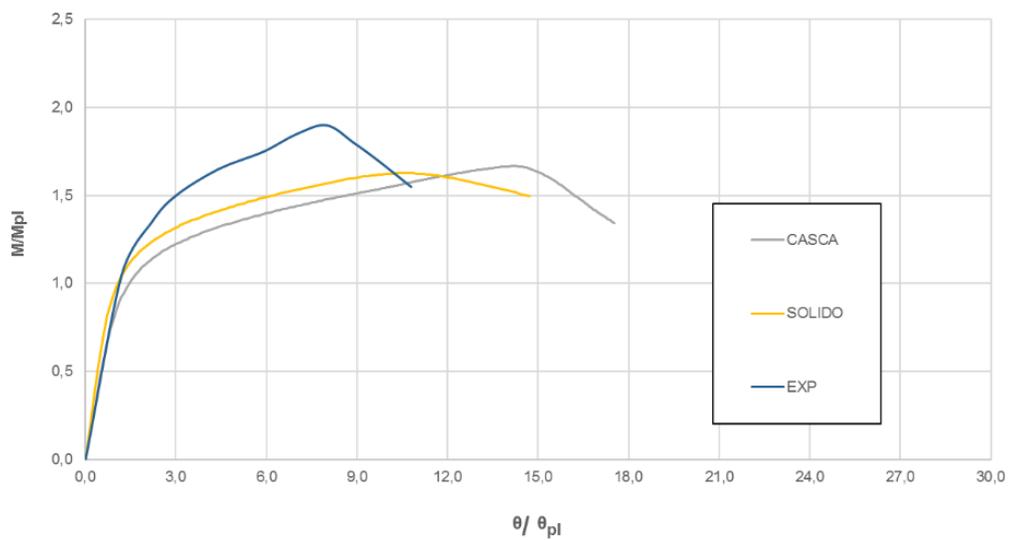
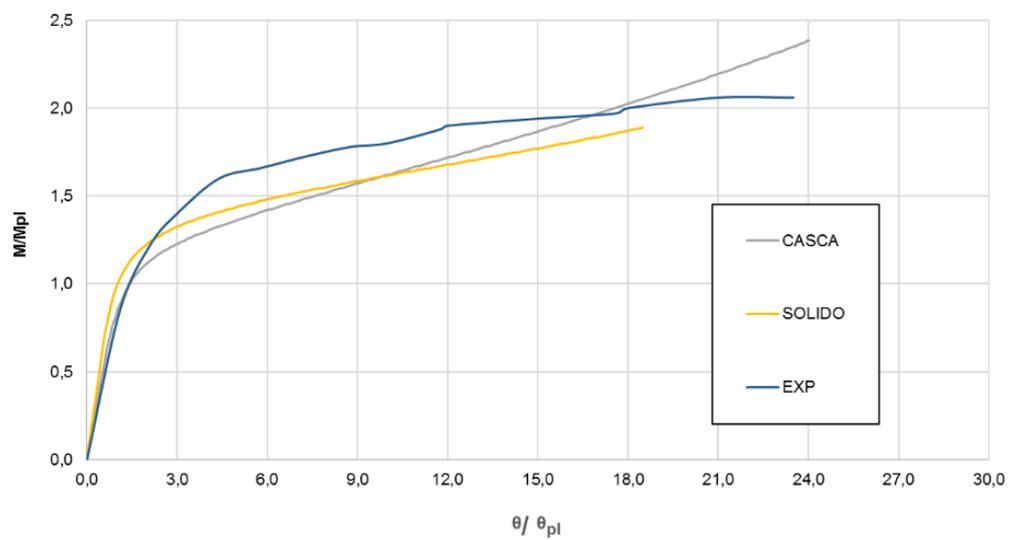


Figura 50 – Rotação no meio da viga.

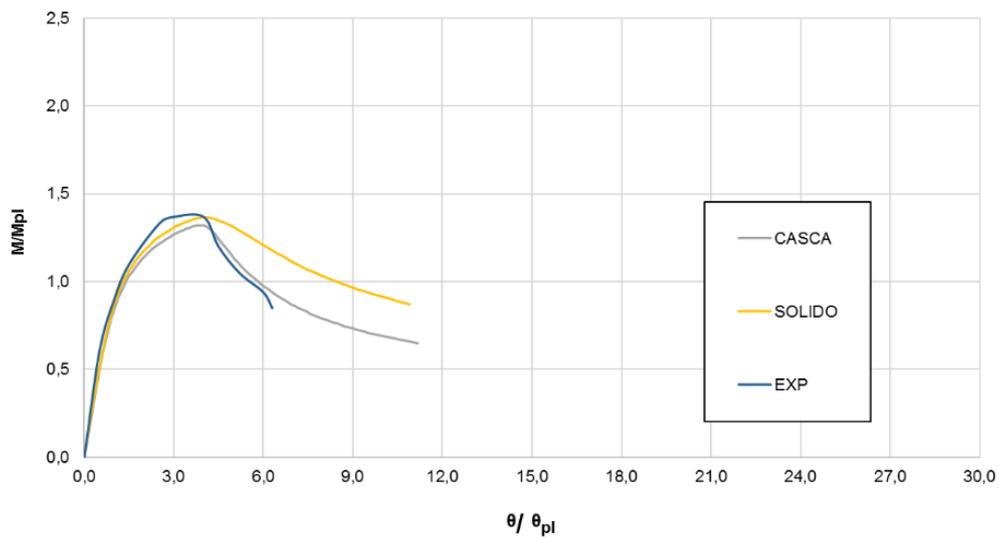


(a) Posição "u"

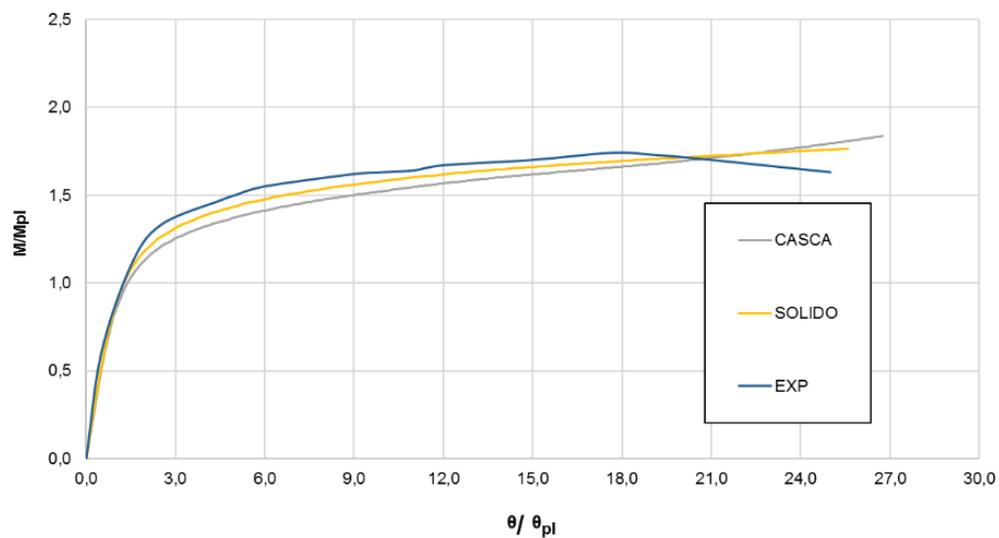


(b) Posição "n"

Figura 51 – C40X40X5X5 - Curva  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  - tipos de elementos.

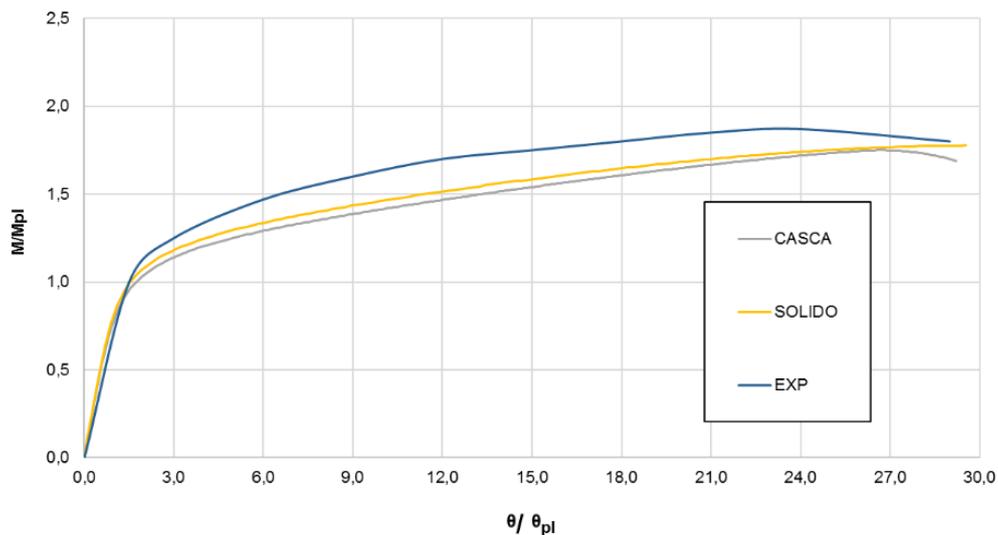


(a) Posição "u"

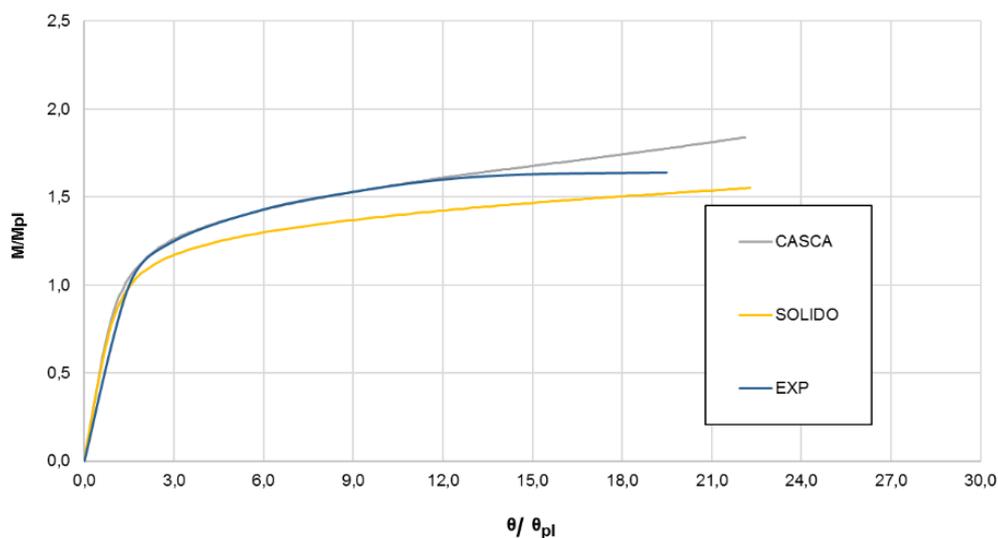


(b) Posição "n"

**Figura 52 – C100X50X4X4 - Curva  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  - tipos de elementos.**



(a) Posição "u"



(b) Posição "n"

**Figura 53 – C100X50X6X9 - Curva  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  – tipos de elementos.**

Uma hipótese para explicar esse comportamento dos perfis sem pico definido para a resistência última do perfil é o efeito catenária, conforme explicado no item 1.5.

**Tabela 20 – Relação entre o modelo numérico em casca e os ensaios.**

| Ensaio        | $M_{m\acute{a}x}/M_{pl}$ |      |         | $\theta_{m\acute{a}x}/\theta_{pl}$ |       |         |
|---------------|--------------------------|------|---------|------------------------------------|-------|---------|
|               | EXP                      | NUM  | EXP/NUM | EXP                                | NUM   | EXP/NUM |
| C40X40X5X5-n  | 2,06                     | 1,86 | 1,11    | 21                                 | 18,5  | 1,14    |
| C40X40X5X5-u  | 1,82                     | 1,61 | 1,13    | 7,75                               | 14,1  | 0,55    |
| C100X50X4X4-n | 1,71                     | 1,81 | 0,94    | 18                                 | 26,5  | 0,68    |
| C100X50X4X4-u | 1,41                     | 1,32 | 1,07    | 4,17                               | 4,45  | 0,94    |
| C100X50X6X9-n | 1,61                     | 1,82 | 0,88    | 12,5                               | 22,2  | 0,56    |
| C100X50X6X9-u | 1,86                     | 1,75 | 1,06    | 23,2                               | 26,85 | 0,86    |

**Tabela 21 – Relação entre o modelo numérico sólido e os ensaios.**

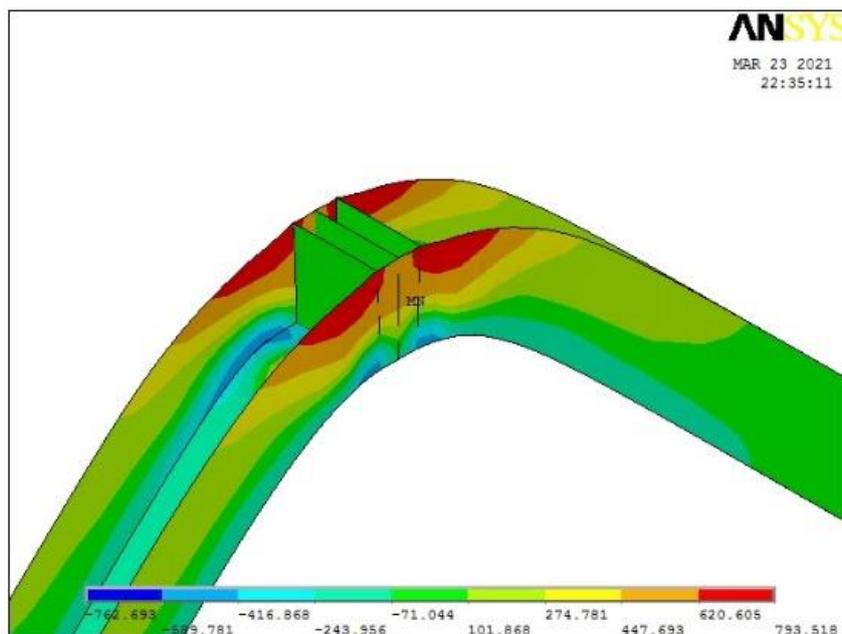
| Ensaio        | $M_{m\acute{a}x}(kN.m)$ |      |         | $\theta_{m\acute{a}x} (rad)$ |       |         |
|---------------|-------------------------|------|---------|------------------------------|-------|---------|
|               | EXP                     | NUM  | EXP/NUM | EXP                          | NUM   | EXP/NUM |
| C40X40X5X5-n  | 2,06                    | 2,41 | 0,85    | 21,00                        | 24,00 | 0,88    |
| C40X40X5X5-u  | 1,82                    | 1,57 | 1,16    | 7,75                         | 10,42 | 0,74    |
| C100X50X4X4-n | 1,71                    | 1,76 | 0,97    | 18,00                        | 25,40 | 0,71    |
| C100X50X4X4-u | 1,41                    | 1,38 | 1,02    | 4,17                         | 4,51  | 0,92    |
| C100X50X6X9-n | 1,61                    | 1,56 | 1,03    | 12,50                        | 22,42 | 0,56    |
| C100X50X6X9-u | 1,86                    | 1,81 | 1,03    | 23,20                        | 29,00 | 0,80    |

#### 4.4 Configurações deformadas

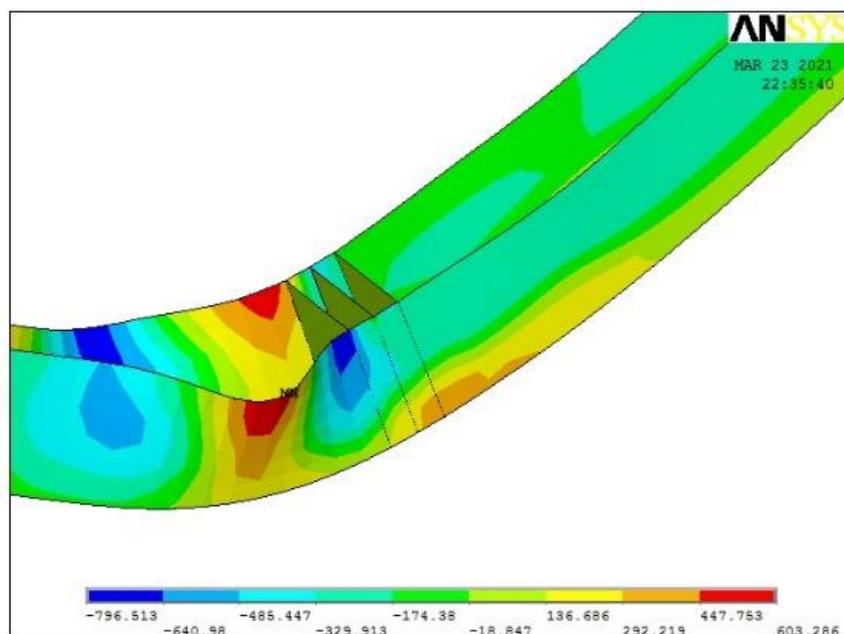
Neste item são estudados os modos de falha presentes nas análises desenvolvidas. Para tal, são analisadas as deformadas e a distribuição da tensão de von Mises nos perfis ao longo dos intervalos de aplicação de carregamento. No geral são observados dois comportamentos: a falha dos perfis na posição “u” ocorre por flambagem local; na posição “n”, por flambagem global com surgimento de rótula plástica, o que em fase posterior desenvolve o efeito catenária.

Um exemplo onde podem ser facilmente observados esses efeitos é mostrado na Figura 54, onde o perfil C40x40x5x5 com vão de 750 mm é

representado em ambas as posições para o elemento de casca. As deformadas e as tensões desenvolvidas em todos os perfis analisados nessa etapa podem ser vistos na Figura 55 e na Figura 56, para os perfis com elementos de cascas, e Figura 57 e Figura 58 para os modelos com elementos sólidos.

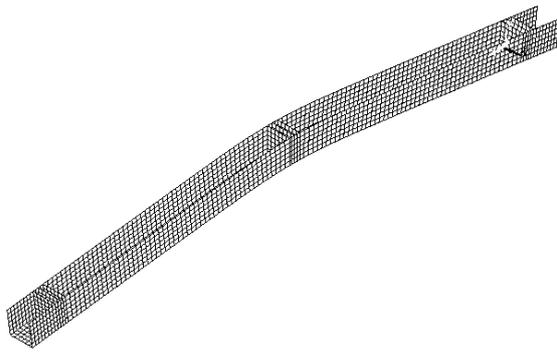


(a) rótula plástica

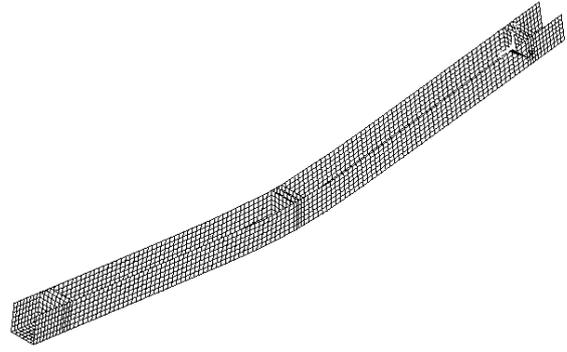


(b) deformação local

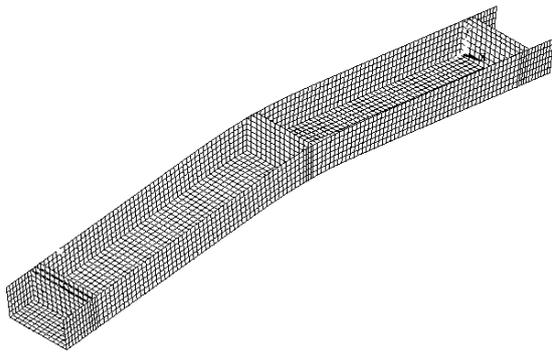
**Figura 54 – Tipos de falha.**



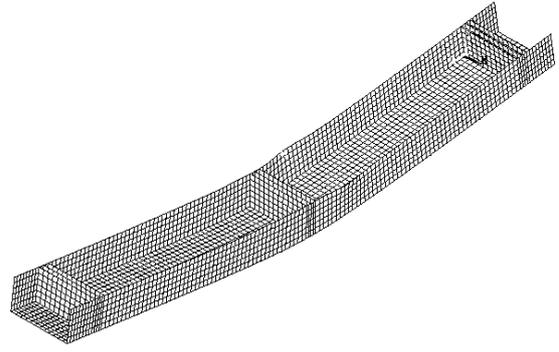
(a) C40x40x5x5-n



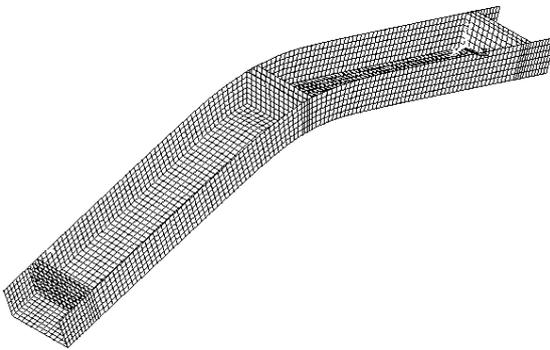
(b) C40x40x5x5-u



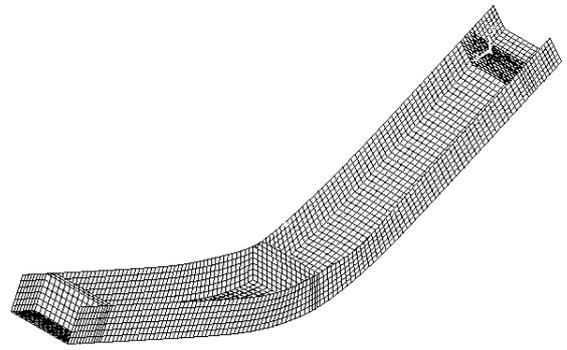
(c) C100x100x4x4-n



(d) C100x100x4x4-u

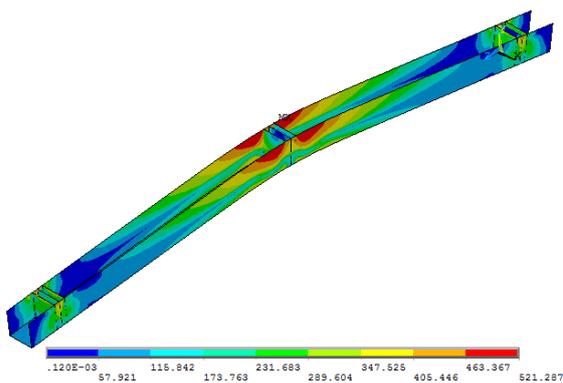


(e) C100x100x6x9-n

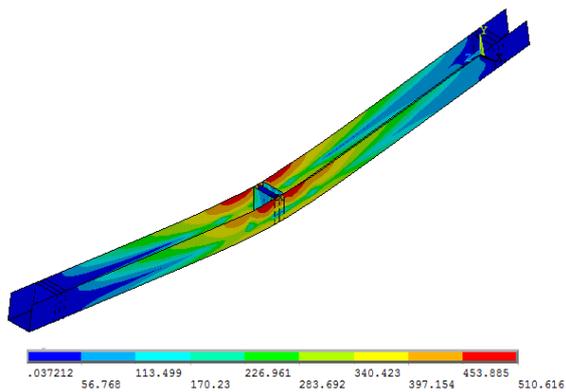


(f) C100x100x6x9-u

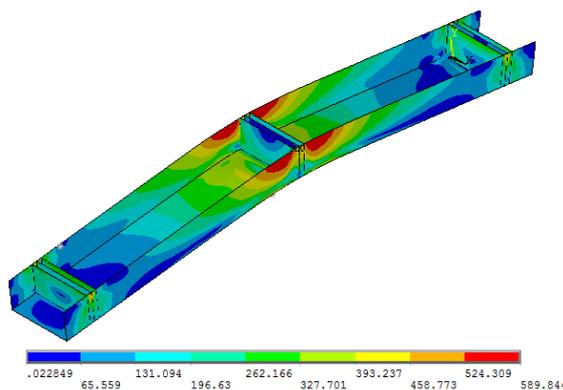
**Figura 55 – Deformadas – elementos de casca.**



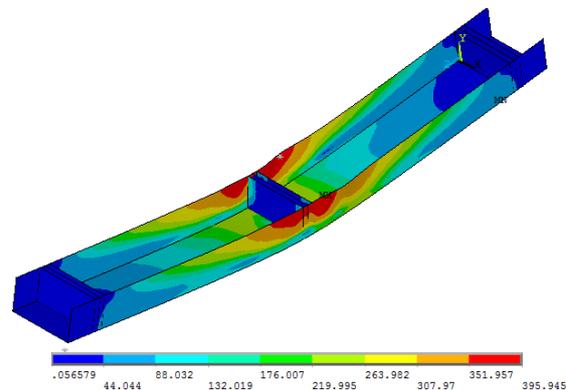
(a) C40x40x5x5-n



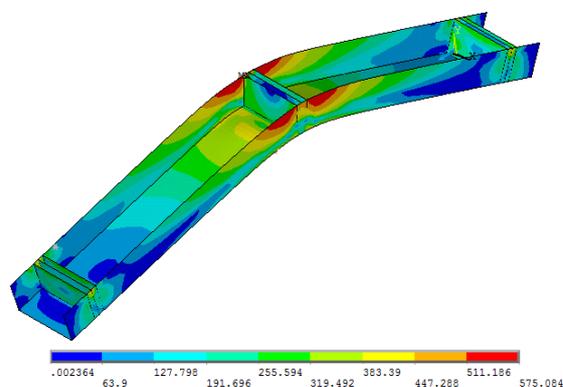
(b) C40x40x5x5-u



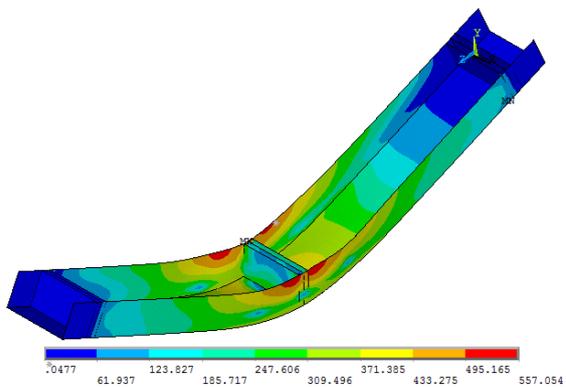
(c) C100x100x4x4-n



(d) C100x100x4x4-u

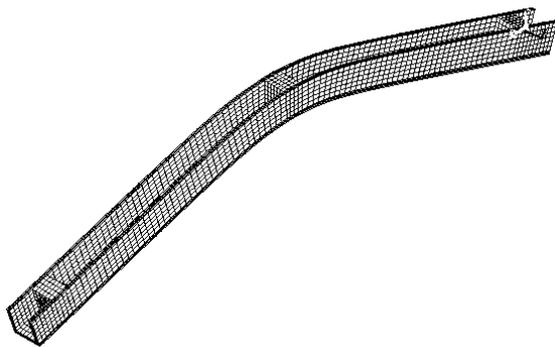


(e) C100x100x6x9-n

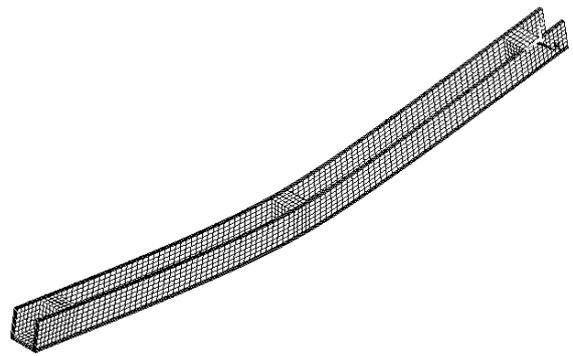


(f) C100x100x6x9-u

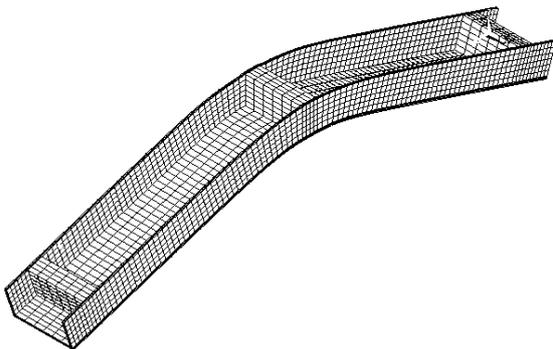
**Figura 56 – Tensões de von Mises – elementos de casca.**



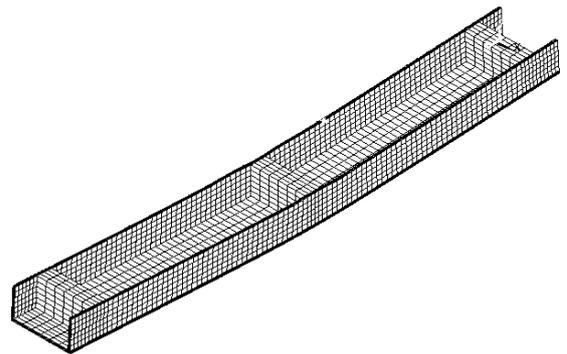
(a) C40x40x5x5-n



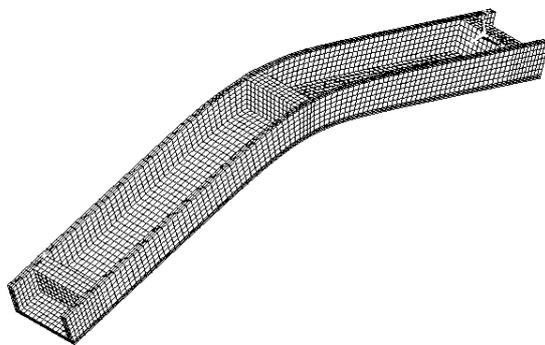
(b) C40x40x5x5-u



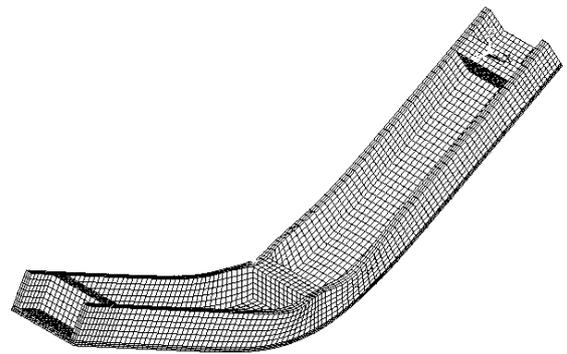
(c) C100x100x4x4-n



(d) C100x100x4x4-u

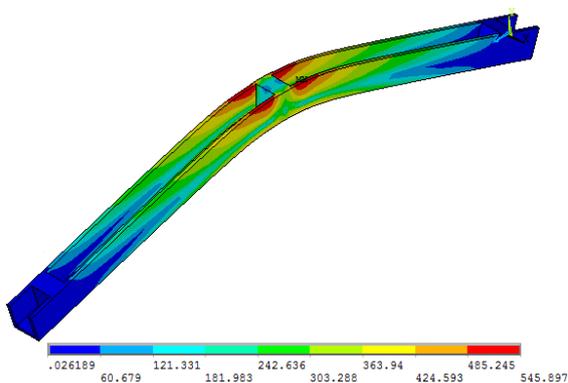


(e) C100x100x6x9-n

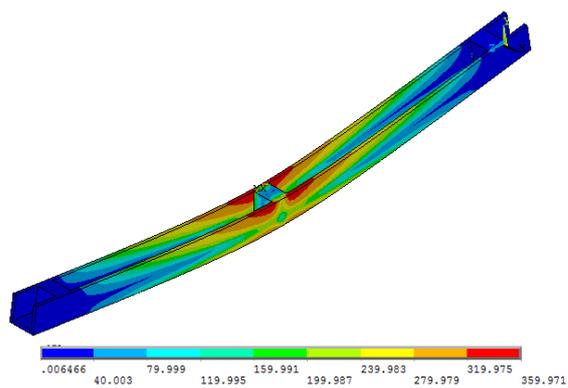


(f) C100x100x6x9-u

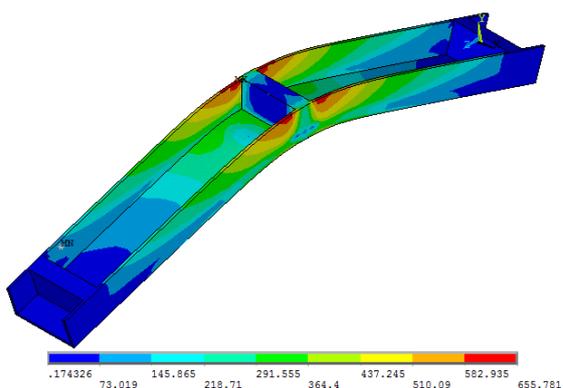
**Figura 57 – Deformadas – elementos sólidos.**



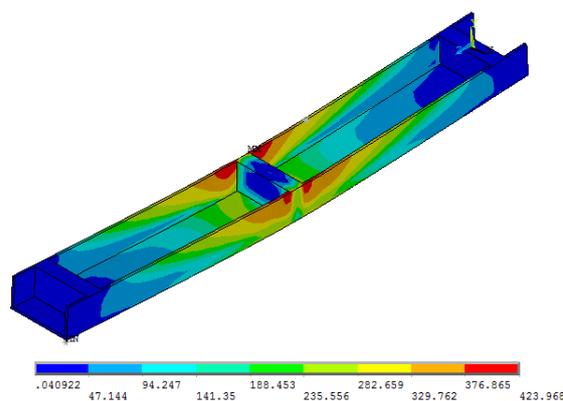
(a) C40x40x5x5-n



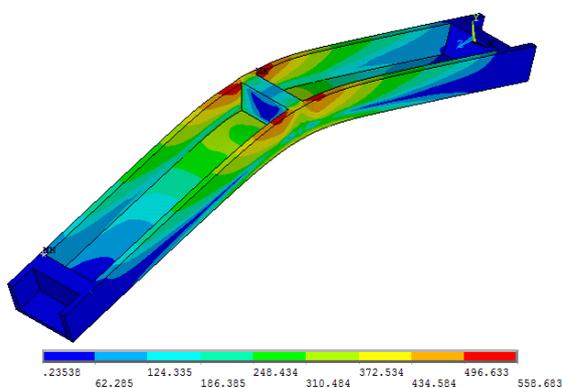
(b) C40x40x5x5-u



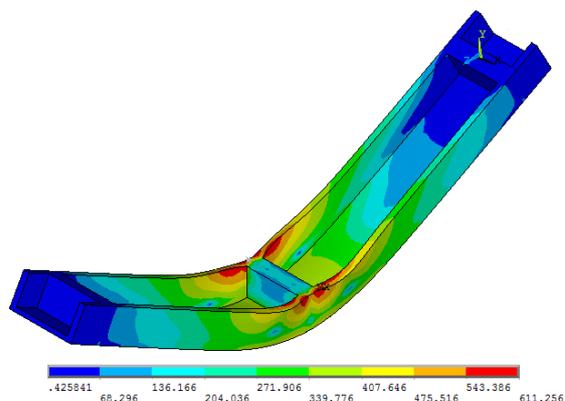
(c) C100x100x4x4-n



(d) C100x100x4x4-u



(e) C100x100x6x9-n



(f) C100x100x6x9-u

**Figura 58 – Tensões de von Mises – elementos sólidos.**

#### 4.5 Escolha dos Modelos

Após todas as análises, foi definido que para a continuidade deste trabalho, e conseqüente realização da análise paramétrica, serão utilizados os modelos com elementos de casca. Essa escolha foi feita devido à diferença de esforço computacional exigida pelo modelo sólido em comparação ao modelo com casca, que pode ser vista na Tabela 22.

Além disso, foram verificadas também, algumas inconsistências no modelo sólido quando foram realizadas algumas tentativas de alteração do vão, onde ocorriam grandes diferenças nos resultados ao se mudar a malha para ajustar a esse novo valor. Enquanto o normal era se esperar alguma mudança devido a malhas diferentes, a discrepância encontrada não ocorreu, dando baixa confiabilidade para desenvolver mais modelos segundo essa proposta.

**Tabela 22 – Esforço computacional das análises.**

| Ensaio        | Tempo (min)       |                 |
|---------------|-------------------|-----------------|
|               | Elemento de Casca | Elemento Sólido |
| C40X40X5X5-n  | 5                 | 22              |
| C40X40X5X5-u  | 7                 | 15              |
| C100X50X4X4-n | 8                 | 27              |
| C100X50X4X4-u | 11                | 23              |
| C100X50X6X9-n | 10                | 31              |
| C100X50X6X9-u | 10                | 25              |

## 5 ANÁLISE PARAMÉTRICA

De modo a ampliar a quantidade de modelos a serem investigados sobre o assunto, será apresentada uma análise paramétrica, em que se buscou analisar o comportamento de 29 diferentes seções do perfil C em aço inoxidável. Essas seções foram escolhidas dentro de perfis tabelados da indústria brasileira, representando assim produtos que podem ser empregados como elementos estruturais disponíveis no mercado.

### 5.1 Modelos estudados

Para execução dessas análises foi utilizado o elemento de casca, conforme o modelo calibrado apresentado no capítulo anterior. Desta forma, dividiu-se a escolha dos perfis em 3 etapas. Na primeira, foram utilizados resultados e medições executadas no Laboratório de Fonseca Telles da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) nos perfis C de aço AISI 304 em perfis conformados a frio para definição de duas peças. As medidas das seções transversais podem ser verificadas na Tabela 23. A segunda etapa considerou perfis com espessuras nominais segundo tabelas indicadas na ABNT NBR 6355 [12], considerando para este estudo, os perfis com alma e mesas com mesmos comprimentos, seguindo os ensaios experimentais de Theofanaus et al. [10]. Essa etapa é apresentada na Tabela 24. Por fim, a terceira etapa buscou aplicar seções transversais tabeladas na ABNT NBR 6355 [12], mantendo as medidas coerentes com os modelos usados na etapa anterior, como vista na Tabela 25.

Para escolha dos vãos a serem estudados, verificou-se a relação entre o vão ( $L$ ) e o comprimento da mesa (altura da seção transversal), adotando uma região entre 10 e 40, valores que compreenderiam vãos mais comuns de elementos sob flexão. Isto excluirá os casos onde os elementos se comportem como vigas paredes ou apresentem flechas excessivas devido ao uso de vãos

fora do padrão. Foram escolhidos cinco vãos diferentes dentro desta margem. A relação desses vãos é apresentada na Tabela 26.

Destaca-se que ao testar vãos muito pequenos, menores do que esse limite estipulado, pode-se notar que o comportamento não correspondia ao estudo previsto, possivelmente porque o perfil acaba não atuando como uma viga, mas sim como um bloco rígido sob compressão.

**Tabela 23 – Dimensões da seção transversal – Etapa 1.**

| Ensaio     | b (mm) | h (mm) | t <sub>f</sub> (mm) | t <sub>w</sub> (mm) |
|------------|--------|--------|---------------------|---------------------|
| C40X40X5X5 | 40,2   | 41,3   | 5,10                | 5,10                |
| C80X80X3X3 | 81,0   | 81,5   | 3,30                | 3,20                |

**Tabela 24 – Dimensões da seção transversal – Etapa 2.**

| Ensaio             | b (mm) | h (mm) | t <sub>f</sub> (mm) | t <sub>w</sub> (mm) |
|--------------------|--------|--------|---------------------|---------------------|
| C40X40X2X2         | 40     | 40     | 2,00                | 2,00                |
| C40X40X3,35X3,35   | 40     | 40     | 3,35                | 3,35                |
| C40X40X4,75X4,75   | 40     | 40     | 4,75                | 4,75                |
| C75X75X2X2         | 75     | 75     | 2,00                | 2,00                |
| C75X75X3,35X3,35   | 75     | 75     | 3,35                | 3,35                |
| C75X75X4,75X4,75   | 75     | 75     | 4,75                | 4,75                |
| C80X80X2X2         | 80     | 80     | 2,00                | 2,00                |
| C80X80X3,35X3,35   | 80     | 80     | 3,35                | 3,35                |
| C80X80X4,75X4,75   | 80     | 80     | 4,75                | 4,75                |
| C100X100X2X2       | 100    | 100    | 2,00                | 2,00                |
| C100X100X3,35X3,35 | 100    | 100    | 3,35                | 3,35                |
| C100X100X4,75X4,75 | 100    | 100    | 4,75                | 4,75                |
| C125X125X2X2       | 125    | 125    | 2,00                | 2,00                |
| C125X125X3,35X3,35 | 125    | 125    | 3,35                | 3,35                |
| C125X125X4,75X4,75 | 125    | 125    | 4,75                | 4,75                |

**Tabela 25 – Dimensões da seção transversal – Etapa 3.**

| Ensaio            | b (mm) | h (mm) | t <sub>f</sub> (mm) | t <sub>w</sub> (mm) |
|-------------------|--------|--------|---------------------|---------------------|
| C75X40X2X2        | 75     | 40     | 2,00                | 2,00                |
| C75X40X3,35X3,35  | 75     | 40     | 3,35                | 3,35                |
| C75X40X4,75X4,75  | 75     | 40     | 4,75                | 4,75                |
| C100X40X2X2       | 100    | 40     | 2,00                | 2,00                |
| C100X40X3,35X3,35 | 100    | 40     | 3,35                | 3,35                |
| C100X40X4,75X4,75 | 100    | 40     | 4,75                | 4,75                |
| C100X75X2X2       | 100    | 75     | 2,00                | 2,00                |
| C100X75X3,35X3,35 | 100    | 75     | 3,35                | 3,35                |
| C100X75X4,75X4,75 | 100    | 75     | 4,75                | 4,75                |
| C125X75X2X2       | 125    | 75     | 2,00                | 2,00                |
| C125X75X3,35X3,35 | 125    | 75     | 3,35                | 3,35                |
| C125X75X4,75X4,75 | 125    | 75     | 4,75                | 4,75                |

**Tabela 26 – Proposta de vãos.**

| b (mm) | Vão (mm) |         |         |         |        |
|--------|----------|---------|---------|---------|--------|
|        | 500      | 750     | 1000    | 1250    | 1500   |
| 40     | L/12,5   | L/18,75 | L/25    | L/31,25 | L/37,5 |
|        | 750      | 1500    | 2000    | 2500    | 3000   |
| 75     | L/10     | L/20    | L/26,67 | L/33,33 | L/40   |
|        | 1000     | 1500    | 2000    | 2500    | 3000   |
| 80     | L/12,5   | L/18,75 | L/25    | L/31,25 | L/37,5 |
|        | 1000     | 2000    | 2500    | 3000    | 4000   |
| 100    | L/10     | L/20    | L/25    | L/30    | L/40   |
|        | 1250     | 2500    | 3250    | 4000    | 5000   |
| 125    | L/10     | L/20    | L/26    | L/32    | L/40   |

Uma vez escolhidos todos os modelos que serão feitos, foram executadas todas as análises numéricas das opções escolhidas e também realizado o dimensionamento teórico segundo o Eurocode 3 – Parte 1.4. [17] e CSM [21], para a comparação dos resultados. Os resultados encontrados podem ser vistos no APÊNDICE D.

## 5.2 Material

Uma vez definidas as seções transversais, foram estipuladas as condições a serem seguidas para a caracterização do material e para escolha dos vãos estudados, de forma a garantir coerência com as normas vigentes e com as preposições apresentadas no capítulo anterior. Para aplicação da teoria de Ramberg-Osgood [22], foram utilizados os dados da Tabela 27. Esses dados foram estimados com base nos resultados experimentais de caracterização executados no laboratório Fonseca Telles para o perfil anteriormente denominado C80x80x3x3 (Tabela 23), utilizando como parâmetro, a relação entre a variação de espessura do material e suas propriedades físicas que podem ser observadas segundo os dados fornecidos por Menezes [37] e Theofanous et al. [10], e descritos na Tabela 28.

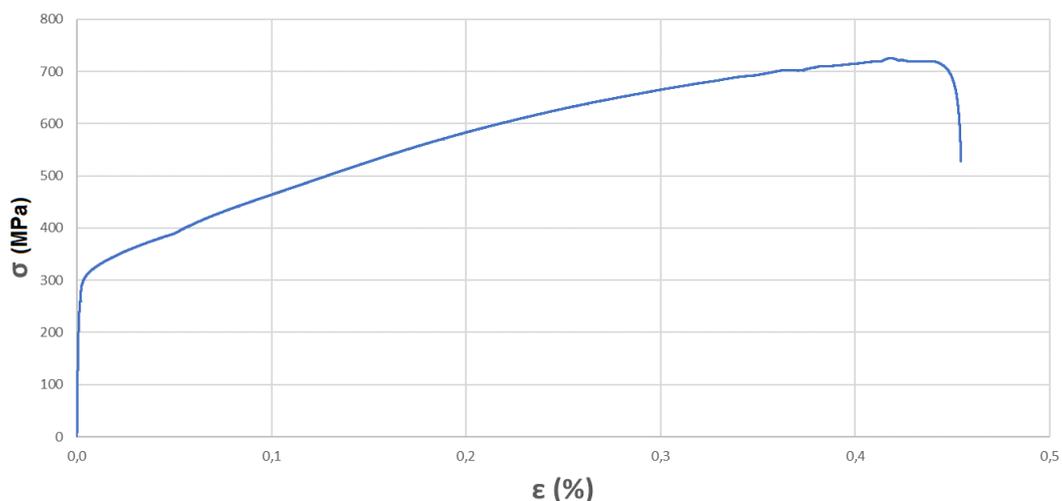
Os resultados das características do perfil C80x80x3x3 foram obtidos segundo uma curva tensão *versus* deformação do material desenvolvida baseada nos resultados de compressão para as menores deformações e do resultado de tração para o resto do material, sendo utilizada a média entre os resultados da alma e mesa para os ensaios de tração. Os resultados dos ensaios foram apresentados no item 3.5 e a curva utilizada para prosseguimento do estudo pode ser visualizada na Figura 59.

**Tabela 27 – Proposta para propriedades dos materiais.**

| Ensaio | E (N/mm <sup>2</sup> ) | f <sub>0,2</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) | f <sub>u</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) |
|--------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 2,00   | 188599                 | 284                                   | 689                                 |
| 3,00   | 194700                 | 300                                   | 725                                 |
| 3,35   | 196836                 | 306                                   | 738                                 |
| 4,75   | 205378                 | 328                                   | 789                                 |
| 5,00   | 206903                 | 332                                   | 798                                 |

**Tabela 28 – Propriedades dos materiais.**

| Espessura (mm) | E(N/mm <sup>2</sup> ) | f <sub>0,2</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) | f <sub>u</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) |
|----------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 4,8 [37]       | 200000                | 437                                   | 715                                 |
| 6,4 [37]       | 182370                | 399                                   | 710                                 |
| 4 [10]         | 190100                | 289                                   | 687                                 |
| 6 [10]         | 184800                | 258                                   | 576                                 |

**Figura 59 – Curva tensão *versus* deformação do material.**

### 5.3 Análise dos resultados numéricos

Os resultados numéricos de todos os perfis propostos foram avaliados e tabelados de forma a possibilitar uma boa compreensão do comportamento do perfil C. Os comportamentos foram expressos em gráficos de momento dividido por momento plástico ( $M/M_{pl}$ ) *versus* rotação dividido por rotação plástica ( $\theta/\theta_{pl}$ ), a fim de facilitar a continuidade e comparação com os modelos base estudados.

Desta forma foram determinados os valores de momento na falha em função do momento plástico para todos os perfis, sendo importante destacar que para os perfis na posição “n” foi feita uma determinação aproximada para a maioria dos perfis. Essa aproximação foi necessária, pois a curva característica

desses perfis não apresentou escoamento bem definido e sim uma subida exponencial da sua resistência. Esse fenômeno é possivelmente explicado pela ocorrência do efeito catenária, sendo observado o surgimento da rótula plástica no meio dos vãos desses perfis, como mostrado no exemplo da Figura 60.

Para uma boa aproximação da tensão desses perfis que apresentaram o efeito catenária foi determinado como momento último o ponto de inflexão da curva  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$ , a partir do qual é possível notar uma tendência de crescimento exponencial. Para determinação deste ponto, foi utilizado uma curva auxiliar mantendo a inclinação do trecho intermediário da curva, como ilustrado na Figura 61.

Observando-se da Tabela 29 a Tabela 33, assim como nas curvas que podem ser vistas no APÊNDICE C, uma tendência de valores, onde os perfis na posição “u” possuem resistência menor do que perfis na posição “n”. Os valores destacados em vermelho são os que foram necessários fazer a estimativa para o momento máximo.

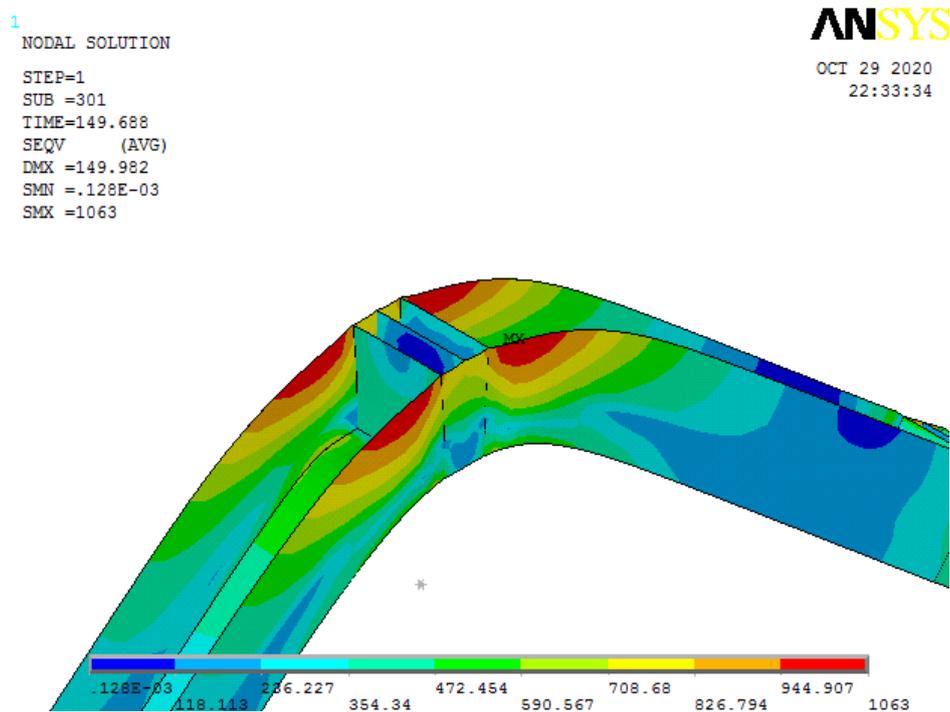
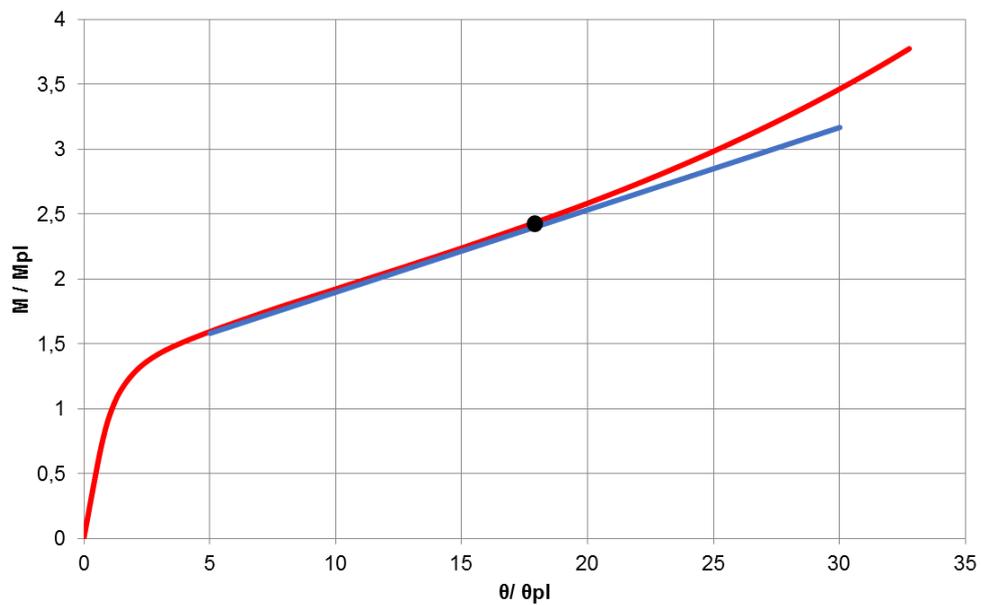
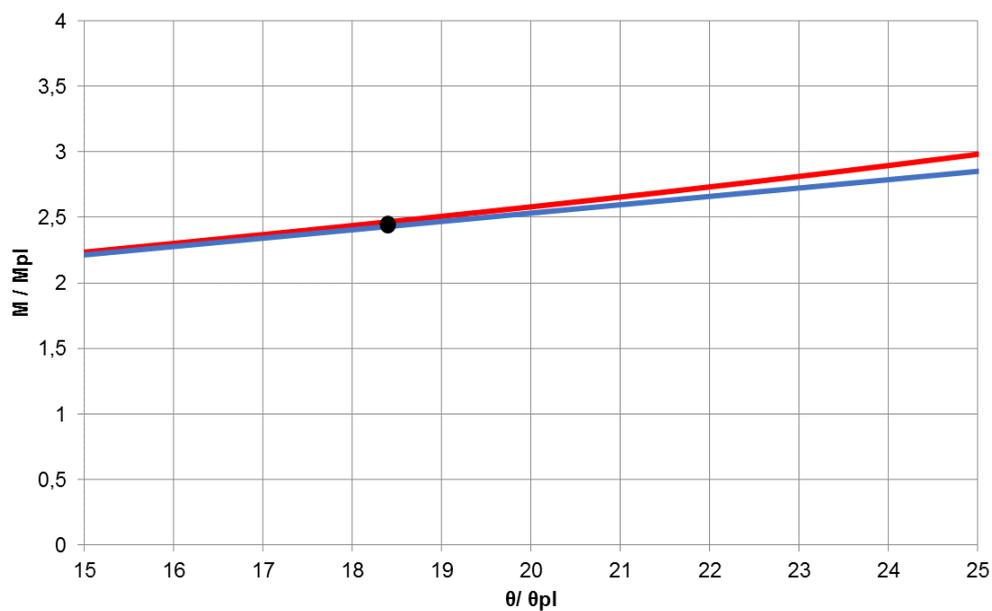


Figura 60 – Efeito catenária no modelo 40x40x4,75x4,75-500n.



(a) curva completa



(b) curva ampliada

**Figura 61 – Curva  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  (40x40x4,75x4,75-n)**

**Tabela 29 – Resultados de  $M_{\text{máx}} / M_{\text{pl}}$  para perfis com mesa de 40mm.**

| Perfil             | Vão (mm) |      |      |      |      | Média |
|--------------------|----------|------|------|------|------|-------|
|                    | 500      | 750  | 1000 | 1250 | 1500 |       |
| 40x40x2x2-u        | 1,15     | 1,05 | 0,99 | 0,93 | 0,89 | 1,00  |
| 40x40x2x2-n        | 2,07     | 1,92 | 1,78 | 1,71 | 1,63 | 1,82  |
| 40x40x3,35x3,35-u  | 1,62     | 1,50 | 1,43 | 1,37 | 1,36 | 1,46  |
| 40x40x3,35x3,35-n  | 2,06     | 1,89 | 1,73 | 1,66 | 1,60 | 1,79  |
| 40x40x4,75x4,75-u  | 2,00     | 1,96 | 1,92 | 1,88 | 1,88 | 1,93  |
| 40x40x4,75x4,75-n  | 2,04     | 1,84 | 1,69 | 1,66 | 1,57 | 1,76  |
| 40x40x5x5-u        | 2,46     | 2,31 | 2,26 | 2,21 | 2,20 | 2,29  |
| 40x40x5x5-n        | 2,20     | 2,17 | 1,90 | 1,82 | 1,78 | 1,97  |
| 75x40x2x2-u        | 1,12     | 1,04 | 0,94 | 0,88 | 0,84 | 0,96  |
| 75x40x2x2-n        | 1,53     | 1,49 | 1,44 | 1,38 | 1,52 | 1,47  |
| 75x40x3,35x3,35-u  | 1,56     | 1,46 | 1,39 | 1,33 | 1,29 | 1,41  |
| 75x40x3,35x3,35-n  | 1,78     | 1,71 | 1,71 | 1,64 | 1,64 | 1,70  |
| 75x40x4,75x4,75-u  | 1,92     | 1,77 | 1,70 | 1,62 | 1,58 | 1,72  |
| 75x40x4,75x4,75-n  | 1,88     | 1,89 | 1,75 | 1,69 | 1,57 | 1,76  |
| 100x40x2x2-u       | 1,14     | 1,04 | 0,97 | 0,90 | 0,84 | 0,98  |
| 100x40x2x2-n       | 1,61     | 1,61 | 1,48 | 1,46 | 1,49 | 1,53  |
| 100x40x3,35x3,35-u | 1,56     | 1,45 | 1,39 | 1,32 | 1,28 | 1,40  |
| 100x40x3,35x3,35-n | 1,83     | 1,82 | 1,75 | 1,73 | 1,72 | 1,77  |
| 100x40x4,75x4,75-u | 1,90     | 1,76 | 1,68 | 1,60 | 1,56 | 1,70  |
| 100x40x4,75x4,75-n | 1,88     | 1,80 | 1,76 | 1,71 | 1,69 | 1,77  |

**Tabela 30 – Resultados de  $M_{m\acute{a}x} / M_{pl}$  para perfis com mesa de 75mm.**

| Perfil             | Vão (mm) |      |      |      |      | Média |
|--------------------|----------|------|------|------|------|-------|
|                    | 750      | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 |       |
| 75x75x2x2-u        | 0,61     | 0,49 | 0,46 | 0,45 | 0,43 | 0,49  |
| 75x75x2x2-n        | 1,40     | 1,39 | 1,37 | 1,34 | 1,35 | 1,37  |
| 75x75x3,35x3,35-u  | 1,13     | 0,95 | 0,89 | 0,84 | 0,80 | 0,92  |
| 75x75x3,35x3,35-n  | 1,80     | 1,80 | 1,63 | 1,60 | 1,57 | 1,68  |
| 75x75x4,75x4,75-u  | 1,47     | 1,30 | 1,23 | 1,17 | 1,13 | 1,26  |
| 75x75x4,75x4,75-n  | 1,91     | 1,83 | 1,78 | 1,73 | 1,69 | 1,79  |
| 100x75x2x2-u       | 0,59     | 0,47 | 0,44 | 0,43 | 0,42 | 0,47  |
| 100x75x2x2-n       | 1,35     | 1,38 | 1,37 | 1,35 | 1,35 | 1,36  |
| 100x75x3,35x3,35-u | 1,09     | 0,92 | 0,87 | 0,81 | 0,77 | 0,89  |
| 100x75x3,35x3,35-n | 1,64     | 1,50 | 1,50 | 1,47 | 1,45 | 1,51  |
| 100x75x4,75x4,75-u | 1,43     | 1,26 | 1,20 | 1,14 | 1,10 | 1,23  |
| 100x75x4,75x4,75-n | 1,65     | 1,51 | 1,51 | 1,50 | 1,49 | 1,53  |
| 125x75x2x2-u       | 0,60     | 0,46 | 0,43 | 0,42 | 0,41 | 0,46  |
| 125x75x2x2-n       | 1,32     | 1,28 | 1,26 | 1,26 | 1,28 | 1,28  |
| 125x75x3,35x3,35-u | 1,06     | 0,89 | 0,86 | 0,81 | 0,77 | 0,88  |
| 125x75x3,35x3,35-n | 1,61     | 1,50 | 1,45 | 1,44 | 1,43 | 1,49  |
| 125x75x4,75x4,75-u | 1,41     | 1,25 | 1,18 | 1,13 | 1,08 | 1,21  |
| 125x75x4,75x4,75-n | 1,68     | 1,62 | 1,59 | 1,59 | 1,63 | 1,62  |

**Tabela 31 – Resultados de  $M_{m\acute{a}x} / M_{pl}$  para perfis com mesa de 80mm.**

| Perfil            | Vão  |      |      |      |      | Média |
|-------------------|------|------|------|------|------|-------|
|                   | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 |       |
| 80x80x2x2-u       | 0,50 | 0,46 | 0,43 | 0,42 | 0,41 | 0,44  |
| 80x80x2x2-n       | 1,34 | 1,32 | 1,31 | 1,29 | 1,28 | 1,31  |
| 80x80x3x3-u       | 0,99 | 0,89 | 0,82 | 0,77 | 0,74 | 0,84  |
| 80x80x3x3-n       | 1,67 | 1,55 | 1,50 | 1,45 | 1,33 | 1,50  |
| 80x80x3,35x3,35-u | 1,00 | 0,91 | 0,84 | 0,79 | 0,76 | 0,86  |
| 80x80x3,35x3,35-n | 1,68 | 1,58 | 1,52 | 1,48 | 1,44 | 1,54  |
| 80x80x4,75x4,75-u | 1,36 | 1,26 | 1,19 | 1,13 | 1,09 | 1,20  |
| 80x80x4,75x4,75-n | 1,79 | 1,77 | 1,74 | 1,70 | 1,66 | 1,73  |

**Tabela 32 – Resultados de  $M_{m\acute{a}x} / M_{pl}$  para perfis com mesa de 100mm.**

| Perfil              | Vão (mm) |      |      |      |      | Média |
|---------------------|----------|------|------|------|------|-------|
|                     | 1000     | 2000 | 2500 | 3000 | 4000 |       |
| 100x100x2x2-u       | 0,40     | 0,34 | 0,33 | 0,33 | 0,30 | 0,34  |
| 100x100x2x2-n       | 1,21     | 1,19 | 1,16 | 1,15 | 1,13 | 1,17  |
| 100x100x3,35x3,35-u | 0,84     | 0,69 | 0,65 | 0,61 | 0,57 | 0,67  |
| 100x100x3,35x3,35-n | 1,55     | 1,59 | 1,51 | 1,47 | 1,40 | 1,50  |
| 100x100x4,75x4,75-u | 1,21     | 1,04 | 0,98 | 0,94 | 0,88 | 1,01  |
| 100x100x4,75x4,75-n | 1,79     | 1,71 | 1,66 | 1,64 | 1,55 | 1,67  |

**Tabela 33 – Resultados de  $M_{m\acute{a}x} / M_{pl}$  para perfis com mesa de 125mm.**

| Perfil              | Vão  |      |      |      |      | Média |
|---------------------|------|------|------|------|------|-------|
|                     | 1250 | 2500 | 3250 | 4000 | 5000 |       |
| 125x125x2x2-u       | 0,30 | 0,26 | 0,25 | 0,25 | 0,24 | 0,26  |
| 125x125x2x2-n       | 1,11 | 1,08 | 1,06 | 1,04 | 1,03 | 1,06  |
| 125x125x3,35x3,35-u | 0,62 | 0,50 | 0,48 | 0,46 | 0,44 | 0,50  |
| 125x125x3,35x3,35-n | 1,39 | 1,36 | 1,33 | 1,32 | 1,29 | 1,34  |
| 125x125x4,75x4,75-u | 0,98 | 0,82 | 0,77 | 0,73 | 0,69 | 0,80  |
| 125x125x4,75x4,75-n | 1,67 | 1,66 | 1,55 | 1,48 | 1,40 | 1,55  |

Foram desenvolvidos 290 modelos no total, sendo 5 vãos para duas posições diferentes, "n" e "u", para 29 seções transversais, ou seja, 145 análises para cada posição. Ao comparar as duas posições, nota-se que 133 dos 145 perfis (91,72%) mostraram o comportamento esperado onde a resistência dos perfis na posição "n" é maior do que os perfis da posição "u", reforçando o aferido por Theofanous et al. [10]. Nos 12 perfis onde não é aferido esse comportamento, como por exemplo, o perfil 40x40x4,75x4,75-u, verifica-se que os valores de ambas as posições são bem próximos, o que também foi sinalizado por Theofanous et al. [10], para alguns perfis mais rígidos. Dessa forma, o fato da posição "u" ser a que apresenta valor de resistência maior nesses casos pode ser justificado pelo erro gerado na aproximação dos resultados, que foi necessária para os perfis na posição "n".

O modo de falha dos perfis se assemelha ao visto na calibração dos modelos do capítulo 4. Para a posição "u", todos os 145 modelos apresentaram modo de falha local, enquanto para a posição "n" 110 dos 145 modelos apresentaram o comportamento decorrente do efeito catenária. Os 35 modelos que não apresentaram, correspondem aos 5 vãos testados para as seções transversais 75x75x2x2-n, 100x75x2x2-n, 125x75x2x2-n, 80x80x2x2-n, 100x100x2x2-n, 125x125x2x2-n e 125x125x3,35x3,35-n, como pode ser visto nos resultados da Tabela 29 a Tabela 33. Esses resultados indicam uma tendência onde a relação entre largura da mesa e espessura da mesa influencia diretamente no surgimento do efeito catenária, uma vez que esses perfis tem valores maiores para essa relação, todos superiores a 37, como pode ser visto na Tabela 34.

**Tabela 34 – Relação entre largura e espessura da mesa.**

| Largura da mesa (mm) | Espessura da mesa (mm) |       |       |       |
|----------------------|------------------------|-------|-------|-------|
|                      | 2,00                   | 3,00  | 3,35  | 4,75  |
| 40                   | 20,00                  | 13,33 | 11,94 | 8,42  |
| 75                   | 37,50                  | -     | 22,39 | 15,79 |
| 80                   | 40,00                  | 26,67 | 23,88 | 16,84 |
| 100                  | 50,00                  | -     | 29,85 | 21,05 |
| 125                  | 62,50                  | -     | 37,31 | 26,32 |

## 6 VERIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

Este capítulo avalia os resultados numéricos demonstrados no capítulo anterior e os resultados teóricos obtidos pelos métodos de dimensionamento dos perfis C propostos no capítulo dois, sendo eles o método do Eurocode 3 – Parte 1.4 [17] e do CSM [21]. A avaliação é feita por meio de uma comparação entre os resultados obtidos no ANSYS [9] e as cargas previstas pelos procedimentos de dimensionamento.

Os resultados serão divididos em duas partes, a primeira avaliando a relação entre os resultados numéricos e os obtidos pelo Eurocode 3 – Parte 1.4 [17], apresentada no item 6.1, e a segunda comparando os mesmos valores numéricos com os resultados do CSM [21], detalhada no item 6.2. A comparação será feita de duas formas, em função do  $\bar{\lambda}_p$  e  $\bar{\lambda}_p * L/r$ . Essas duas opções foram escolhidas, pois se tratam de dois padrões comuns para análise de resultados analíticos, sendo que a primeira não leva em consideração a influência do vão, apenas da seção transversal, enquanto a segunda retrata esse fator.

Além disso, é importante destacar que para o cálculo do limite de esbeltez  $\bar{\lambda}_p$  foi feita uma comparação entre as duas propostas da Equação (11), onde para a primeira parte deve-se utilizar o programa CUFSM [31] para calcular a tensão de flambagem local crítica ( $\sigma_{cr}$ ). Os resultados apresentam diferenças de valores consideráveis que alteram, principalmente, o dimensionamento do CSM, onde o valor  $\bar{\lambda}_p$  é sempre levado em conta nas fórmulas, enquanto para o Eurocode 3 – Parte 1.4 [17] esse fator é importante apenas nos perfis classe 4. Desta forma, foi utilizado o método proposto por Zhao e Gardner [20], utilizando-se a tensão de flambagem local crítica ( $\sigma_{cr}$ ), pois tenta representar melhor o comportamento do elemento como um todo e foi o método que obteve os resultados mais coerentes com o esperado.

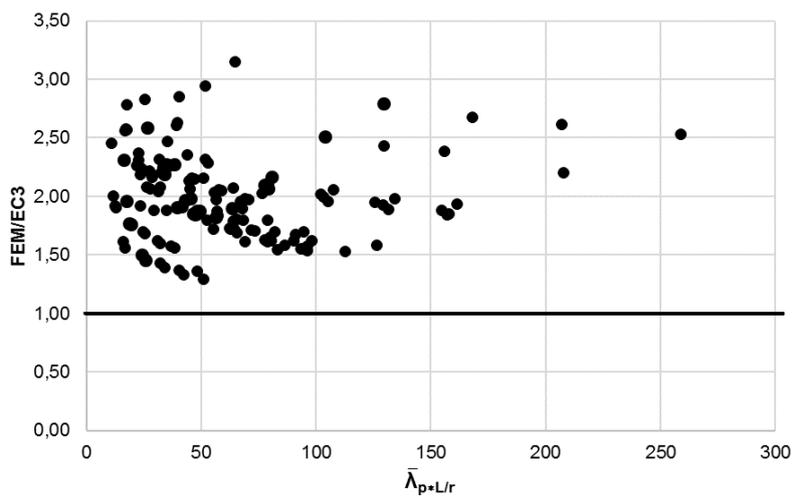
### 6.1 Comparação dos resultados numéricos e Eurocode 3

Neste item foi efetuada a comparação dos resultados entre os valores numéricos e teóricos obtidos pelo Eurocode 3 – Parte 1.4 [17]. Para melhor análise e avaliação dos resultados, optou-se por separar os perfis de acordo com a classificação da sua seção transversal. Desta forma, a Figura 62 e a Figura 63 apresentam os resultados dos perfis separados pela configuração do perfil, “u” ou “n”. E da Figura 64 a Figura 67, esses resultados são separados de forma mais detalhada.

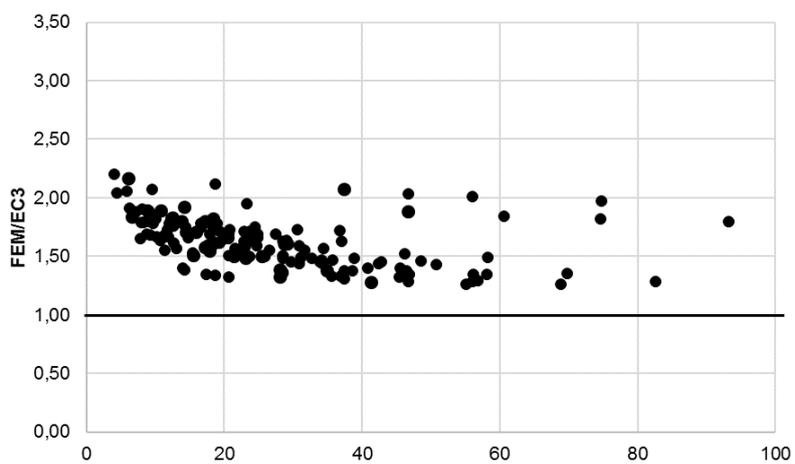
É possível perceber no dimensionamento do Eurocode 3 – Parte 1.4 [17] uma grande variação dos resultados para diferentes seções transversais, principalmente quando analisados os perfis classe 4, que foram encontrados apenas na posição "u". Enquanto obtém-se uma média de 1,75 e 1,60 para os perfis classe 1 e 2 das posições “u” e “n”, respectivamente, para as seções classe 3, esse valor aumenta para 2,50 e 1,95, correspondendo a um aumento de 43% e 22%, respectivamente.

**Tabela 35 – Análises dos resultados para a comparação numérica e do Eurocode.**

| Posição                | u     |       |      |      | n     |       |      |   |
|------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|---|
|                        | Todas | 1 e 2 | 3    | 4    | Todas | 1 e 2 | 3    | 4 |
| Média FEM/EC3          | 1,99  | 1,75  | 2,50 | 2,03 | 1,62  | 1,60  | 1,95 | - |
| Variância FEM/EC3      | 0,13  | 0,10  | 0,04 | 0,12 | 0,05  | 0,04  | 0,01 | - |
| Desvio Padrão FEM/EC3  | 0,36  | 0,32  | 0,20 | 0,35 | 0,21  | 0,20  | 0,10 | - |
| Valor Máximo - FEM/EC3 | 3,15  | 2,46  | 2,78 | 3,15 | 2,20  | 2,20  | 2,12 | - |
| Valor Mínimo - FEM/EC3 | 1,29  | 1,29  | 2,29 | 1,53 | 2,20  | 1,26  | 1,79 | - |

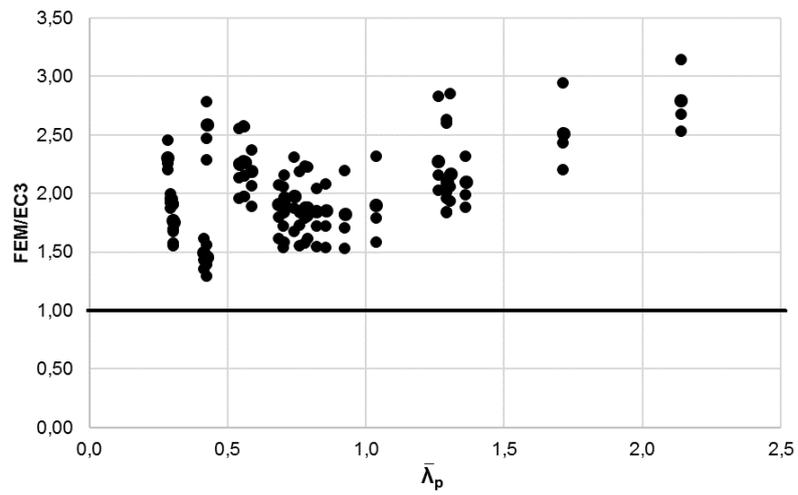


(a) Posição "u"

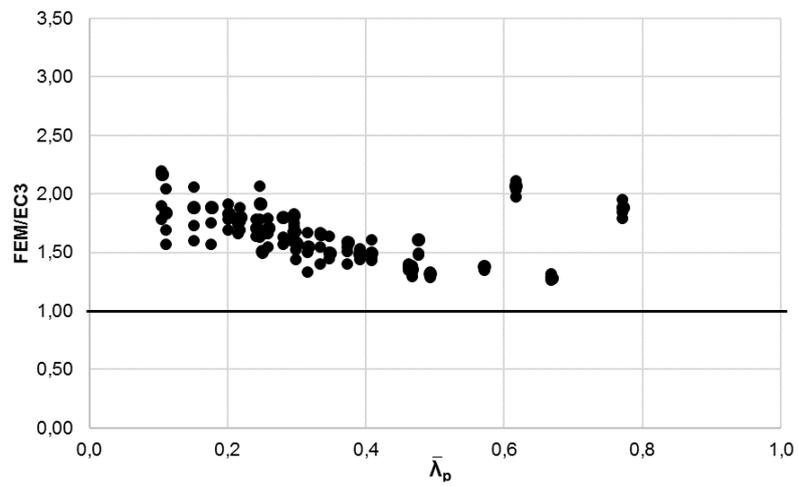


(b) Posição "n"

Figura 62 – Curva  $FEM/EC3$  versus  $\bar{\lambda}_p * L/r$ .

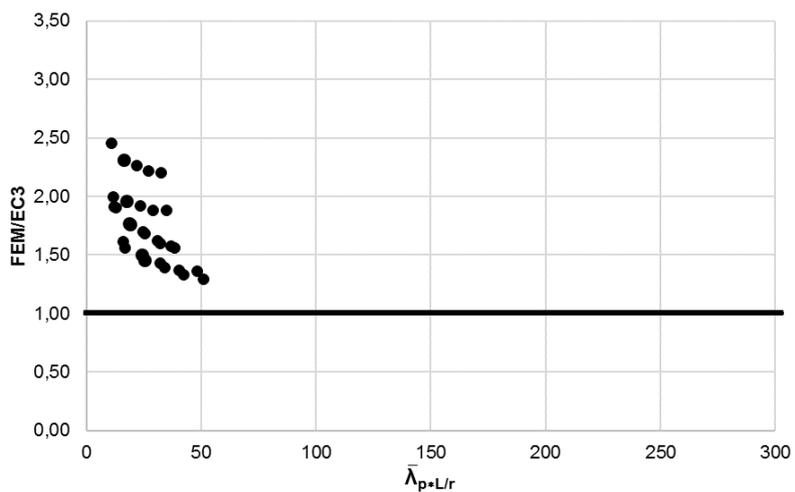


(a) Posição "u"

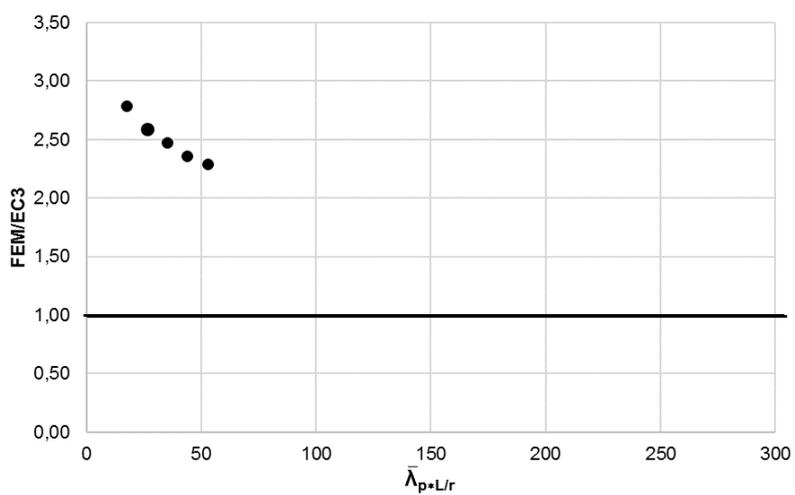


(b) Posição "n"

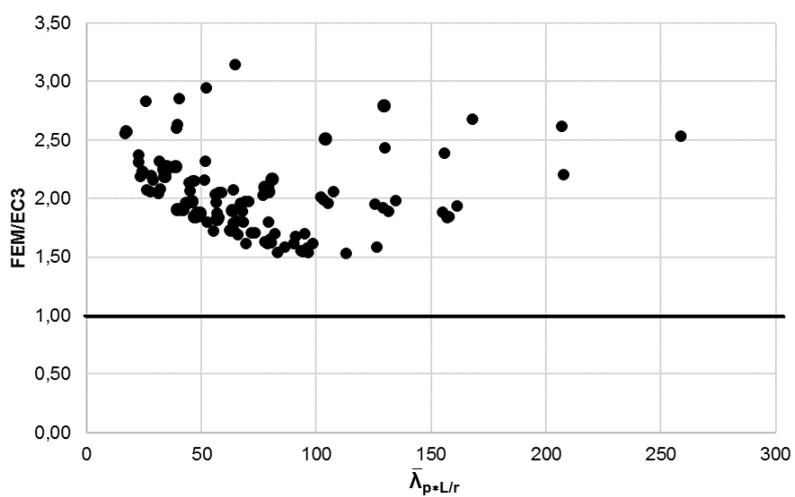
**Figura 63 – Curva  $FEM/EC3$  versus  $\bar{\lambda}_p$ .**



(a) Classe 1 e 2

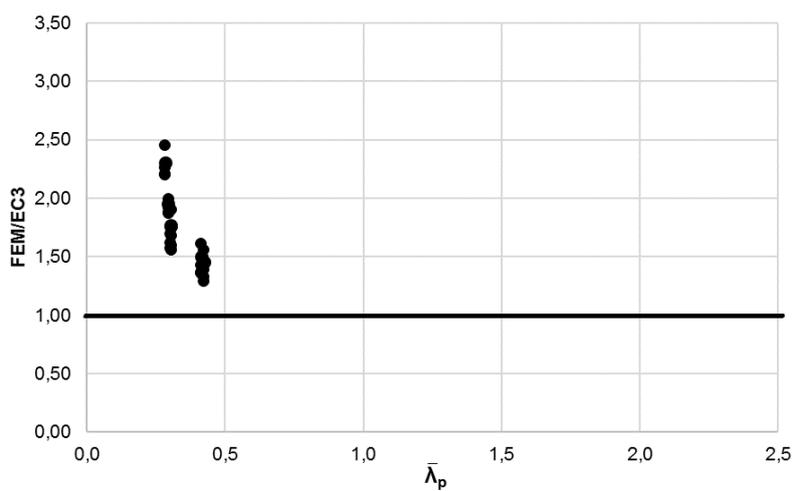


(b) Classe 3

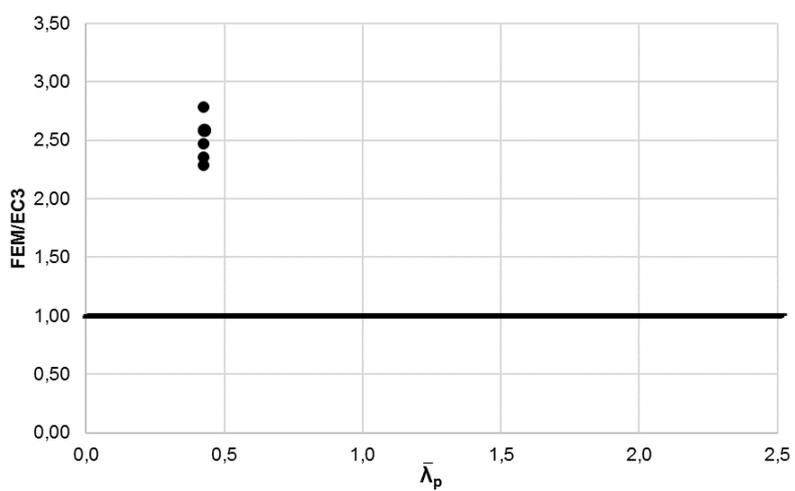


(a) Classe 4

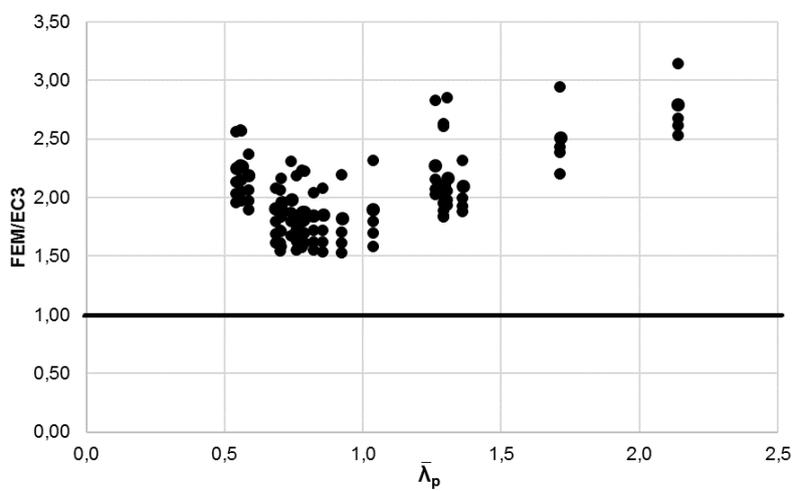
Figura 64 – Curva FEM/EC3 versus  $\bar{\lambda}_{p=L/r}$  – Posição “u” - separado por classes.



(a) Classe 1 e 2

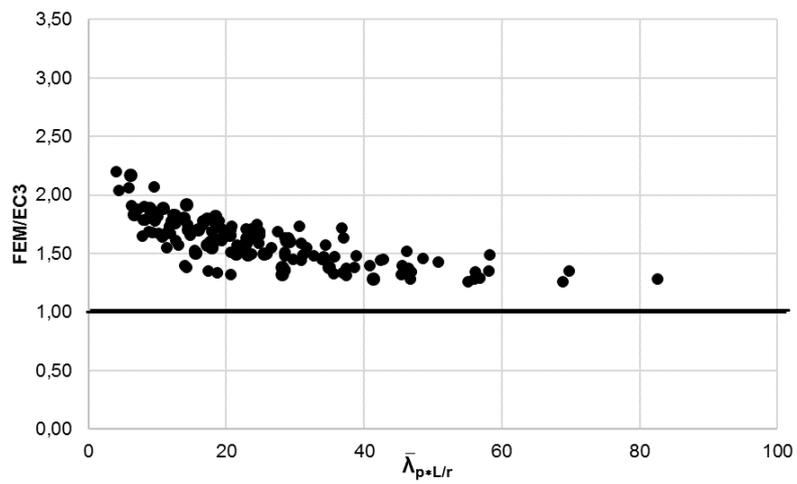


(b) Classe 3

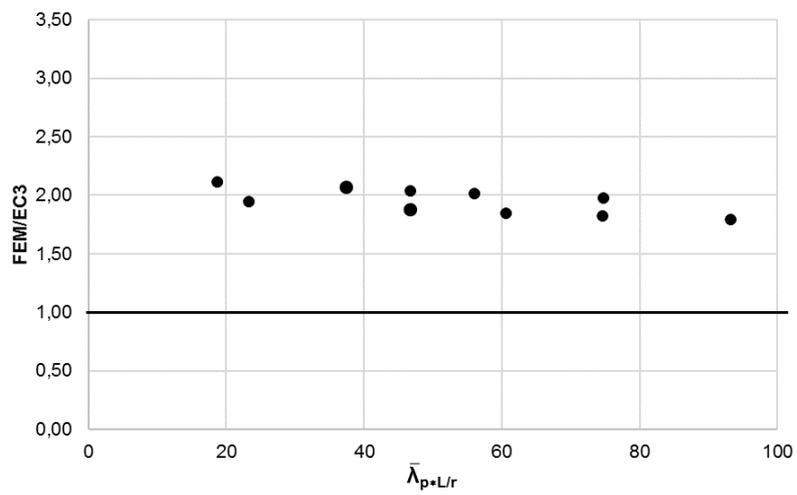


(c) Classe 4

Figura 65– Curva FEM/EC3 *versus*  $\bar{\lambda}_p$  – Posição "u" - separado por classes.

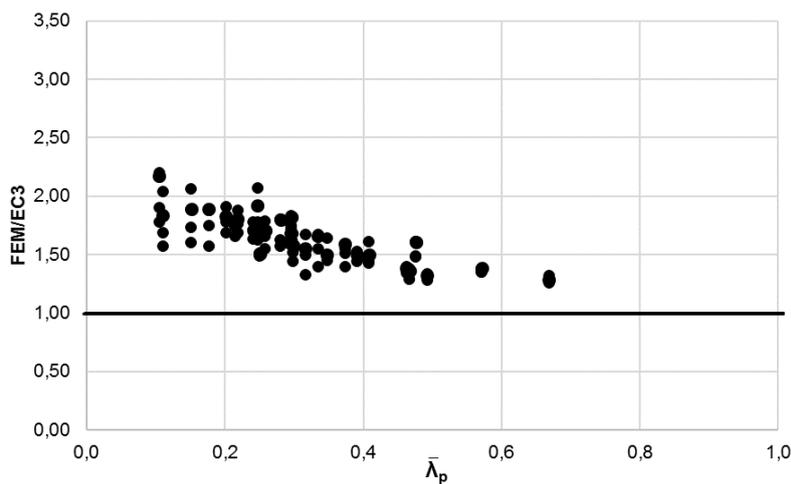


(a) Classe 1 e 2

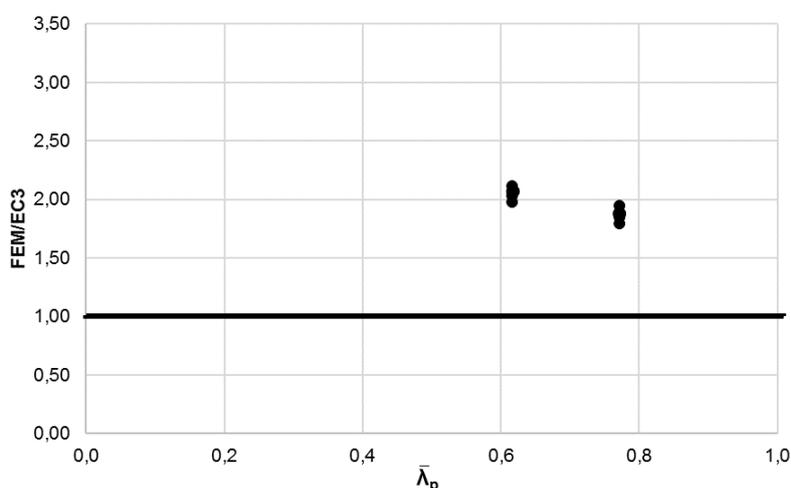


(b) Classe 3

**Figura 66– Curva  $FEM/EC3$  versus  $\bar{\lambda}_p * L/r$ – Posição “n” - Separado por classes.**



(a) Classe 1 e 2



(b) Classe 3

**Figura 67 – Curva FEM/EC3 *versus*  $\bar{\lambda}_p$  – Posição “n” - Separado por classes.**

Para os perfis da classe 4 na posição “u” obteve-se uma média de 2,03, que representa um aumento de 16 % quando comparado aos perfis classe 1 e 2 na mesma posição, o que é menor do que o aumento dos perfis classe 3. Porém, ao se analisar os gráficos da classe 4, junto com a variância de 0,12 é possível perceber que os valores são menos constantes, variando do mínimo de 1,53 até o máximo de 3,15, o que representa um dimensionamento teórico com resistência mais do que três vezes menor do que os resultados encontrados na análise numérica.

Constata-se dessa forma que o dimensionamento do Eurocode 3 – Parte 1.4 [17], além de conservador, garante uma baixa confiabilidade dos resultados

uma vez que não representa bem a tendência dos perfis reais, tendo variação bem grande principalmente quando analisa perfis mais esbeltos, principalmente os da classe 4, que utilizam o método da área efetiva para definição da resistência, de forma que esse dimensionamento parece não levar em conta eficientemente o ganho de resistência dos aços inoxidáveis ao encruamento da seção transversal.

## 6.2 Comparação dos resultados numéricos e CSM

Para comparação dos resultados numéricos com os valores de carga obtidos pelo CSM, novamente separou-se os perfis nas posições “u” e “n”. Esses resultados podem ser vistos na Figura 68 e na Figura 69.

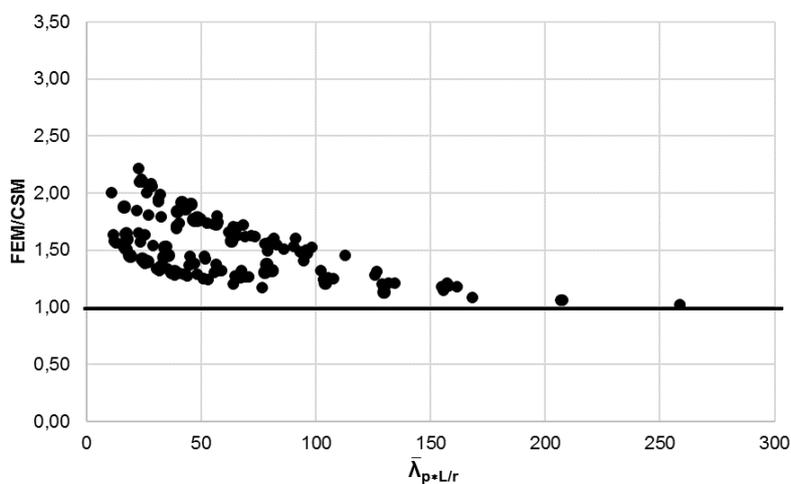
A partir de uma análise preliminar desses resultados, em conjunto com o conhecimento do método de dimensionamento foi definida uma análise mais detalhada para os resultados em função do valor de  $\bar{\lambda}_p$  sendo separados em três intervalos: perfis com  $\bar{\lambda}_p$  menor que 0,68; perfis com  $\bar{\lambda}_p$  entre 0,68 e 1; e perfis com  $\bar{\lambda}_p$  maiores do que 1.

O  $\bar{\lambda}_p$  como delimitador foi escolhido por estar diretamente ligado a metodologia de dimensionamento do CSM [21], sendo o valor de 0,68 o limite entre duas fórmulas do cálculo do momento último, como explicado no item 2.3. O valor de 1 foi definido devido as considerações que serão feitas no capítulo sete, ao se apresentar uma proposta para melhoria dos resultados do CSM, além de ser possível ver pelos gráficos que perfis com valores de  $\bar{\lambda}_p$  maiores do que 1 apresentam resultados bons quando comparados aos demais. Desta forma, apresentam-se os resultados dos perfis separados por esses limites da Figura 70 a Figura 73.

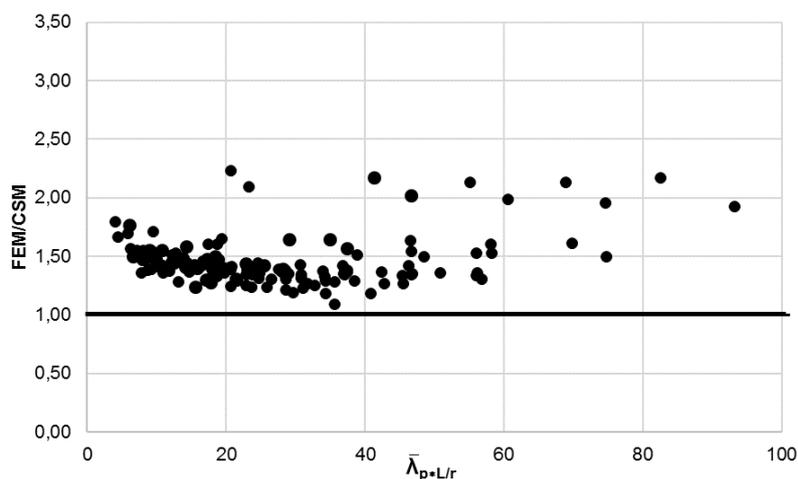
A Tabela 36 apresenta a comparação entre os valores numéricos e os obtidos pelo CSM [21]. A observação desses resultados mostra que, apesar de ainda conservador, os valores obtidos pelo CSM [21] parecem representar melhor o comportamento do perfil C em aço inoxidável, de uma forma geral, quando comparado ao dimensionamento proposto pelo Eurocode. Pode-se ver

que a média geral dos resultados é de 1,52, enquanto a maior média é obtida para os perfis na posição “n” com valores maiores do que 0,68 para  $\bar{\lambda}_p$ , sendo igual a 2,08.

Também se deve reforçar que esse dimensionamento aparenta ser mais eficaz ao se avaliar a variância dos resultados que se mantém em 0,07 para todas as análises e ainda menor do que isso, quando se verificam os perfis agrupados em grupos com  $\bar{\lambda}_p$  semelhantes.

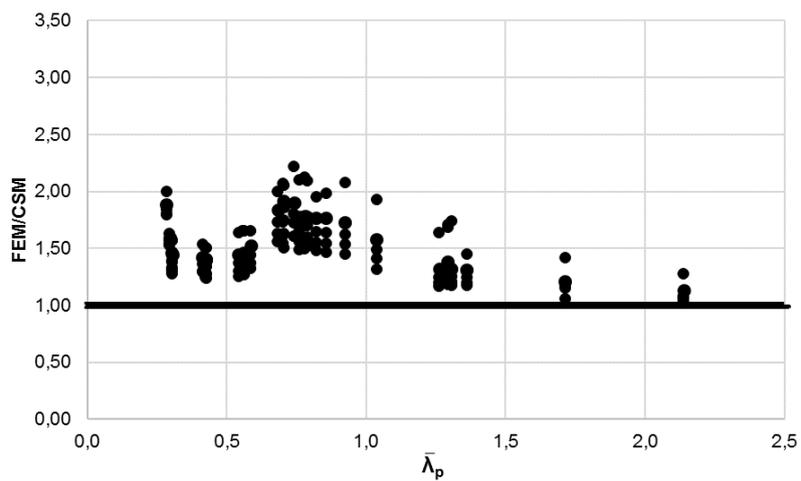


(a) Posição “u”

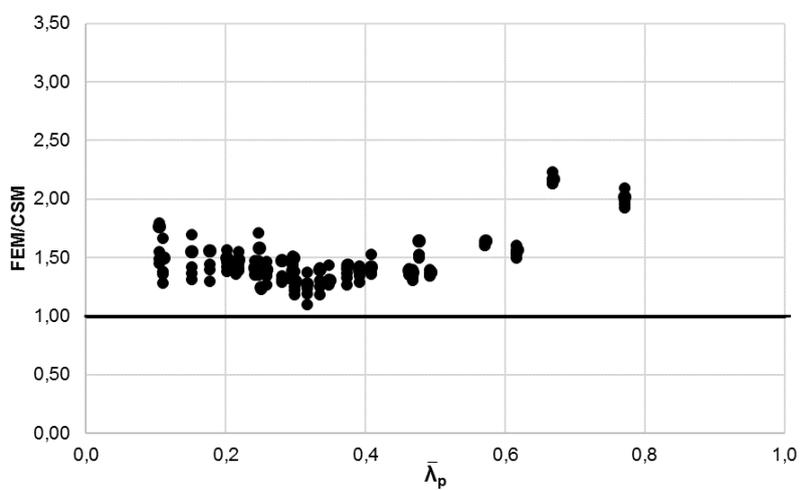


(b) Posição “n”

Figura 68 – Curva FEM/CSM *versus*  $\bar{\lambda}_p * L/r$ .



(a) Posição "u"



(b) Posição "n"

**Figura 69 – Curva FEM/CSM versus  $\bar{\lambda}_p$ .**

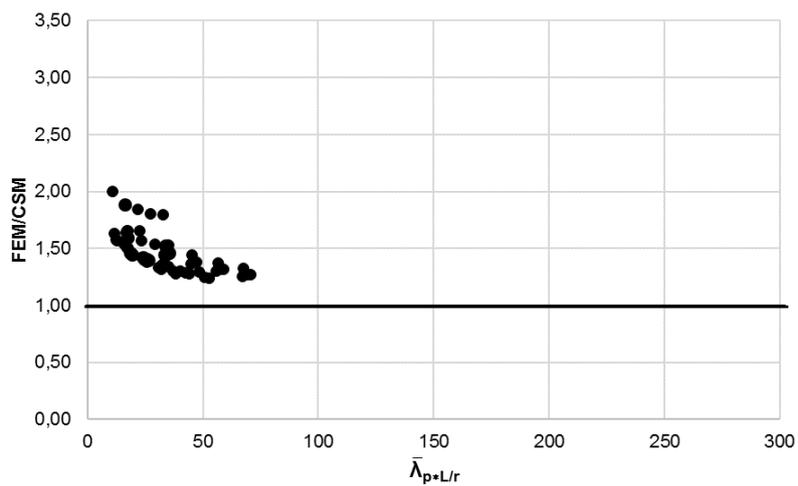
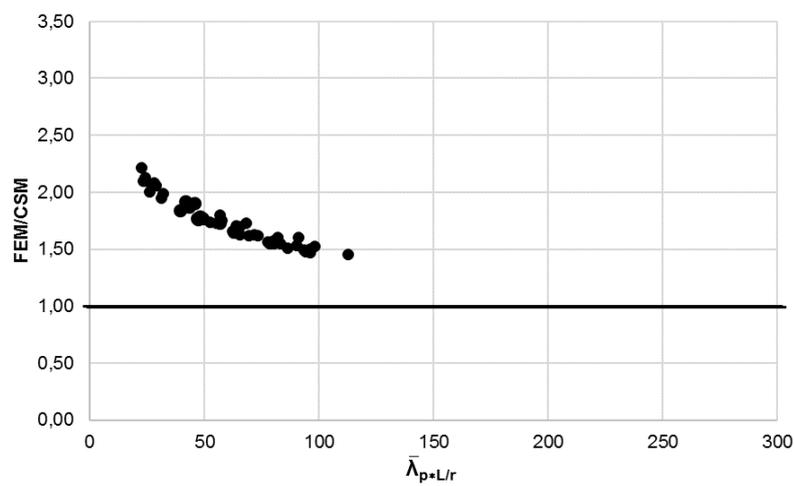
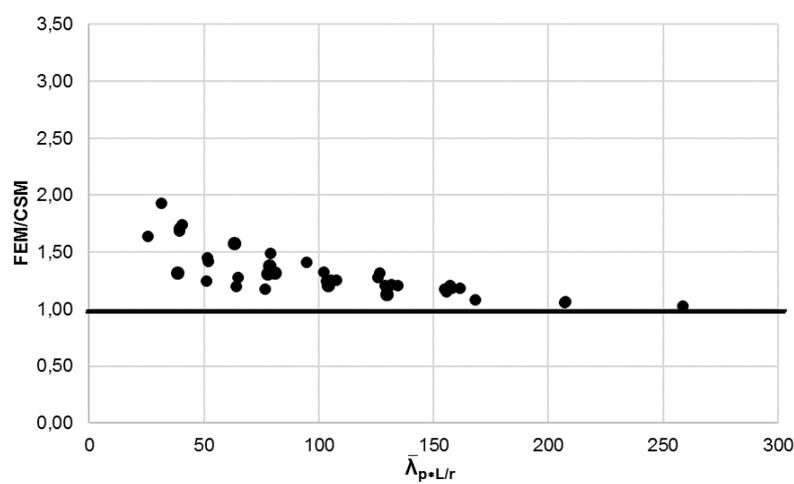
(a)  $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ (b)  $0,68 < \bar{\lambda}_p \leq 1$ (c)  $\bar{\lambda}_p > 1$ 

Figura 70 – Curva FEM/CSM *versus*  $\bar{\lambda}_p * L/r$  – Posição "u" - separado por  $\bar{\lambda}_p$ .

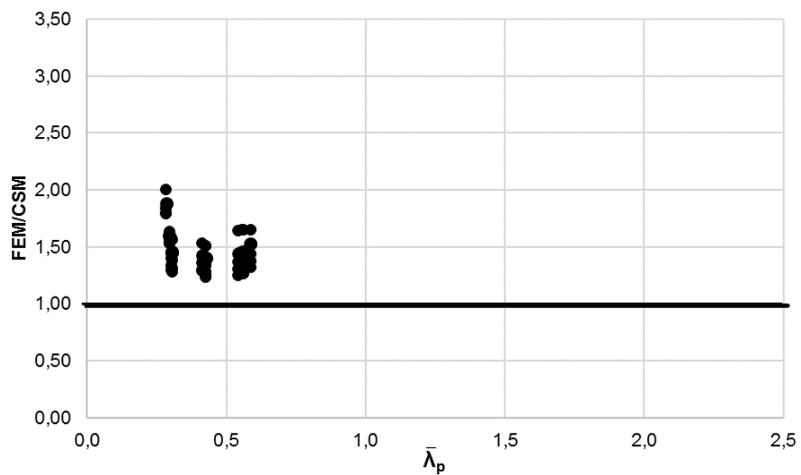
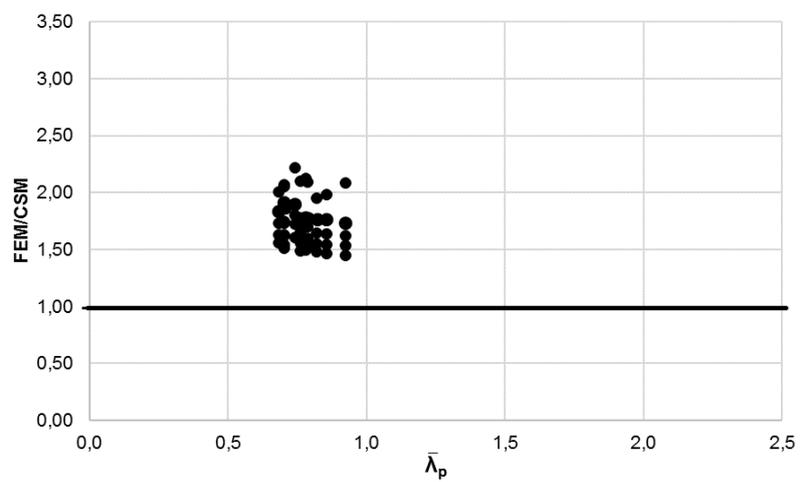
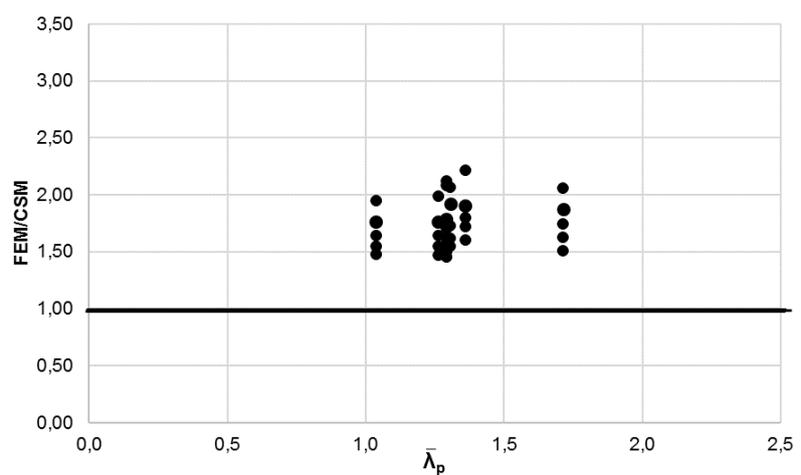
(a)  $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ (b)  $0,68 < \bar{\lambda}_p \leq 1$ (c)  $\bar{\lambda}_p > 1$ 

Figura 71– Curva FEM/CSM *versus*  $\bar{\lambda}_p$ – Posição "u" - separado por  $\bar{\lambda}_p$ .

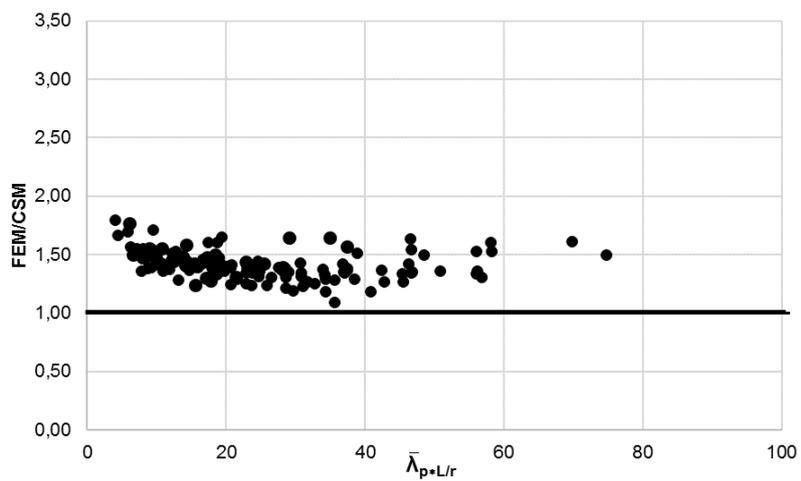
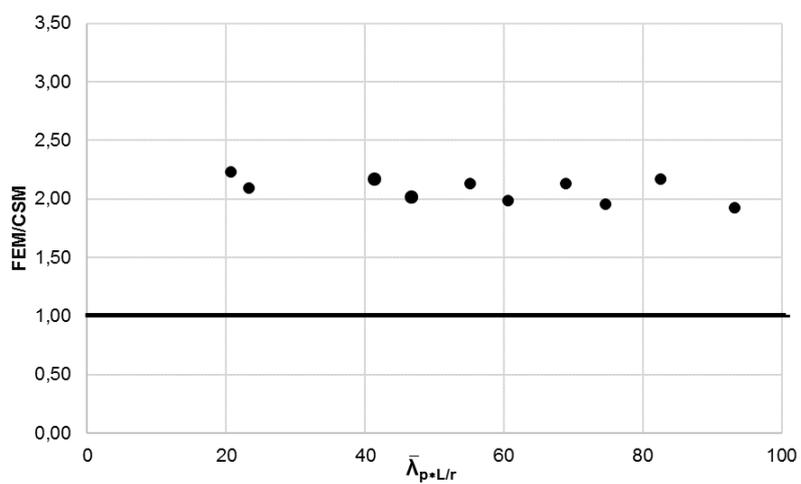
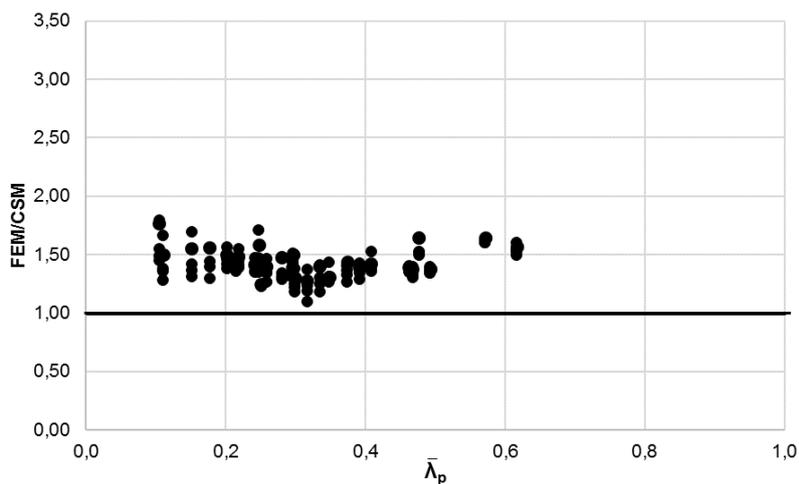
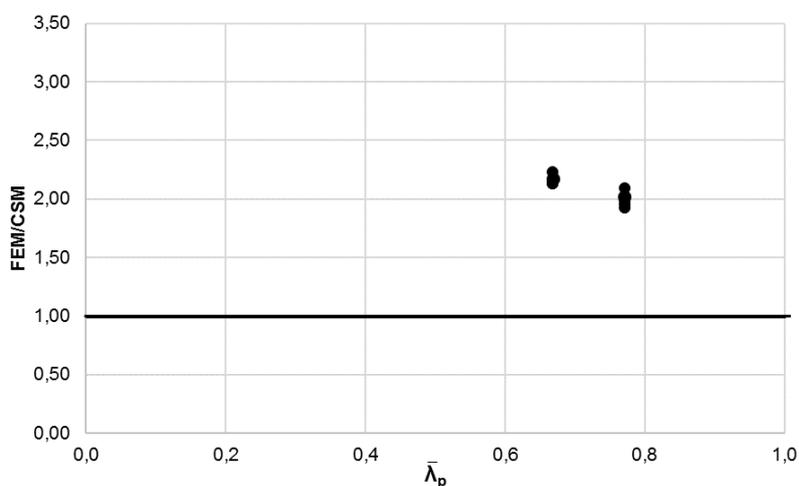
(a)  $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ (b)  $0,68 < \bar{\lambda}_p$ 

Figura 72– Curva FEM/CSM *versus*  $\bar{\lambda}_p * L/r$  – Posição n - Separado por  $\bar{\lambda}_p$ .

(a)  $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ (b)  $0,68 < \bar{\lambda}_p$ **Figura 73– Curva FEM/CSM versus  $\bar{\lambda}_p$  – posição "n" - separado por  $\bar{\lambda}_p$ .**

Além disso, destaca-se a diferença dos resultados para variação das fórmulas propostas, vistas na Equação (14) e na Equação (15) no capítulo dois, onde para a posição "n", têm-se uma análise mais clara. Assim, observa-se que a primeira fórmula gera uma média dos resultados de 1,41 a segunda gera uma média de 2,08, 47,5% maior do que a primeira.

**Tabela 36 – Análises dos resultados para a comparação numérica e do CSM.**

| Posição                | "u"   |                             |                                 |                       | "n"   |                             |                                 |                       |
|------------------------|-------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------|-------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------|
|                        | Todos | $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ | $0,68 < \bar{\lambda}_p \leq 1$ | $1 < \bar{\lambda}_p$ | Todas | $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ | $0,68 < \bar{\lambda}_p \leq 1$ | $1 < \bar{\lambda}_p$ |
| Média FEM/CSM          | 1,52  | 1,46                        | 1,74                            | 1,31                  | 1,46  | 1,41                        | 2,08                            | -                     |
| Variância FEM/CSM      | 0,07  | 0,03                        | 0,04                            | 0,04                  | 0,04  | 0,02                        | 0,01                            | -                     |
| Desvio Padrão FEM/CSM  | 0,26  | 0,17                        | 0,20                            | 0,20                  | 0,21  | 0,14                        | 0,10                            | -                     |
| Valor Máximo - FEM/CSM | 2,22  | 2,00                        | 2,22                            | 1,93                  | 2,23  | 1,79                        | 2,23                            | -                     |
| Valor Mínimo - FEM/CSM | 1,03  | 1,24                        | 1,45                            | 1,03                  | 1,09  | 1,09                        | 1,93                            | -                     |

## 7 PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO

Após análise dos resultados apresentados no capítulo seis, é possível verificar que os procedimentos de dimensionamento analisados não apresentaram respostas precisas para a maioria dos perfis estudados, resultando no superdimensionamento das seções transversais. Portanto, nesta seção serão apresentadas algumas propostas de alterações que possam diminuir essa imprecisão dos resultados, garantindo dimensionamentos mais econômicos.

### 7.1 Eurocode 3

O dimensionamento proposto pelo Eurocode 3 – parte 1.4 [17] possui algumas divergências, tanto é que hoje em dia há uma nova série de propostas para dimensionamento de estruturas de aço inoxidável, dentre eles o CSM [21], também estudado neste trabalho.

Vale ressaltar que os dimensionamentos para as classes 1 e 2 demonstraram-se sempre muito mais precisos em comparação as demais classes, especialmente quando comparados a classe 4. O problema específico da classe 4 é que se trata de uma proposta baseada em áreas efetivas, considerando apenas uma fração das medidas geométricas da seção transversal para o cálculo da resistência. O que pode ser eficaz para a utilização em seções de aço carbono, mas tem se mostrado pouco preciso no aço inoxidável.

#### 7.1.1 Alteração na tensão de escoamento ( $f_{0,2}$ )

Uma primeira alternativa para alteração dos resultados foi a reavaliação do valor da tensão de escoamento utilizada no dimensionamento. Como

explicado no item 1.2, a tensão de escoamento do aço inoxidável é somente estimada e não é tão clara quanto à do aço carbono, não apresentando um patamar de escoamento na curva tensão *versus* deformação.

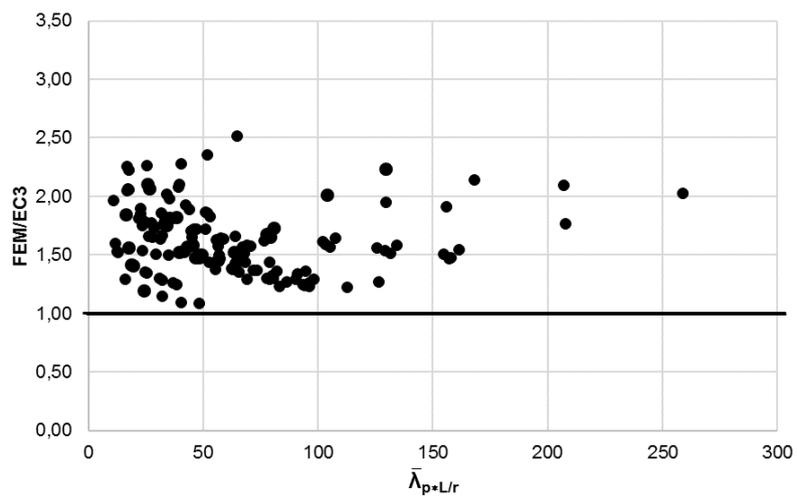
Desta forma, uma reavaliação deste item pode resultar em um melhor dimensionamento além de, ao aumentar a resistência, garantir uma realidade mais próxima do ganho de resistência que o aço inoxidável apresenta, devido ao encruamento que ocorre neste material.

Buscando-se o melhor resultado, foram feitas várias tentativas de alteração do valor da tensão de escoamento, sendo feitas alternativas que gerassem aumento igual para toda seção transversal e também diferentes, dependendo do elemento solicitado. Foram testados aumentos gerais de 10%, 15%, 20%, 25% e 30%, e também aumento localizado nas regiões tracionadas de 20% a 40%, chegando por fim, à conclusão que uma ampliação de 25% desta grandeza para toda a seção transversal mostra os resultados mais satisfatórios para alteração do dimensionamento teórico.

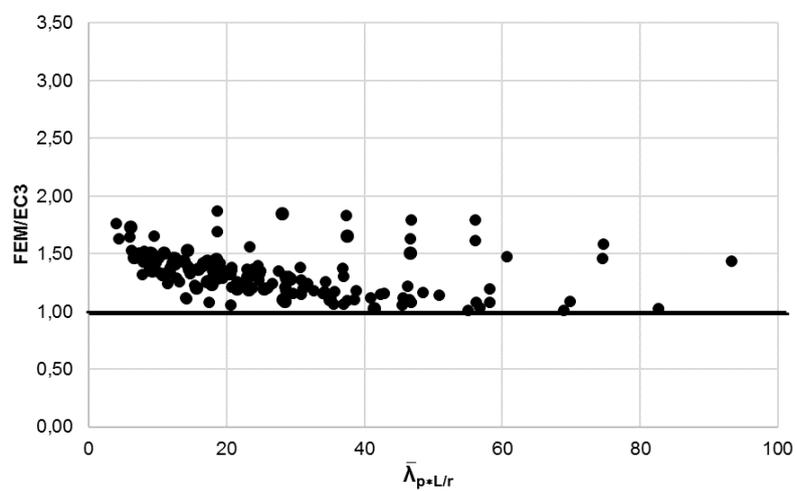
Os resultados alterados podem ser verificados na Figura 74 e na Figura 75. A Figura 76 e a Figura 77 trazem os resultados separados por classes para a posição “u”, e a Figura 78 e a Figura 79 apresentam os resultados para a posição “n”. A Tabela 37 traz os resultados novos para essas propostas. A Tabela 38 e a Tabela 39 trazem as comparações entre esses resultados e os resultados base para a posição “u” e “n”, respectivamente.

Para ambas as posições dos perfis as alterações propostas resultaram em uma melhora de resultado em torno de 18,5% quando analisada a média geral dos resultados. Para a posição “u”, esse valor foi de 17,1% para as classes 1 e 2 e 19,2% e 20,2% para a classe 3 e 4, respectivamente.

Para os perfis na posição “n” vale reparar que os valores de  $\bar{\lambda}_p$  e  $\bar{\lambda}_p * L/r$  para os perfis classes 1 e 2 e perfis classe 3 variaram quando comparados aos resultados base. Isso ocorreu porque nessa posição de análise houve alteração na classe de um perfil, onde este passou da classe 2 para classe 3, modificando essas médias. Quanto a alteração no dimensionamento desses perfis FEM/EC3 houve uma melhora de 19,4% para os classe 1 e 2 e os da classe 3 tiveram uma melhora de 15,4%.

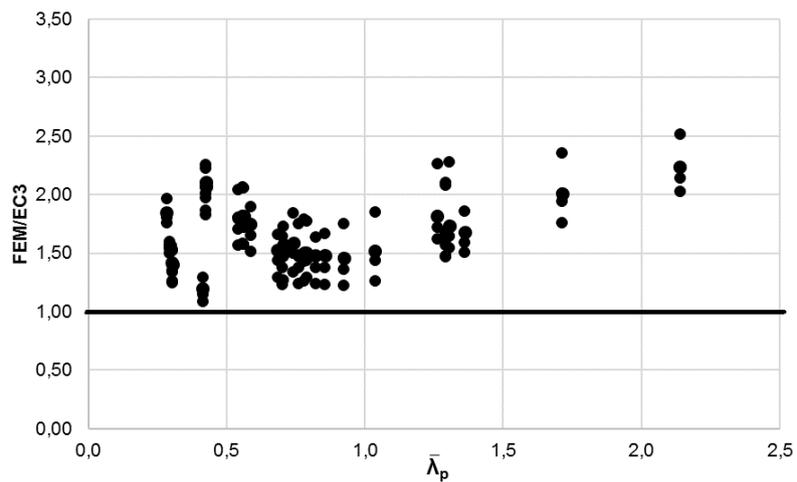


(a) Posição "u"

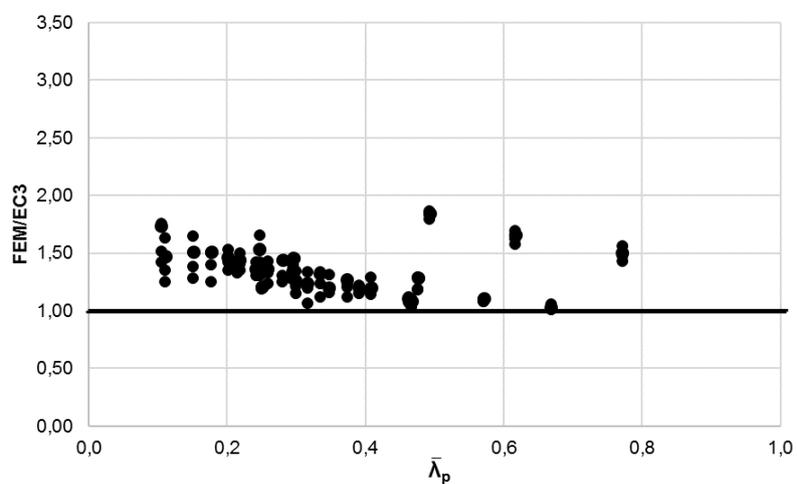


(b) Posição "n"

**Figura 74– Curva  $FEM/EC3$  versus  $\bar{\lambda}_p * L/r$  para a proposta.**

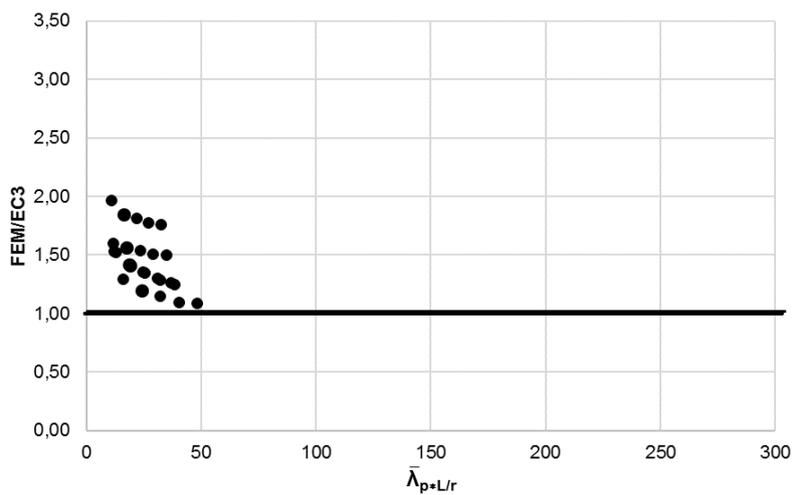


(a) Posição "u"

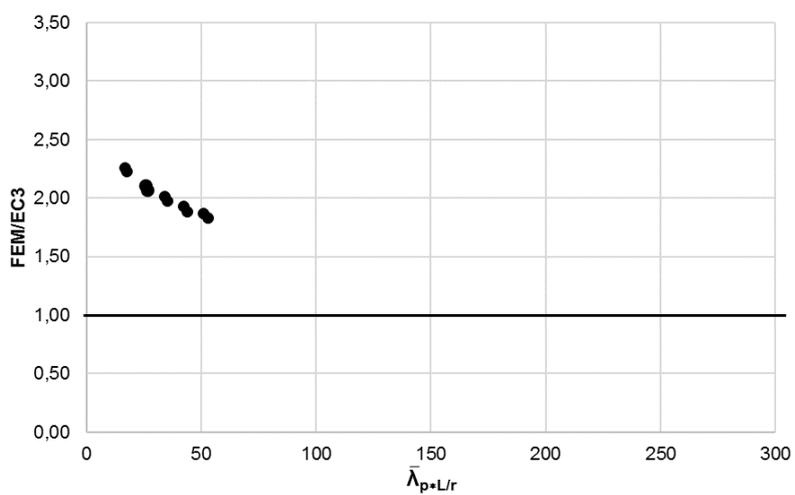


(b) Posição "n"

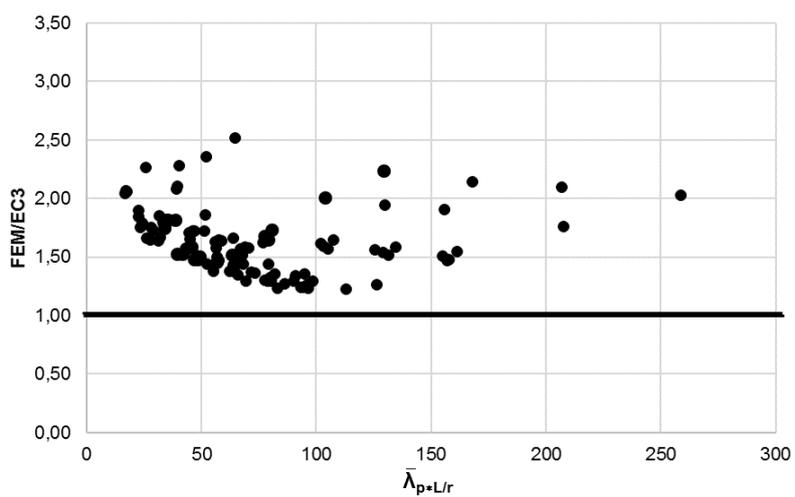
**Figura 75 – Curva  $FEM/EC3$  versus  $\bar{\lambda}_p$  para a proposta.**



(a) Classe 1 e 2

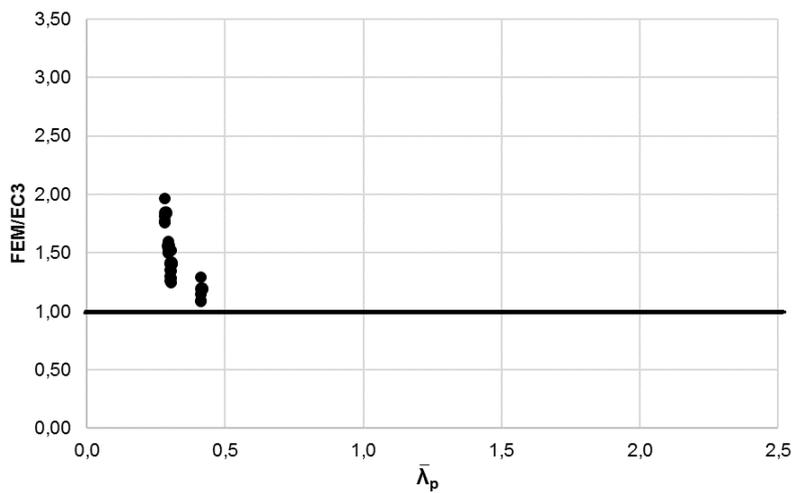


(b) Classe 3

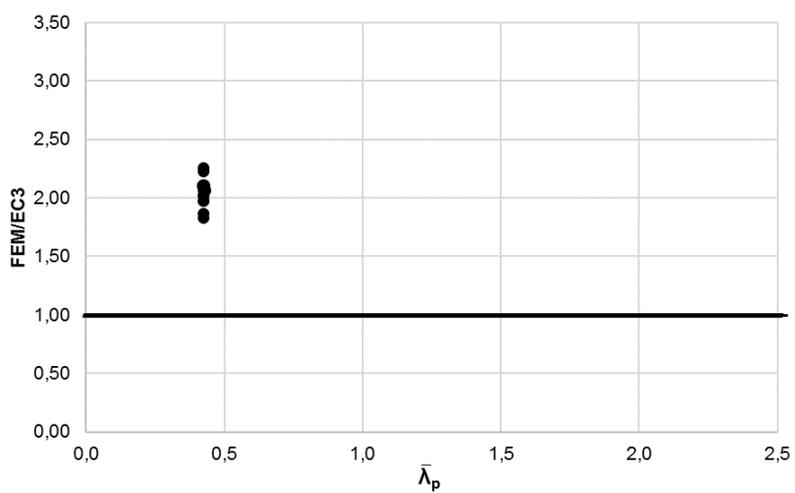


(c) Classe 4

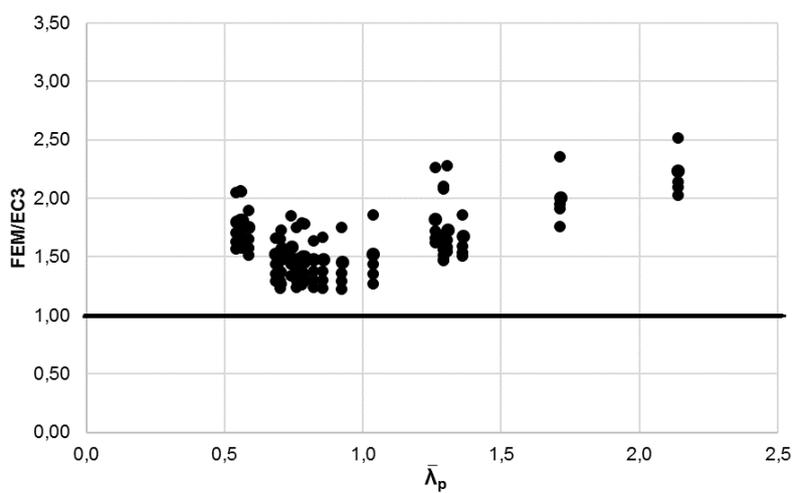
**Figura 76 – Curva FEM/EC3 versus  $\bar{\lambda}_{p+L/r}$  – Posição "u" - separado por classes para a proposta.**



(a) Classe 1 e 2

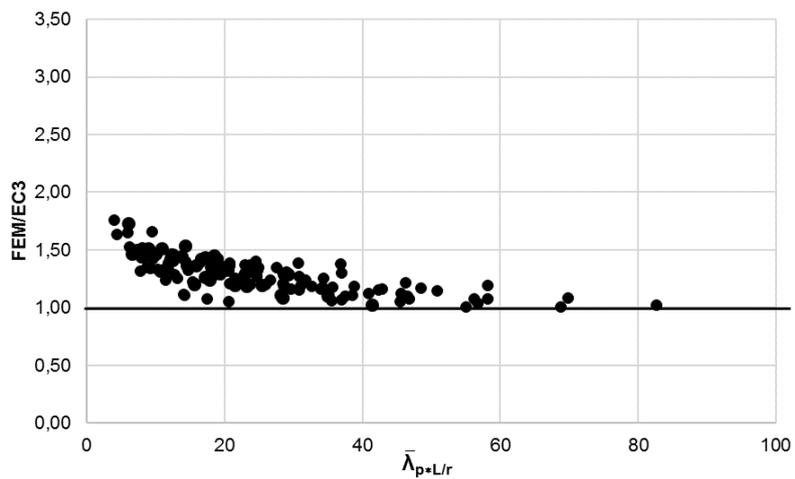


(b) Classe 3

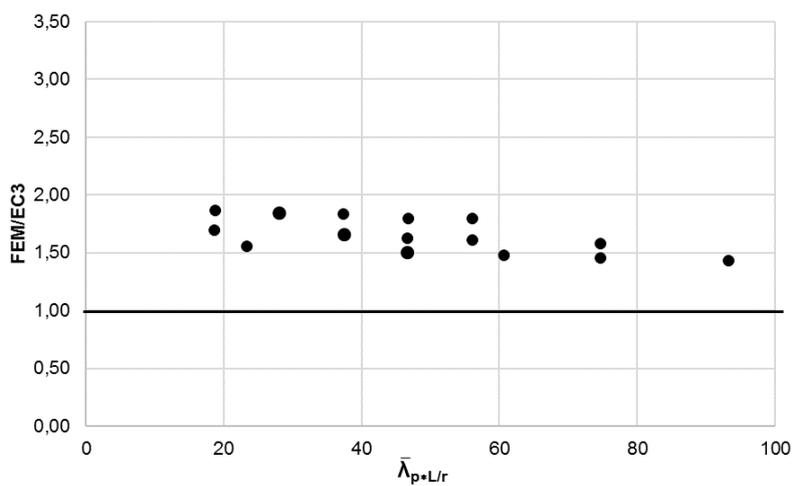


(c) Classe 4

Figura 77 – Curva FEM/EC3 versus  $\bar{\lambda}_p$  – Posição "u" - separado por classes para a proposta.

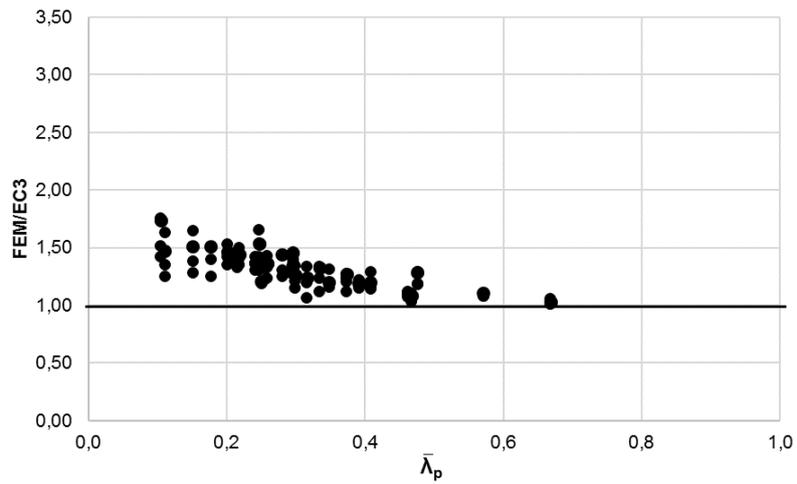


(a) Classe 1 e 2

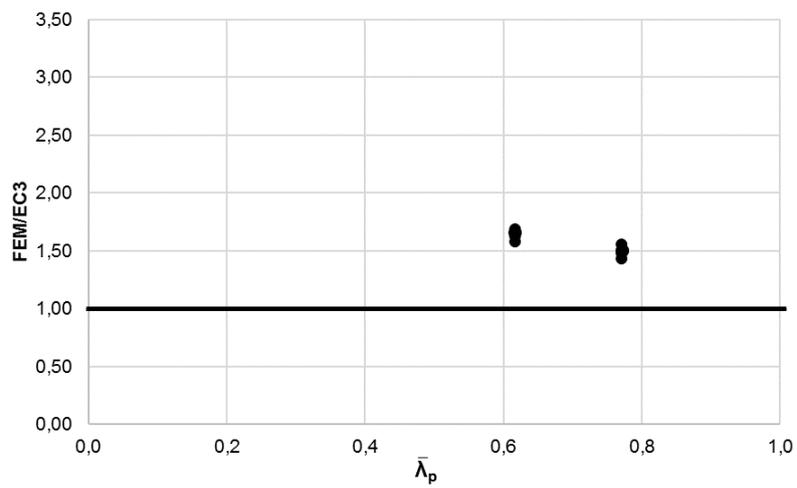


(b) Classe 3

**Figura 78 – Curva FEM/EC3 versus  $\bar{\lambda}_p * L/r$  – Posição "n" - separado por classes para a proposta.**



(a) Classe 1 e 2



(b) Classe 3

**Figura 79 – Curva FEM/EC3 versus  $\bar{\lambda}_p$ – Posição "n" - separado por classes para a proposta.**

**Tabela 37 – Análises dos resultados para a comparação numérica e do Eurocode para a proposta.**

| Posição                | "u"   |       |      |      | "n"   |       |      |   |
|------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|---|
|                        | Todas | 1 e 2 | 3    | 4    | Todas | 1 e 2 | 3    | 4 |
| Média FEM/EC3          | 1,62  | 1,45  | 2,02 | 1,62 | 1,32  | 1,29  | 1,65 | - |
| Variância FEM/EC3      | 0,08  | 0,06  | 0,02 | 0,08 | 0,04  | 0,02  | 0,02 | - |
| Desvio Padrão FEM/EC3  | 0,29  | 0,24  | 0,14 | 0,28 | 0,19  | 0,14  | 0,14 | - |
| Valor Máximo - FEM/EC3 | 2,52  | 1,97  | 2,26 | 2,52 | 1,87  | 1,76  | 1,87 | - |
| Valor Mínimo - FEM/EC3 | 1,09  | 1,09  | 1,83 | 1,22 | 1,01  | 1,01  | 1,43 | - |

**Tabela 38 – Comparação dos resultados base e da proposta para a posição "u".**

| Posição                | "u"   |          |       |          |      |          |      |          |
|------------------------|-------|----------|-------|----------|------|----------|------|----------|
|                        | Todas |          | 1 e 2 |          | 3    |          | 4    |          |
| Dados                  | Base  | Alterado | Base  | Alterado | Base | Alterado | Base | Alterado |
| Média FEM/EC3          | 1,99  | 1,62     | 1,75  | 1,45     | 2,50 | 2,02     | 2,03 | 1,62     |
| Variância FEM/EC3      | 0,13  | 0,08     | 0,10  | 0,06     | 0,04 | 0,02     | 0,12 | 0,08     |
| Desvio Padrão FEM/EC3  | 0,36  | 0,29     | 0,32  | 0,24     | 0,20 | 0,14     | 0,35 | 0,28     |
| Valor Máximo - FEM/EC3 | 3,15  | 2,52     | 2,46  | 1,97     | 2,78 | 2,26     | 3,15 | 2,52     |
| Valor Mínimo - FEM/EC3 | 1,29  | 1,09     | 1,29  | 1,09     | 2,29 | 1,83     | 1,53 | 1,22     |

**Tabela 39 – Comparação dos resultados base e da proposta para a posição n.**

| Posição                   | n     |          |       |          |      |          |
|---------------------------|-------|----------|-------|----------|------|----------|
|                           | Todas |          | 1 e 2 |          | 3    |          |
| Dados                     | Base  | Alterado | Base  | Alterado | Base | Alterado |
| Média<br>FEM/EC3          | 1,62  | 1,32     | 1,60  | 1,29     | 1,95 | 1,65     |
| Variância<br>FEM/EC3      | 0,05  | 0,04     | 0,04  | 0,02     | 0,01 | 0,02     |
| Desvio Padrão<br>FEM/EC3  | 0,21  | 0,19     | 0,20  | 0,14     | 0,10 | 0,14     |
| Valor Máximo -<br>FEM/EC3 | 2,20  | 1,87     | 2,20  | 1,76     | 2,12 | 1,87     |
| Valor Mínimo -<br>FEM/EC3 | 1,26  | 1,01     | 1,26  | 1,01     | 1,79 | 1,43     |

Desta forma observa-se que os resultados que antes apresentavam um erro de 99% para a posição “u” e 62% para a posição “n”, passaram a apresentar erros de 62% e 32% para as posições “u” e “n”, respectivamente.

#### 7.1.2 Alteração do momento efetivo da classe 3

A classificação dos perfis segundo o Eurocode 3 – parte 1.4 [17] dá-se pela avaliação da relação comprimento-espessura ( $c/t$ ) dos elementos da seção transversal. Uma vez classificados, os perfis são dimensionados de maneiras diferentes de acordo com a classe.

Os perfis classe 3 apresentam dimensionamentos muito semelhantes aos perfis classe 1 e 2, sendo a única diferença a utilização do momento resistente elástico para cálculo da resistência da seção transversal em vez de momento plástico. Esse padrão, entretanto, gera uma queda muito brusca de resistência para perfis com seção transversal que se encontram numa faixa  $c/t$  próxima ao limite entre classe 2 e 3 quando comparados aos perfis classe 2.

Devido a isso, Knobloch et al. [39] propôs uma alteração para o momento utilizado no dimensionamento dos perfis da classe 3, de forma que a redução do momento, que era momento plástico na classe 2, até o momento elástico, acontece de forma gradativa de acordo com o posicionamento da relação  $c/t$  do elemento dentro do domínio da classe 3, como pode ser visto na Figura 80. Os resultados, ao se utilizar esta proposta, são alterados apenas na classe 3 e podem ser vistos na Figura 81 e na Figura 82 e na Tabela 40. Na Tabela 41 é realizada a comparação dos novos resultados com os resultados vistos no capítulo seis, destacando-se que diferente da Tabela 39, esta não mostra os valores de  $\bar{\lambda}_p$  e  $\bar{\lambda}_p * L/r$  pois não há nenhuma alteração desses valores e nas suas conseqüentes médias, e assim não há alteração de classe de nenhuma seção transversal.

Desta forma pode-se notar uma grande melhora dos resultados para os perfis classe 3, tendo uma redução de 42,8% para a posição “u” e de 35,4% para a posição “n”. O resultado da média de uma forma geral não tem tanta alteração, 2,0% e 3,1% para as posições “u” e “n”, respectivamente, o que era esperado uma vez que essa alteração é pontual para os perfis classe 3 e é possível notar que os perfis são em sua maioria classe 1 e 2 na posição “n” e classe 4 na posição “u”.

**Tabela 40 – Análises dos resultados para a comparação numérica e do Eurocode para a proposta.**

| Posição                | "u"   |       |      |      | "n"   |       |      |   |
|------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|---|
|                        | Todas | 1 e 2 | 3    | 4    | Todas | 1 e 2 | 3    | 4 |
| Média FEM/EC3          | 1,95  | 1,75  | 1,43 | 2,03 | 1,57  | 1,60  | 1,26 | - |
| Variância FEM/EC3      | 0,13  | 0,10  | 0,01 | 0,12 | 0,04  | 0,04  | 0,00 | - |
| Desvio Padrão FEM/EC3  | 0,36  | 0,32  | 0,10 | 0,35 | 0,20  | 0,20  | 0,00 | - |
| Valor Máximo - FEM/EC3 | 3,15  | 2,46  | 1,59 | 3,15 | 2,20  | 2,20  | 1,34 | - |
| Valor Mínimo - FEM/EC3 | 1,29  | 1,29  | 1,31 | 1,53 | 1,19  | 1,26  | 1,19 | - |

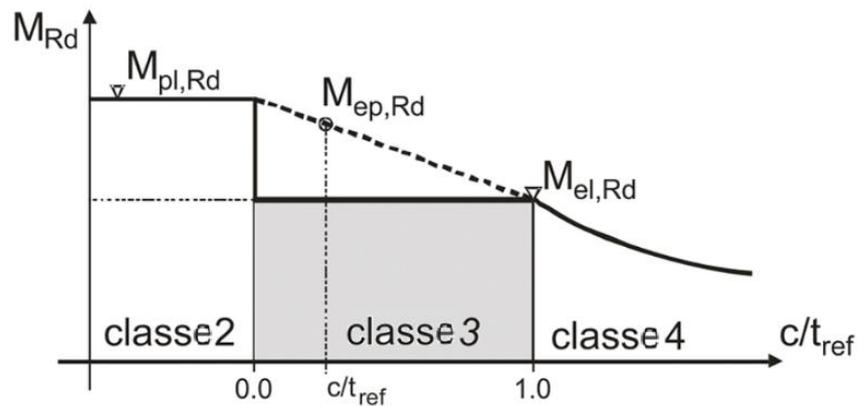
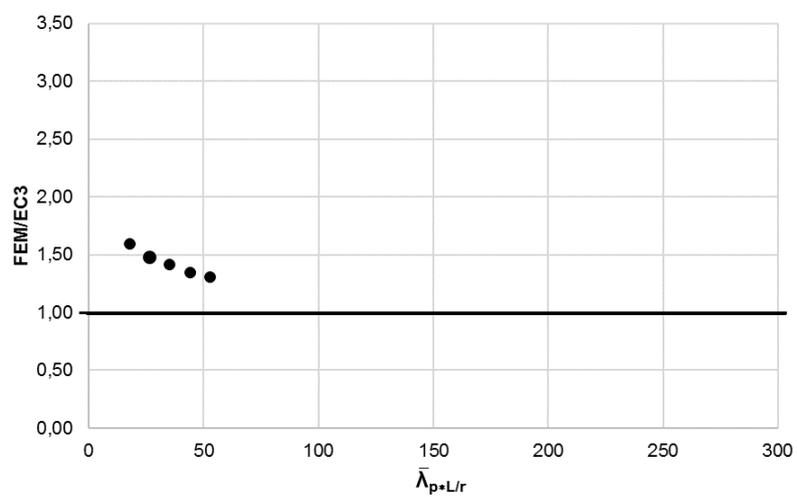
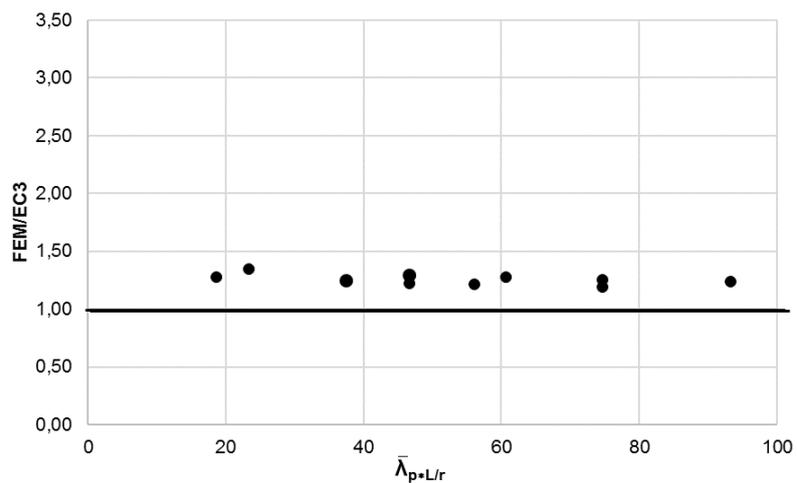


Figura 80 – Proposta para momento efetivo da Classe 3 (Adaptado de [39]).

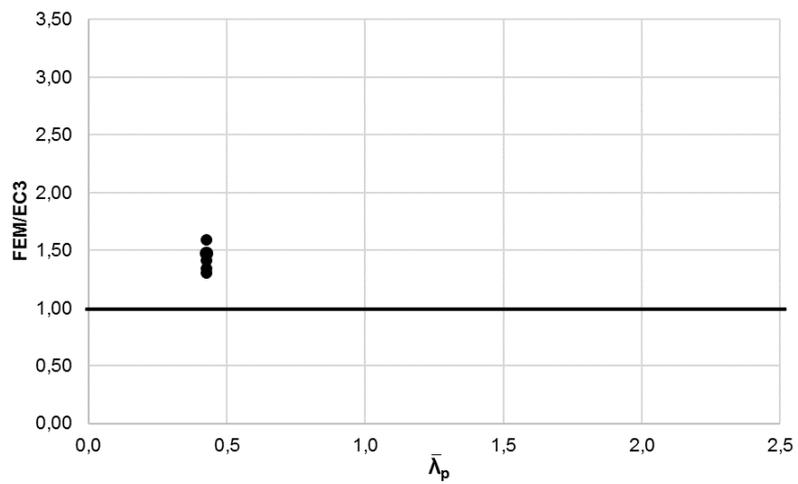


(a) Posição "u"

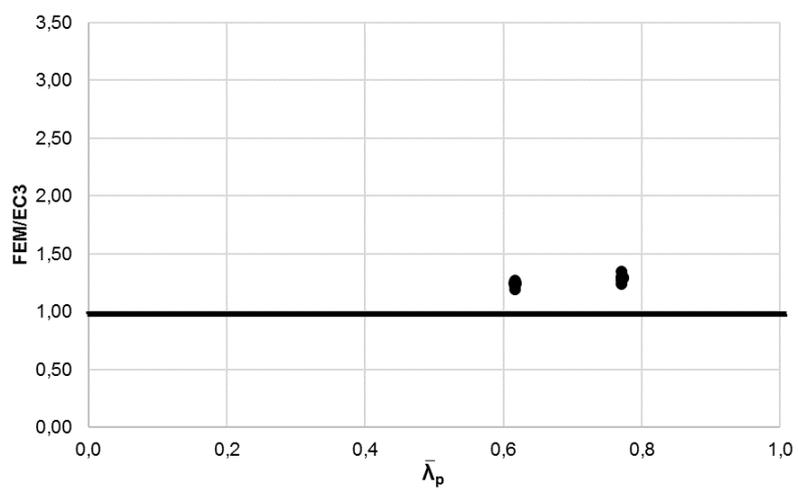


(b) Posição "n"

Figura 81– Curva  $FEM/EC3$  versus  $\bar{\lambda}_p \cdot L/r$  – para a proposta da classe 3.



(a) Posição "u"



(b) Posição "n"

**Figura 82 – Curva FEM/EC3 versus  $\bar{\lambda}_p$  – para a proposta da classe 3.**

**Tabela 41 – Comparação dos resultados base e da proposta.**

| Posição                | "u"   |          |      |          | "n"   |          |      |          |
|------------------------|-------|----------|------|----------|-------|----------|------|----------|
|                        | Todas |          | 3    |          | Todas |          | 3    |          |
| Dados                  | Base  | Alterado | Base | Alterado | Base  | Alterado | Base | Alterado |
| Média FEM/EC3          | 1,99  | 1,95     | 2,50 | 1,43     | 1,62  | 1,57     | 1,95 | 1,26     |
| Variância FEM/EC3      | 0,13  | 0,13     | 0,04 | 0,01     | 0,05  | 0,04     | 0,01 | 0,00     |
| Desvio Padrão FEM/EC3  | 0,36  | 0,32     | 0,20 | 0,10     | 0,21  | 0,20     | 0,10 | 0,00     |
| Valor Máximo - FEM/EC3 | 3,15  | 3,15     | 2,78 | 1,59     | 2,20  | 2,20     | 2,12 | 1,34     |
| Valor Mínimo - FEM/EC3 | 1,29  | 1,29     | 2,29 | 1,31     | 1,26  | 1,19     | 1,79 | 1,19     |

O erro apresentado pelo dimensionamento do Eurocode 3 – parte 1.4 [17] altera-se de 150% para 43% para a posição “u” e 95% para 26% para a posição “n”, analisando apenas os perfis afetados por essa proposta.

#### 7.1.3 Alteração do dimensionamento da classe 4

Assim como a proposta anterior, a modificação de dimensionamento da classe 4 visa a melhor precisão dos resultados dessa faixa que é determinada após a classificação feita pela avaliação da relação comprimento-espessura ( $c/t$ ) dos elementos da seção transversal. Os perfis classe 4 apresentam dimensionamento muito semelhantes aos perfis classe 1 e 2, sendo o ponto diferencial, a necessidade da determinação de uma área efetiva para a seção transversal. Essa área efetiva é calculada segundo as preposições do Eurocode 3 – parte 1.4 [17] e do Eurocode 3 – parte 1.5 [29] onde a redução da

seção transversal é baseada em diversos fatores, como explicado no capítulo dois. Uma destas etapas é a esbelteza normalizada  $\bar{\lambda}_p$  que determina os limites para o fator de redução  $\rho$ .

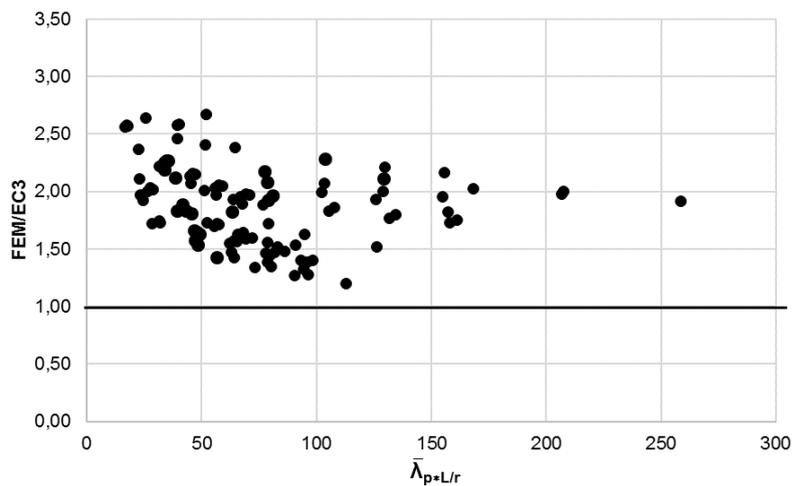
Para este estudo, a equação usada para calcular  $\rho$  é a considerada para os elementos externos formadas a frio, descrita na Equação (5). Nessa equação pode-se perceber que para valores inferiores a  $\bar{\lambda}_p = 0,638$  não se tem redução para os perfis classe 4, sendo  $\rho=1$ . Dessa forma, propõe-se uma alteração desse limite, uma vez que ele é baseado na esbelteza da seção transversal, não havendo ainda estudos suficientes para reforçar sua adequação também para perfis de aço inoxidável.

O limite escolhido para essa proposta é feito a partir das análises dos gráficos dos resultados da posição “u” para perfis classe 4, além da análise dos resultados do CSM [21]. Para ambos os casos, é possível notar que o ponto de transição de  $\bar{\lambda}_p$  igual a 1 parece ter significância na avaliação da precisão dos resultados de resistência do perfil de interesse deste trabalho, como também será destacado no item 7.2. Desta forma, a Equação (5) será alterada de forma a atender esse limite, resultando na Equação (18). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 83 e na Figura 84, bem como na Tabela 42 e na Tabela 43.

Para elementos externos formados a frio:

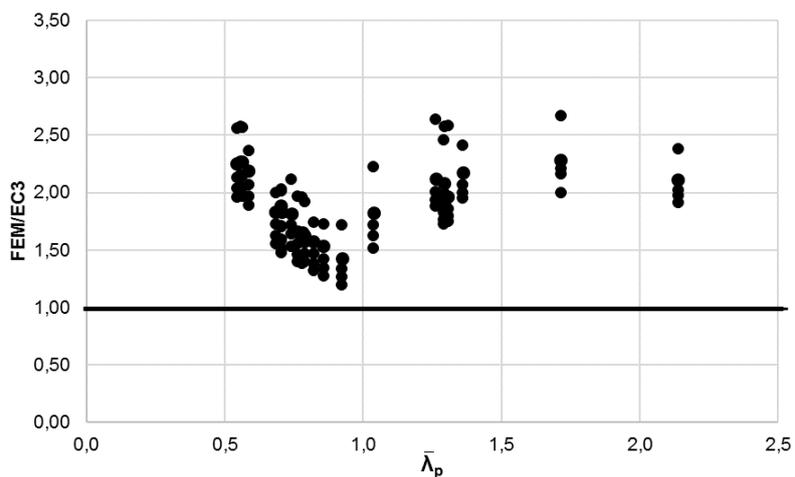
$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0}{\bar{\lambda}_p} \leq 1 \leftrightarrow \rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \leq 1 \quad (18)$$

É possível observar que para perfis da classe 4 houve uma melhora nos resultados de 7,9%, de 2,03 para 1,87. O resultado da média geral não teve alteração significativa, apenas 6% para a posição “u”, o que era esperado uma vez que essa proposta, assim como a proposta do item 7.1.2 é pontual para os perfis de apenas uma classe, neste caso os perfis classe 4. O erro apresentado pelo dimensionamento do Eurocode 3 – parte 1.4 [17] altera-se de 99% para 87% para a posição “u”.



Posição "u"

Figura 83 – Curva  $FEM/EC3$  versus  $\bar{\lambda}_p \cdot L/r$  – para a proposta da classe 4.



Posição "u"

Figura 84 – Curva  $FEM/EC3$  versus  $\bar{\lambda}_p$  – para a proposta da classe 4.

**Tabela 42 – Análises dos resultados para a comparação numérica e do Eurocode para a proposta de dimensionamento.**

| Posição                | "u"   |       |      |      | "n"   |       |      |   |
|------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|---|
|                        | Todas | 1 e 2 | 3    | 4    | Todas | 1 e 2 | 3    | 4 |
| Média FEM/EC3          | 1,87  | 1,75  | 2,50 | 1,87 | 1,62  | 1,60  | 1,95 | - |
| Variância FEM/EC3      | 0,13  | 0,10  | 0,04 | 0,12 | 0,05  | 0,04  | 0,01 | - |
| Desvio Padrão FEM/EC3  | 0,36  | 0,32  | 0,20 | 0,35 | 0,21  | 0,20  | 0,10 | - |
| Valor Máximo - FEM/EC3 | 2,78  | 2,46  | 2,78 | 2,67 | 2,20  | 2,20  | 2,12 | - |
| Valor Mínimo - FEM/EC3 | 1,20  | 1,29  | 2,29 | 1,20 | 1,26  | 1,26  | 1,79 | - |

**Tabela 43 – Comparação dos resultados base e da proposta.**

| Posição                | "u"   |          |      |          |
|------------------------|-------|----------|------|----------|
|                        | Todas |          | 4    |          |
| Dados                  | Base  | Alterado | Base | Alterado |
| Média FEM/EC3          | 1,99  | 1,87     | 2,03 | 1,87     |
| Variância FEM/EC3      | 0,13  | 0,13     | 0,12 | 0,12     |
| Desvio Padrão FEM/EC3  | 0,36  | 0,36     | 0,35 | 0,35     |
| Valor Máximo - FEM/EC3 | 3,15  | 2,67     | 3,15 | 2,67     |
| Valor Mínimo - FEM/EC3 | 1,29  | 1,20     | 1,53 | 1,20     |

## 7.2 Método da Resistência Contínua - CSM

Para as comparações envolvendo o dimensionamento do CSM foi feita uma avaliação dos resultados. De uma forma geral, os valores obtidos com a fórmula definida para os perfis com  $\bar{\lambda}_p$  menores que 0,68 apresentaram resultados muito melhores quando comparados aos demais. É possível perceber também que a segunda formulação parece não ser tão adequada para os valores de  $\bar{\lambda}_p$  menores, enquanto para os valores de  $\bar{\lambda}_p$  maiores começam a se aproximar mais de 1, como pode ser verificado no item 6.2.

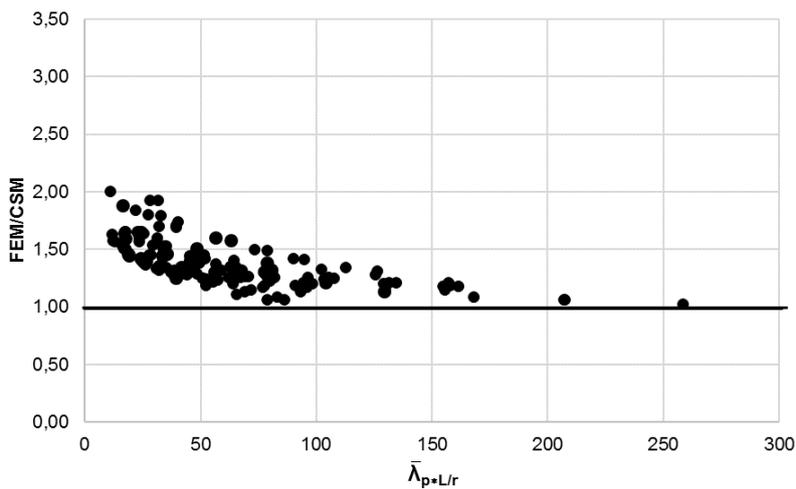
Portanto, buscou-se uma alternativa que alterasse os resultados levando em conta o valor de  $\bar{\lambda}_p$  para a segunda fórmula. Deste modo, assim como na proposta 7.1 para o Eurocode, alterou-se o valor da tensão de escoamento dos perfis de forma inversamente proporcional ao valor de  $\bar{\lambda}_p$ , ou seja, há um incremento maior de resistência para os perfis com valores mais baixos.

Essa proposta resultou em bons resultados, além de uma melhor padronização desses, como pode ser verificado da Figura 85 a Figura 90. Entretanto, para valores maiores do que 1, o valor da tensão de escoamento começa a ser reduzido em vez de aumentado. Como na faixa de valores de  $\bar{\lambda}_p$  maiores que 1 o dimensionamento das seções foi expressivamente mais precisos do que os demais, optou-se por apenas afetar a tensão de escoamento para os perfis entre 0,68 e 1.

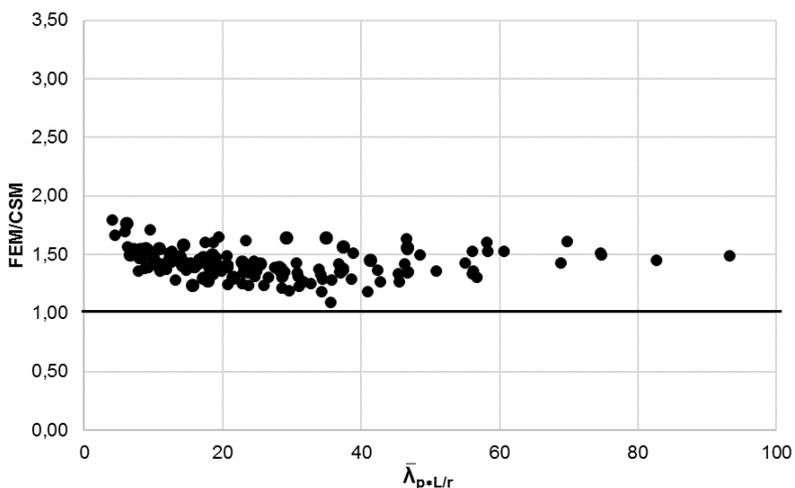
A Tabela 44 apresenta um resumo dos resultados da proposta. Na Tabela 45 observa-se a comparação dos novos resultados obtidos com os resultados base do capítulo anterior, sendo que assim como a Tabela 41, não é repetido os valores de  $\bar{\lambda}_p$  e  $\bar{\lambda}_p * L/r$ , pois não há nenhuma alteração dessas grandezas e nas suas consequentes médias.

Assim como a alteração proposta no item 7.1.2, a mudança realizada neste item afeta apenas uma faixa dos resultados do dimensionamento segundo o CSM [21]. Desta forma, o mais interessante é a avaliação da melhora desta faixa analisada que é de 22,4% para a posição “u” e 28,4% para a posição “n”, trazendo o resultado consideravelmente mais próximo do ideal.

Os resultados do dimensionamento de forma geral tiveram uma redução da média FEM/CSM de 1,52 para 1,38 na posição “u” e de 1,46 para 1,42 na posição “n”, que significa uma melhora de 9,2% e 2,7%, respectivamente. Observou-se também uma redução do erro da proposta de 52% para 38%, considerando os perfis na posição “u”, e 46% para 42%, considerando a posição “n”.

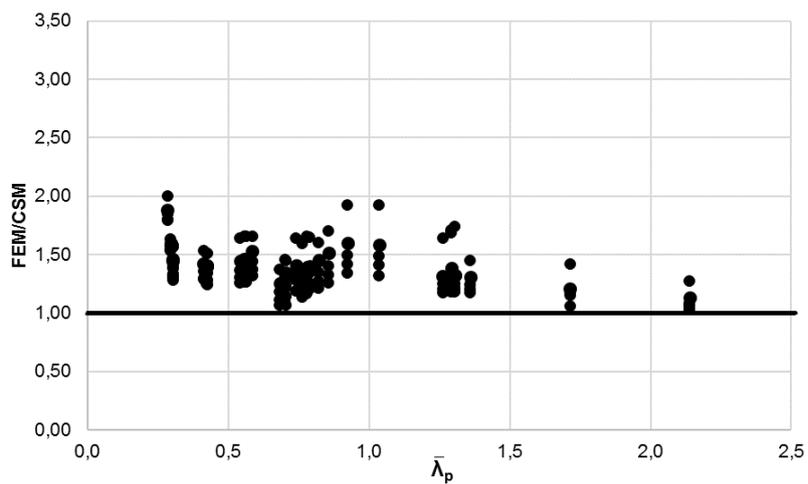


(a) Posição “u”

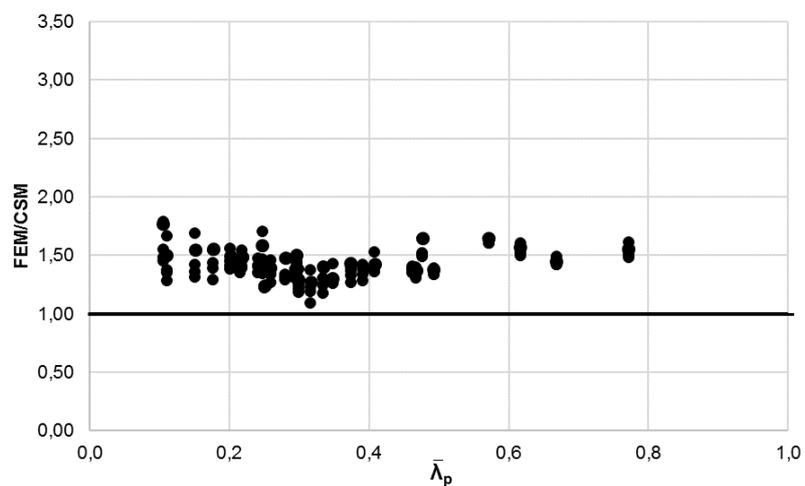


(b) Posição “n”

**Figura 85 – Curva FEM/CSM versus  $\bar{\lambda}_p * L/r$  para a proposta.**



(a) Posição "u"



(b) Posição "n"

**Figura 86 – Curva FEM/CSM *versus*  $\bar{\lambda}_p$  para a proposta.**

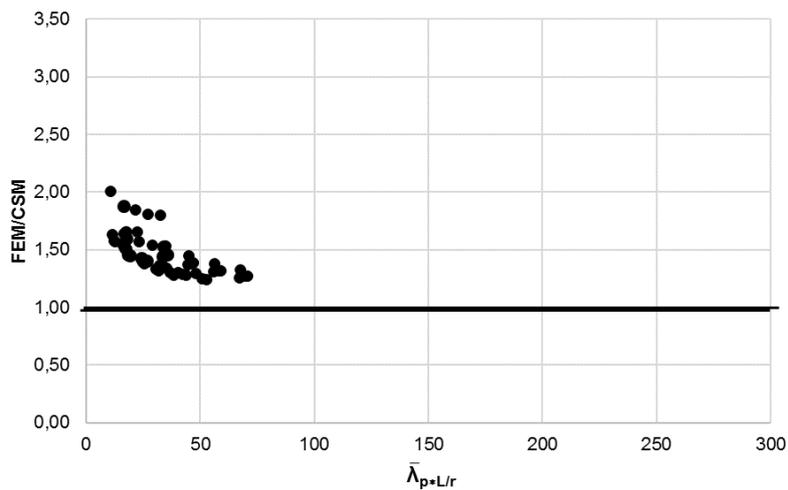
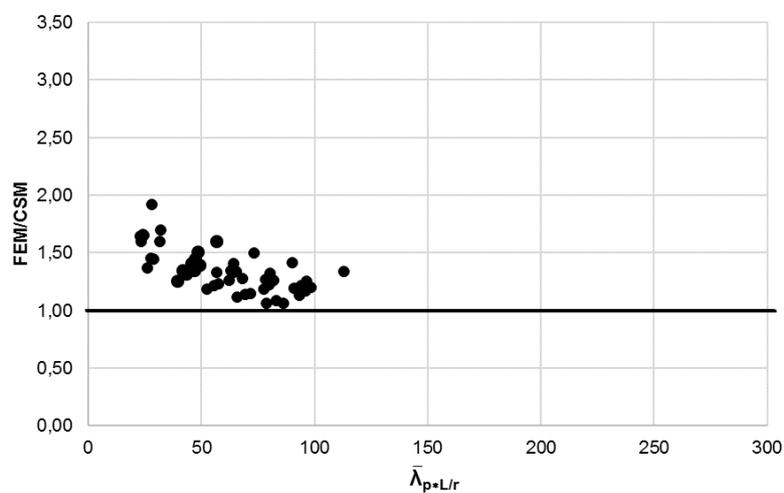
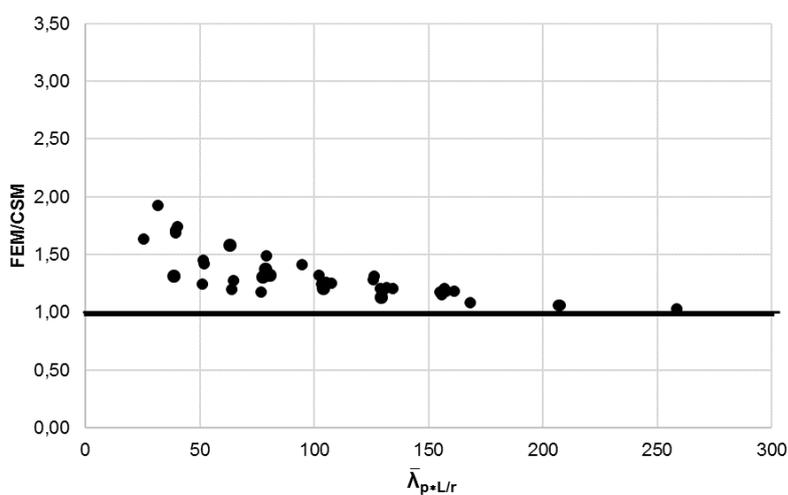
(a)  $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ (b)  $0,68 < \bar{\lambda}_p \leq 1$ (c)  $\bar{\lambda}_p > 1$ 

Figura 87 – Curva FEM/CSM *versus*  $\bar{\lambda}_p * L/r$  – posição "u" - separado por  $\bar{\lambda}_p$  para a proposta.

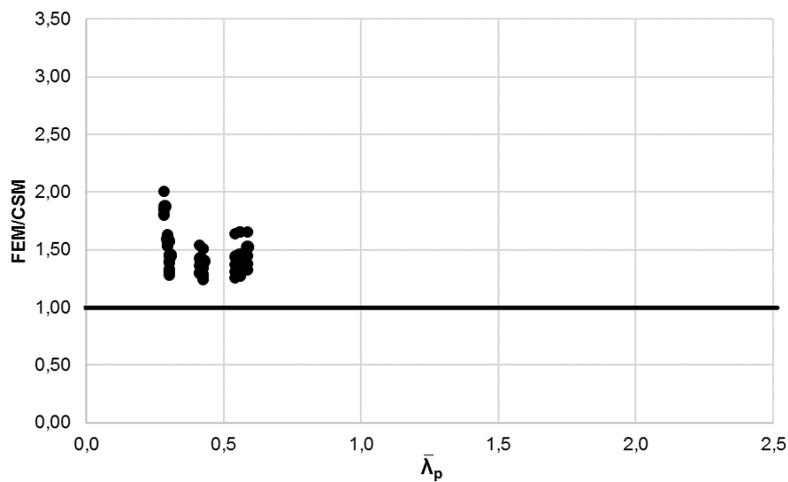
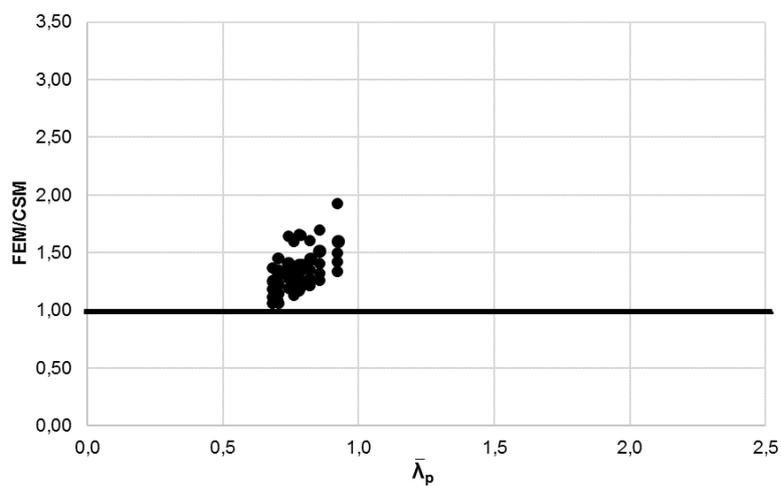
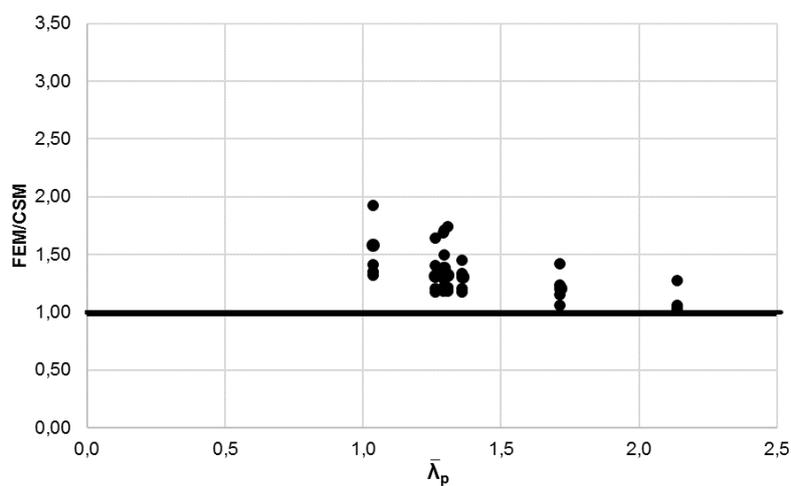
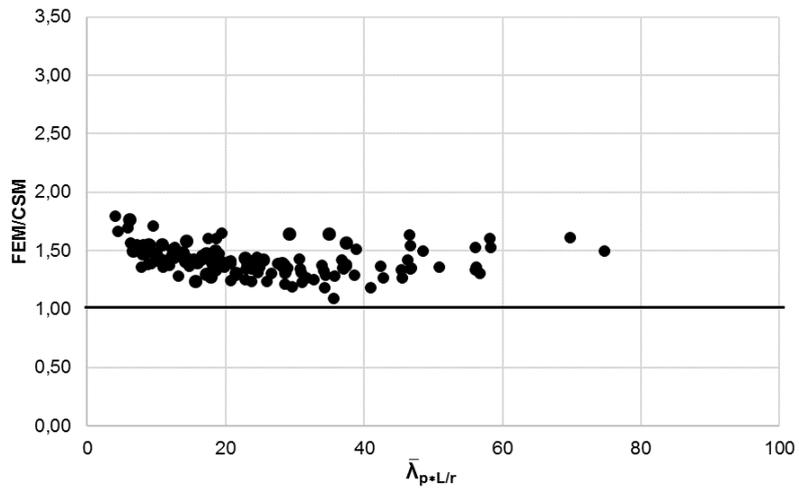
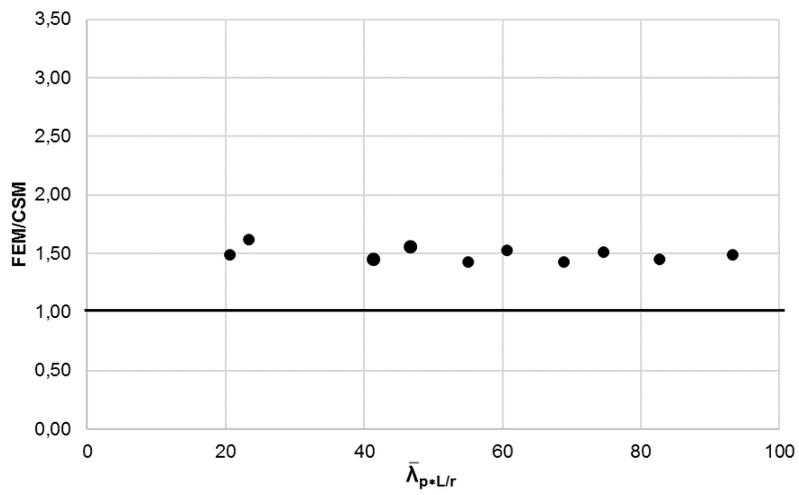
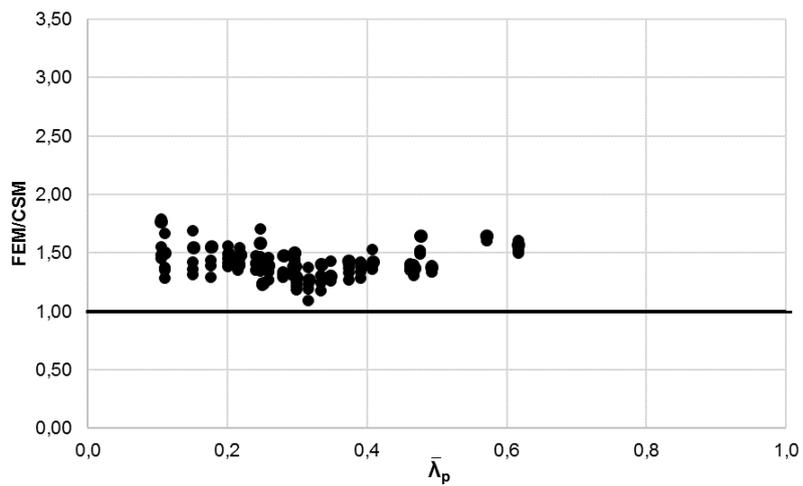
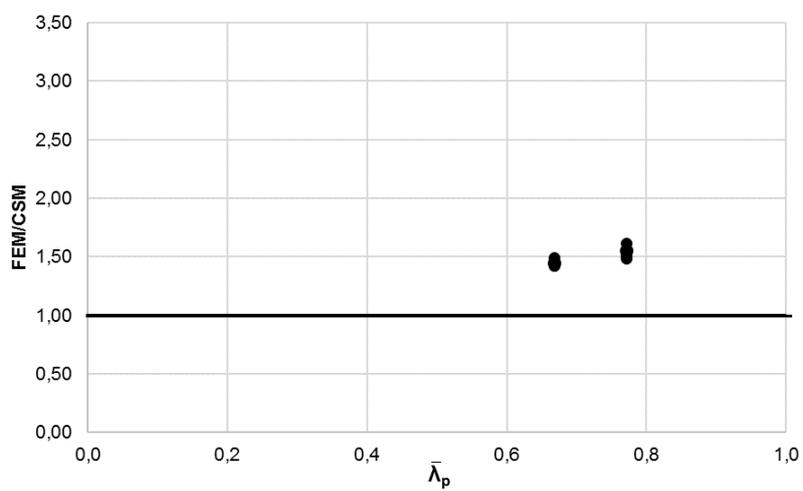
(a)  $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ (b)  $0,68 < \bar{\lambda}_p \leq 1$ (c)  $\bar{\lambda}_p > 1$ 

Figura 88 – Curva FEM/CSM *versus*  $\bar{\lambda}_p$  – posição "u" - separado por  $\bar{\lambda}_p$  para a proposta.

(a)  $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ (b)  $0,68 < \bar{\lambda}_p$ 

**Figura 89 – Curva FEM/CSM versus  $\bar{\lambda}_p * L/r$  – posição "n" - separado por  $\bar{\lambda}_p$  para a proposta.**

(a)  $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ (b)  $0,68 < \bar{\lambda}_p$ 

**Figura 90 – Curva FEM/CSM versus  $\bar{\lambda}_p$  – posição "n" - separado por  $\bar{\lambda}_p$  para a proposta.**

**Tabela 44 – Análises dos resultados para a comparação numérica e do CSM para a proposta.**

| Posição                | "u"   |                             |                                 |                       | "n"   |                             |                                 |                       |
|------------------------|-------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------|-------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------|
|                        | Todos | $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ | $0,68 < \bar{\lambda}_p \leq 1$ | $1 < \bar{\lambda}_p$ | Todas | $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ | $0,68 < \bar{\lambda}_p \leq 1$ | $1 < \bar{\lambda}_p$ |
| Média FEM/CSM          | 1,38  | 1,46                        | 1,35                            | 1,31                  | 1,42  | 1,41                        | 1,49                            | -                     |
| Variância FEM/CSM      | 0,04  | 0,03                        | 0,03                            | 0,04                  | 0,02  | 0,02                        | 0,00                            | -                     |
| Desvio Padrão FEM/CSM  | 0,20  | 0,17                        | 0,17                            | 0,20                  | 0,12  | 0,14                        | 0,00                            | -                     |
| Valor Máximo - FEM/CSM | 2,00  | 2,00                        | 1,92                            | 1,93                  | 1,79  | 1,79                        | 1,61                            | -                     |
| Valor Mínimo - FEM/CSM | 1,03  | 1,24                        | 1,06                            | 1,03                  | 1,09  | 1,09                        | 1,42                            | -                     |

**Tabela 45 – Comparação dos resultados base e da proposta.**

| Posição                | "u"   |          |                                 |          | "n"   |          |                                 |          |
|------------------------|-------|----------|---------------------------------|----------|-------|----------|---------------------------------|----------|
|                        | Todos |          | $0,68 < \bar{\lambda}_p \leq 1$ |          | Todos |          | $0,68 < \bar{\lambda}_p \leq 1$ |          |
| Dados                  | Base  | Alterado | Base                            | Alterado | Base  | Alterado | Base                            | Alterado |
| Média FEM/CSM          | 1,52  | 1,38     | 1,74                            | 1,35     | 1,46  | 1,42     | 2,08                            | 1,49     |
| Variância FEM/CSM      | 0,07  | 0,04     | 0,04                            | 0,03     | 0,04  | 0,02     | 0,01                            | 0,00     |
| Desvio Padrão FEM/CSM  | 0,26  | 0,20     | 0,20                            | 0,17     | 0,21  | 0,12     | 0,10                            | 0,00     |
| Valor Máximo - FEM/CSM | 2,22  | 2,00     | 2,22                            | 1,92     | 2,23  | 1,79     | 2,23                            | 1,61     |
| Valor Mínimo - FEM/CSM | 1,03  | 1,03     | 1,45                            | 1,06     | 1,09  | 1,09     | 1,93                            | 1,42     |

## CONCLUSÕES

### Generalidades

A utilização de elementos estruturais de perfil C em aço inoxidável tem crescido em todo o mundo. Apesar de seu alto custo inicial, existe uma série de fatores que tornam a sua utilização mais vantajosa em relação a outros tipos de materiais, como sua durabilidade, bom comportamento em altas temperaturas, ductilidade e possibilidade de reutilização e reciclagem do material. Este perfil se distingue do perfil I ou do perfil H por não possuir dupla simetria, de forma que seu eixo de flexão na menor inércia não é centralizado no comprimento das mesas.

A falta de estudos adequados para definição de parâmetros normativos à utilização do aço inoxidável para fins estruturais junto ao crescente aumento de construções utilizando aço no país motivam o desenvolvimento de pesquisas científicas nesta área.

Esta dissertação realizou um estudo do comportamento estrutural de vigas de seção transversal C de aço inoxidável austenítico. Para tal, foram desenvolvidos 290 modelos teóricos e numéricos, realizados por meio de uma análise paramétrica, consistindo em 29 seções transversais variando o comprimento do vão em 5 diferentes opções, baseado em modelos calibrados segundo os resultados de Theofanous et al. [10], sendo possível se atingir uma grande variabilidade de perfis com comprimentos e índice de esbeltez diferentes.

A análise teórica consistiu numa avaliação das seções transversais segundo as propostas de dimensionamento do Eurocode 3 – Parte 1.4 [17] e CSM [21]. A análise numérica utilizou o programa ANSYS [9] e considerou as imperfeições geométricas e condição de viga biapoada para os modelos.

Por fim, compararam-se os resultados obtidos com os critérios de cálculo teóricos e os modelos numéricos desenvolvidos e constatou-se que no dimensionamento do Eurocode 3 – Parte 1.4 [17] há uma grande variação dos resultados, principalmente quando analisados os perfis classe 4, que foram

encontradas apenas na posição “u”. Dessa forma, esse dimensionamento além de conservador, apresenta uma baixa confiabilidade dos resultados, uma vez que não representa bem a tendência dos perfis estudados, tendo uma grande variação principalmente quando analisados os perfis mais esbeltos, destacando-se os da classe 4, que utilizam o método da largura efetiva para definição da resistência. Assim, as análises realizadas apontam a necessidade de maiores investigações para o cálculo da resistência dos aços inoxidáveis para essas seções.

Os resultados obtidos pelo CSM [21] mostram que, apesar de ainda conservador, representam melhor o comportamento do perfil C em aço inoxidável, de uma forma geral, quando comparado ao dimensionamento proposto pelo Eurocode. Entretanto, é importante perceber que há diferença dos resultados para variação das fórmulas propostas para esse modelo, vistas na Equação (14) e na Equação (15) no item 2.1. Os resultados para a primeira equação mostram-se mais consistentes do que os da segunda equação.

Dessa forma, este trabalho desenvolveu algumas propostas para alteração dos métodos de dimensionamento de forma a melhorar os resultados atuais. O primeiro procedimento afetou o dimensionamento do Eurocode 3 – Parte 1.4 [17], por meio da redução do valor da tensão de escoamento, resultando numa melhora de resultado em torno de 18,5% para ambas as posições de estudo. A segunda alteração proposta, afetou o dimensionamento dos perfis estudados que correspondiam a classe 3 do Eurocode 3 – Parte 1.4 [17], considerando o desenvolvido por Knobloch et al. [39]. Notou-se uma melhoria dos resultados para essa faixa de perfis, correspondente a 42,8% para a posição “u” e 35,4% para a posição “n”. O resultado da média de uma forma geral não teve significativa alteração, sendo 2,0% e 3,1% para as posições “u” e “n”, respectivamente, o que era esperado, uma vez que essa alteração é pontual para os perfis classe 3 e é possível notar que os perfis são em sua maioria classe 1 e 2 na posição “n” e classe 4 na posição “u”.

Em relação a proposta para os perfis classe 4, não foram observadas grandes alterações dos resultados finais, sendo 7,9% para os perfis classe 4, apenas, e 6% para a posição “u” de uma forma geral. Ainda assim, representando uma melhora positiva e um caminho que pode ser melhor avaliado para futuras análises.

Uma última proposta foi desenvolvida para alteração dos resultados encontrados pelo método do CSM [21]. Essa alternativa focou em apenas uma faixa dos resultados do dimensionamento, representando uma melhora de 22,4% para a posição “u” e 28,4% para a posição “n”. De forma geral, os resultados tiveram uma redução da média FEM/CSM de 9,2% para a posição “u” e de 2,7% para a posição “n”.

### **Principais contribuições deste trabalho**

Com dados mais precisos, o dimensionamento estrutural utilizando perfis C em aço inoxidável se tornará mais eficiente, aumentando as possibilidades de utilização bem como a economia ao empregá-lo. Desta forma, o presente trabalho avaliou o comportamento estrutural de perfis C em aço inoxidável à situação de flexão, variando alguns dos parâmetros do perfil, como espessura e comprimento, sendo verificada a diferença de resistência entre duas posições diferentes de utilização do perfil, por meio de uma série de modelos numéricos de elementos finitos desenvolvidos no programa ANSYS 12.0 [9]. Também foi possível um aumento do número de dados sobre perfis C em aço inoxidável austenítico solicitadas à flexão.

Desta forma, a presente dissertação conseguiu contribuir, para o meio acadêmico, com comparações de resultados numéricos e experimentais com as recomendações de cálculo preconizadas no Eurocode 3 Parte 1-4 [17] e no Método da Resistência Continua (CSM) [21]. Verificou-se o subdimensionamento que ocorre em ambos os métodos. O CSM [21] foi o que se aproximou mais dos resultados obtidos pelas análises numéricas.

Além disso, este trabalho forneceu propostas que possibilitem o desenvolvimento de alterações que modifiquem o dimensionamento para melhor aproximação dos resultados da resistência do perfil C em aço inoxidável, nas posições estudadas.

Todas as etapas apresentadas foram embasadas numa série de artigos e publicações que apresentam estudos sobre a área de aço inoxidável, perfis

C, efeito catenária, dimensionamento do Eurocode 3 – Parte 1.4 [17] e dimensionamento do CSM [21].

### **Sugestões para trabalhos futuros**

A partir das conclusões obtidas durante a realização deste trabalho, algumas sugestões para trabalhos futuros podem ser apresentadas, tais como:

- Realizar ensaios experimentais nos perfis analisados neste trabalho para flexão nas duas posições propostas, “u” e “n”.
- Ampliar a quantidade de análises numéricas, tentando avaliar áreas ainda não cobertas nesse trabalho como os perfis “n” na classe 4, segundo o Eurocode 3 – Parte 1.4 [17].
- Realizar análises numéricas e ensaios experimentais semelhantes aos deste trabalho com diferentes tipos de aço inoxidável para avaliar as suas diferenças de comportamento.
- Propor novas análises, estudando o efeito catenária segundo as preposições de Chen et al. [24], para tentar evitá-lo ou entender melhor suas ocorrências.
- Realizar ensaios destes perfis sob flexão na maior inércia.

## REFERÊNCIAS

- [1] Grand View Research. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/stainless-steel-market>. Acesso em: 20 fev. 2021.
- [2] BONAFÉ, Gabriel (Brasil). Centro Brasileiro da Construção em Aço - CBCA (Org). **Estruturas metálicas reduzem o tempo de construção em até 40%**. 2014. Disponível em: <http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/noticias-detalhes.php?cod=6421>>. Acesso em: 04 jul. 2018.
- [3] AFSHAN, S.; FRANCIS, P.; BADDOO, N. R.; GARDNER, L. **Reliability analysis of structural stainless steel design provisions**. Journal of Constructional Steel Research, 114, p. 293-304, nov. 2015. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.012>.
- [4] Multinox (Brasil). Disponível em: [http://www.multinoxms.com.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=53:o-aco-inox-e-muito-caro&catid=36:aco-inox&Itemid=76](http://www.multinoxms.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=53:o-aco-inox-e-muito-caro&catid=36:aco-inox&Itemid=76)>. Acesso em: 30 fev. 2018.
- [5] SAE/AISI Carbon Steel Naming Conventions. Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6151>>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- [6] COBBH, H. M.; **The Naming and Numbering of Stainless Steels**. Advanced Materials & Processes, setembro 2007.
- [7] CHHIBBER, C.; Understanding the Steel Naming and Numbering System. Disponível em: <https://www.gpss.com/understanding-steel-naming-numbering-system>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

[8] LOSINOX AÇO INOX, ABC do Aço Inox. Disponível em: <<https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms%2Ffiles%2F19396%2F1479943318abc+do+a%C3%A7o+inox.pdf>>. Acesso em: 14mar. 2020.

[9] ANSYS 12.0 ®. ANSYS Inc. Theory Reference (version 12.1), 2010.

[10] THEOFANOUS, M.; LIEW, A.; GARDNER, L.; **Experimental study of stainless steel angles and channels in bending**. Structures, [s.l.], v.4, p.80-90, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2015.10.004>.

[11] SILVA, E. L.; PIERIN, I.; SILVA, V.; P.; **Estruturas Compostas por perfis formados a frio, Dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012**. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Valdir\\_Silva/publication/267331523\\_Estruturas\\_compostas\\_por\\_perfis\\_formados\\_a\\_frio\\_-\\_dimensionamento\\_pelo\\_metodo\\_das\\_larguras\\_efetivas\\_e\\_aplicacao\\_conforme\\_ABNT\\_NBR\\_147622010\\_e\\_ABNT\\_NBR\\_63552012/links/544bb9300cf24b5d6c408eac/Estruturas-compostas-por-perfis-formados-a-frio-dimensionamento-pelo-metodo-das-larguras-efetivas-e-aplicacao-conforme-ABNT-NBR-147622010-e-ABNT-NBR-63552012.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Valdir_Silva/publication/267331523_Estruturas_compostas_por_perfis_formados_a_frio_-_dimensionamento_pelo_metodo_das_larguras_efetivas_e_aplicacao_conforme_ABNT_NBR_147622010_e_ABNT_NBR_63552012/links/544bb9300cf24b5d6c408eac/Estruturas-compostas-por-perfis-formados-a-frio-dimensionamento-pelo-metodo-das-larguras-efetivas-e-aplicacao-conforme-ABNT-NBR-147622010-e-ABNT-NBR-63552012.pdf)>. Acesso em: 7 mar. 2020.

[12] ABNT NBR 6355 - **Perfis estruturais de aço formados a frio — Padronização**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

[13] Azure Soffits & Lintes. (2016). **Acs stainless**. Disponível em: <<https://acsstainless.co.uk/wp-content/uploads/2016/11/Azure-Soffits-Lintels-Brochure.pdf>>. Acesso em: 15 Nov. 2017.

[14] Como construir um pequeno telhado em steel frame. Disponível em: <[https://cdn.leroymerlin.com.br/contents/como\\_construir\\_um\\_pequeno\\_telhado\\_em\\_steel\\_frame\\_1d5a\\_original.jpg](https://cdn.leroymerlin.com.br/contents/como_construir_um_pequeno_telhado_em_steel_frame_1d5a_original.jpg)>. Acesso em: 14 dez. 2019.

[15] P1001 - 1-5/8" x 3-1/4", 12 Gage Back-to-Back, Solid. Disponível em: <https://www.unistrut.us/product-details/p1001>. Acesso em: 16 dez. 2019.

[16] SISTEMAS ESTRUTURAIS EM AÇO NA ARQUITETURA, Características do Aço na Construção Civil Módulo 3. Disponível em: [http://www.cursoscbca.com.br/moodle/arquivos/pdfs/Apostila\\_Sistemas\\_Estruturais/Apostila\\_Modulo\\_3.pdf](http://www.cursoscbca.com.br/moodle/arquivos/pdfs/Apostila_Sistemas_Estruturais/Apostila_Modulo_3.pdf)>. Acesso em: 20 mar. 2020.

[17] EUROCODE 3 - Part 1.4. **Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1.4: General rules - Supplementary rules for stainless steels.** European Committee for Standardization, 2006.

[18] GARDNER, L.; **The continuous strength method.** Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures & Buildings 161, p. 127–133, Jun 2008. Issue SB3.

[19] YUN, X.; GARDNER, L.; BOISSONNADE, N.; **The continuous strength method for the design of hot-rolled steel cross sections.** Journal of Constructional Steel Research, 157, p. 179-191, 2018. Elsevier.

[20] ZHAO, O.; GARDNER, L.; **The continuous strength method for the design of mono-symmetric and asymmetric stainless steel cross-sections in bending.** Journal of Constructional Steel Research, v. 150, p. 141-152, Ago. 2018. Elsevier.

[21] ZHAO, O.; AFSHAN, S.; GARDNER, L.; **Structural response and continuous strength method design of slender stainless steel cross-sections.** Journal of Constructional Steel Research, v. 140, p. 14-25, Fev 2017. Elsevier.

[22] MIRAMBELL, E.; REAL, E.; **On the calculation of deflections in structural stainless steel beams: an experimental and numerical investigation.** Journal of Constructional Steel Research, 54, p. 109-133, 2000. Elsevier.

- [23] SARQUIS, F. R. **Avaliação estrutural de cantoneiras em aço inoxidável austenítico submetidas à compressão**. 198f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGE CIV), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- [24] CHEN, Y.; CHEN, X.; WANG, C.; **Tests and behavior of hot-rolled channel steel sections subjected to web crippling**. Journal of Constructional Steel Research, 117, p. 101-114, Oct 2015. Elsevier BV.
- [25] WANG, S.; YOST, M. I.; TIEN, Y. L. **Lateral Buckling of locally buckled beams using finite element techniques**. Computers & Structures, [s.l], v. 7, n. 3, p.469-475, Jun. 1977. Elsevier. [http://dx.doi.org/10.1016/0045-7949\(77\)90084-0](http://dx.doi.org/10.1016/0045-7949(77)90084-0).
- [26] BADDOO, N.; **100 years of stainless steel: A review of structural applications and the development of design rules**. The Structural Engineer, Ago 2013.
- [27] NAJI, A.; **Modelling the catenary effect in the progressive collapse analysis of concrete structures**. Structural Concrete 17, 2016.
- [28] EUROCODE 3 - Part 1.1 **Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings**. European Committee for Standardization, 2005.
- [29] EUROCODE 3 - Part 1.5. **Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1.5: Piling**. European Committee for Standardization, 2006.
- [30] CalcResource (Brasil). 2015. **Propriedades do perfil C**. Disponível em: <http://calresource.com/cross-section-channel.html>>. Acesso em: 10 Maio. 2018.

[31] ARRAYAHO, I.; REAL, E.; MIRAMBELL, E.; GARDNER, L. **The continuous Strength Method for Stainless Steel Columns**. Department of Civil and Environmental Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain and Department of Civil Engineering, Imperial College London, UK.

[32] LIANG, Y.; ZHAO, O.; LONG, Y.; GARDNER, L.; **Stainless steel channel sections under combined compression and minor - Part 1: Experimental study and numerical modelling**. Journal of Constructional Steel Research, 152, p. 154-161, 2019. Elsevier.

[33] LIANG, Y.; ZHAO, O.; LONG, Y.; GARDNER, L.; **Stainless steel channel sections under combined compression and minor - Part 2: Parametric studies and design**. Journal of Constructional Steel Research, 152, p. 162-172, 2019. Elsevier.

[34] EUROCODE 3 - Part 1.3. **Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1.3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting**. European Committee for Standardization, 2006.

[35] ABNT NBR 6892 - **Materiais metálicos — Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente** - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

[36] AFSHAN, S.; ZHAO O.; GARDNER L.; **Standardised material properties for numerical parametric studies of Structural stainless steel elements**. Journal of Constructional Steel Research, 152, Abril 2018. Elsevier.

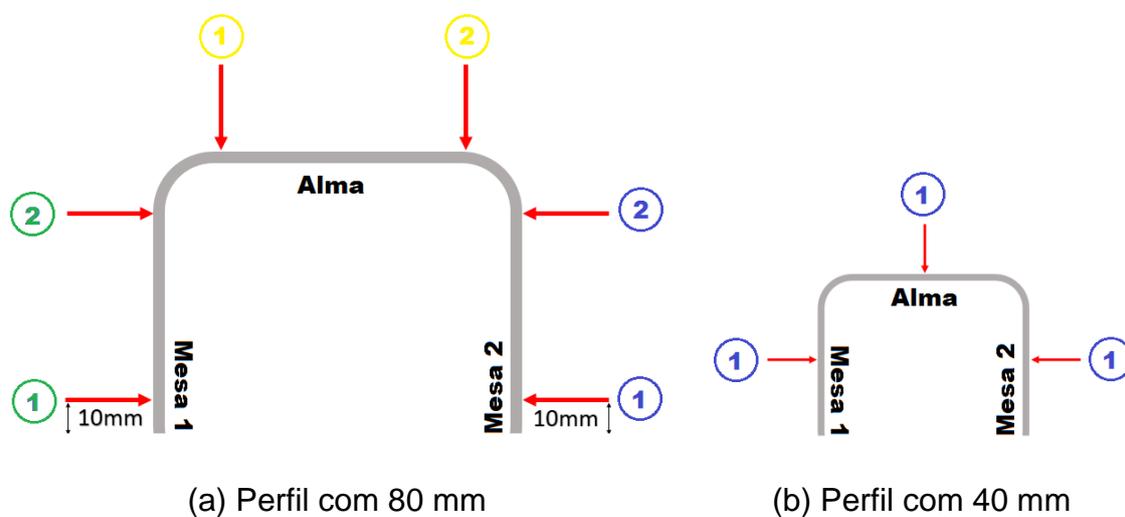
[37] MENEZES, A. A.; **Comportamento estrutural de cantoneiras de aço inoxidável submetidas à compressão axial**. 2017. 138f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGE CIV), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

[38] DUARTE, H. P. C. S. G. **Avaliação de colunas tubulares quadradas em aço inoxidável**. 2017. 141f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGE CIV), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

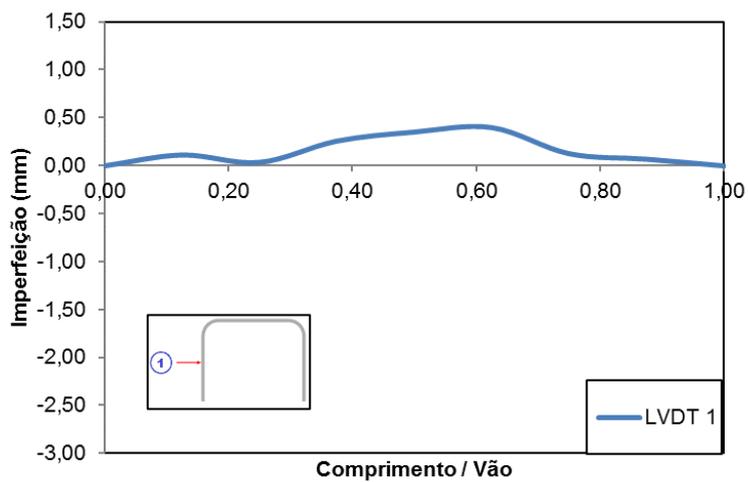
[39] KNOBLOCH, M.; BUREAU, A.; KUHLMAN, U.; SILVA, L. S.; SNIJDER H.H.; TARAS A.; BOURS A.; JORG F.; **Structural member stability verification in the new Part 1-1 of the second generation of Eurocode 3**. Steel Construction 13, No. 2, pp. 98–113. 2020.

## APÊNDICE A

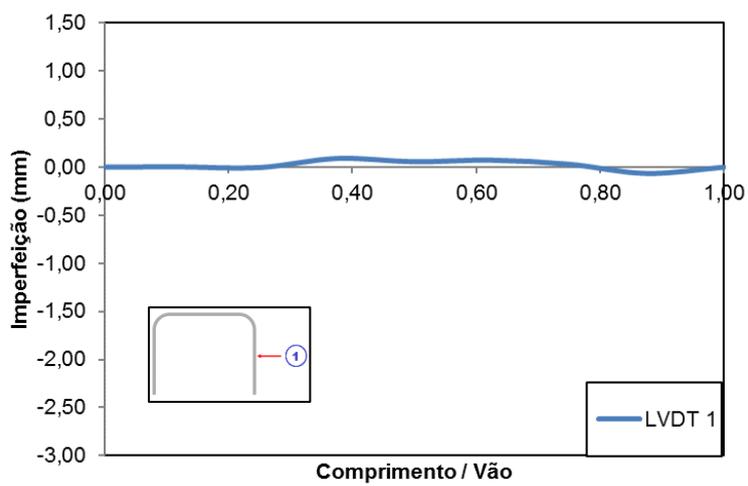
O Apêndice A reúne os resultados das medições das imperfeições iniciais dos 12 perfis aferidos neste trabalho. A Figura 91 apresenta um esquema de como foi realizado o posicionamento dos LVDTs para as medidas com suas nomenclaturas e os resultados das medições podem ser vistos da Figura 92 a Figura 103.



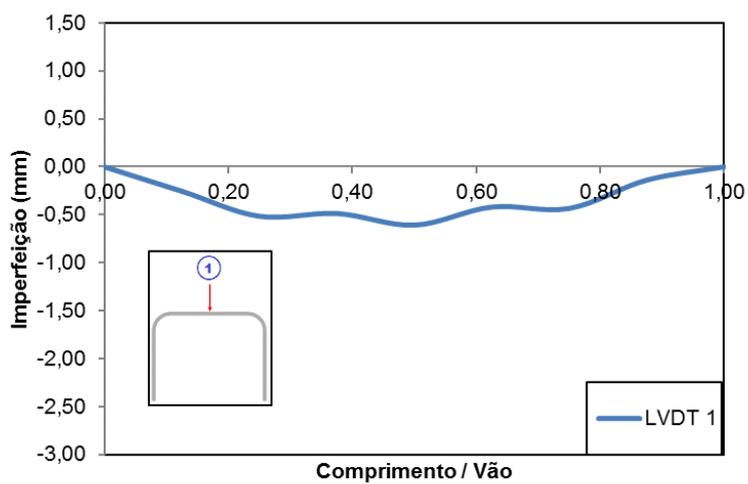
**Figura 91 – Posicionamento dos LVDTs.**



(a) Mesa 1

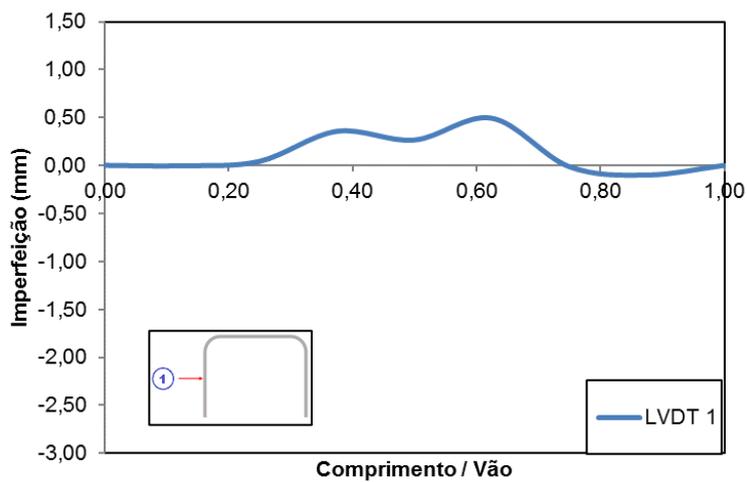


(b) Mesa 2

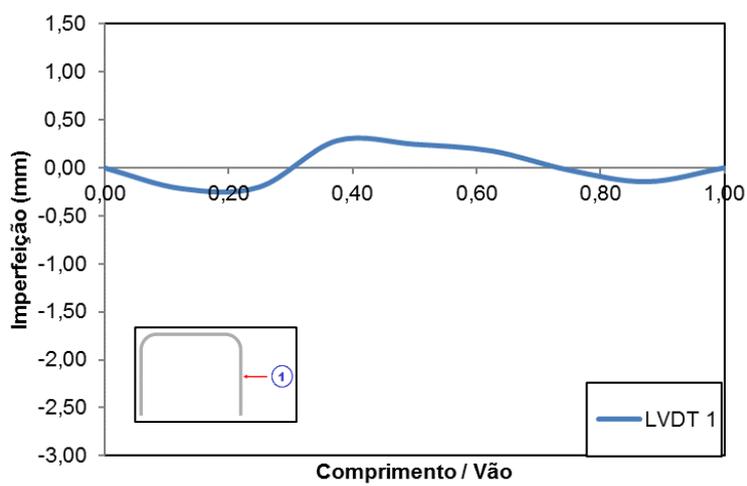


(c) Alma

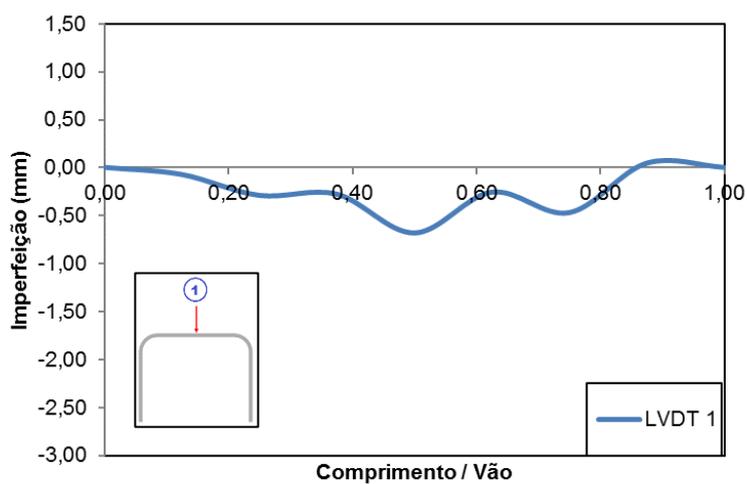
Figura 92 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-750-1.



(a) Mesa 1

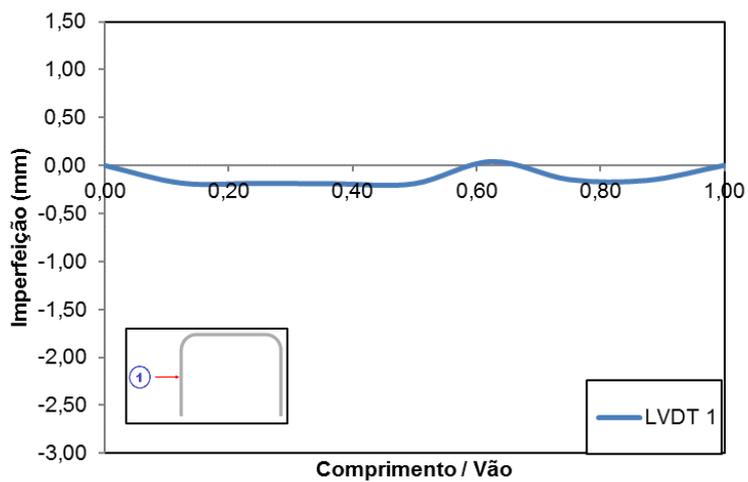


(b) Mesa 2

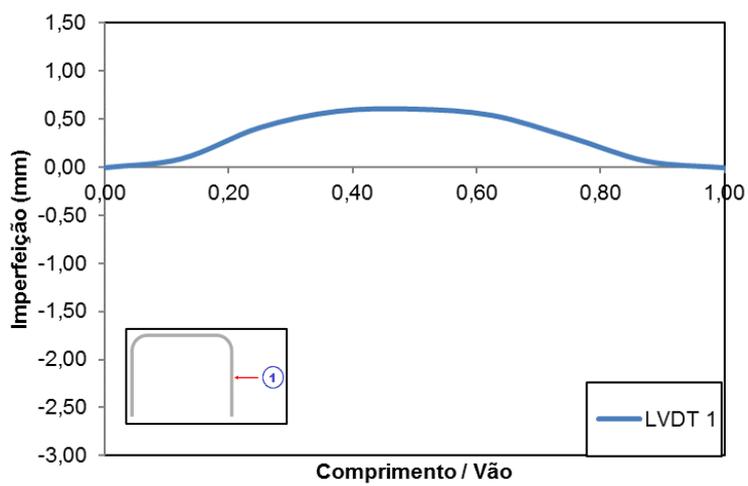


(c) Alma

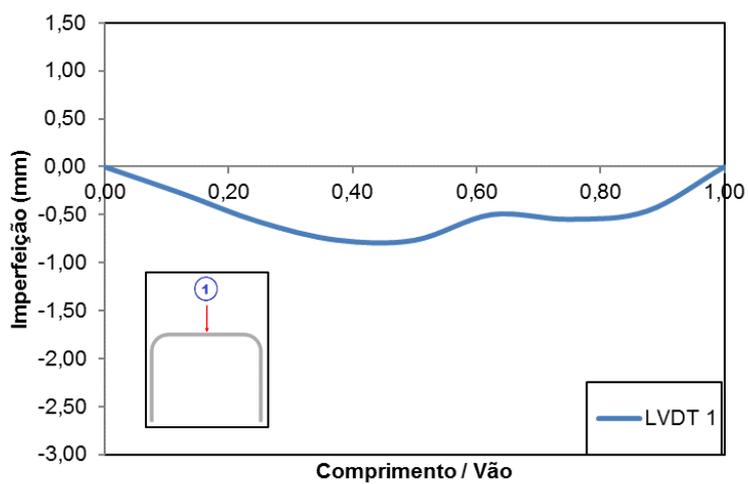
**Figura 93 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-750-2.**



(a) Mesa 1

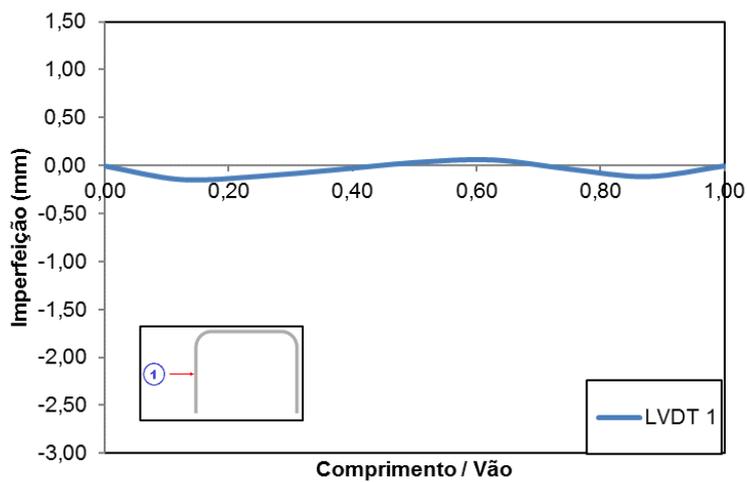


(b) Mesa 2

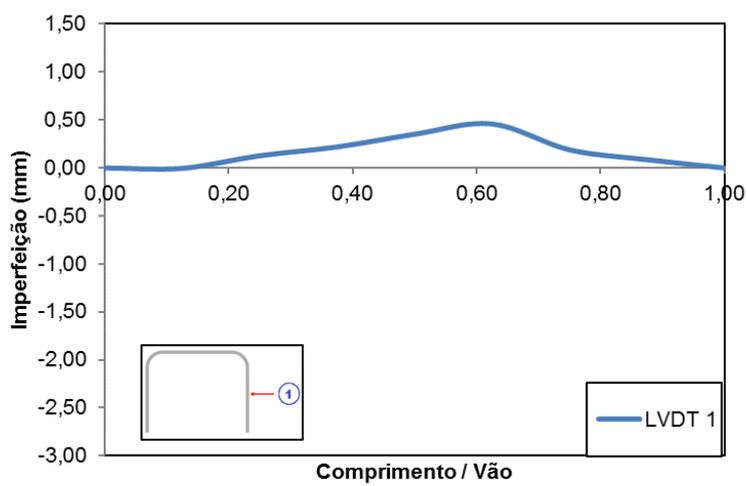


(c) Alma

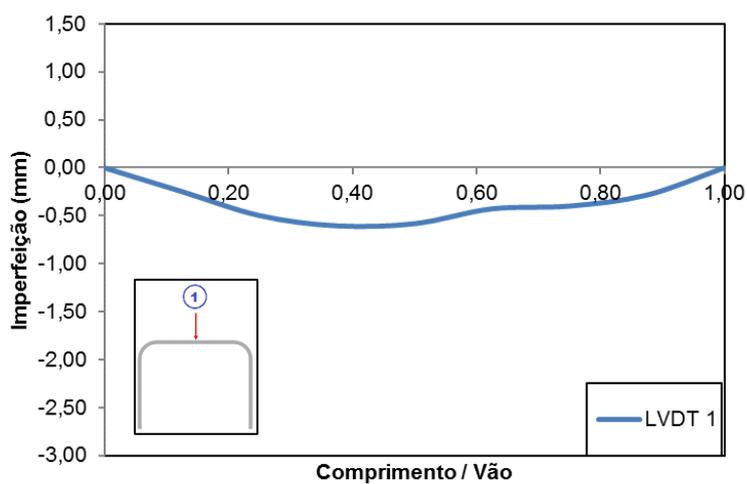
**Figura 94 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-750-3.**



(a) Mesa 1

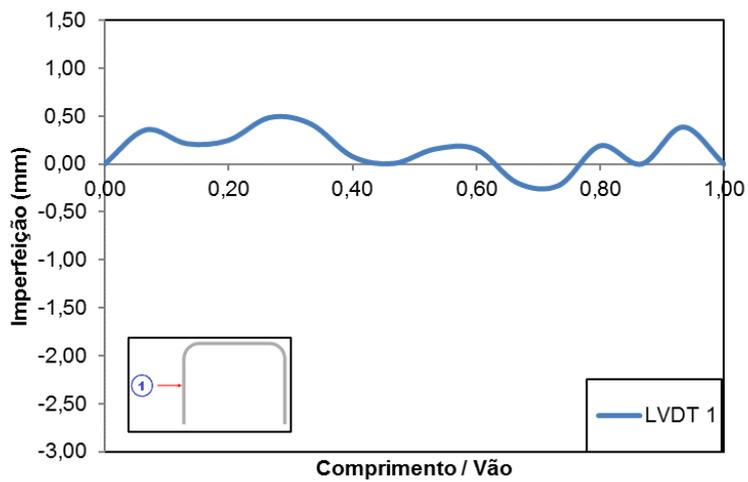


(b) Mesa 2

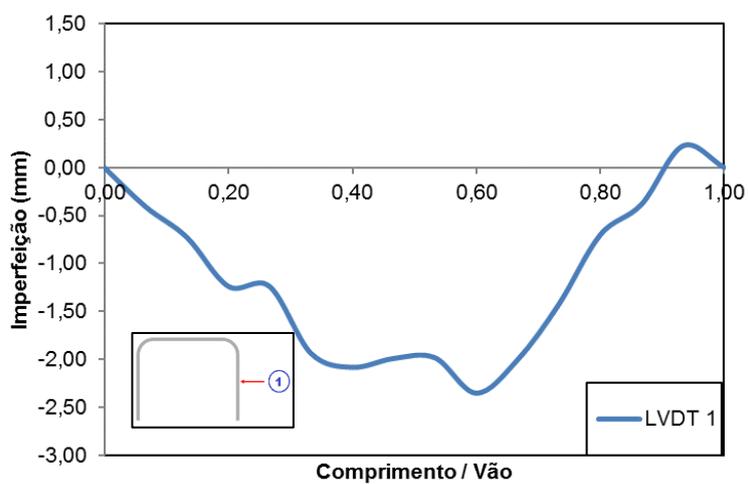


(c) Alma

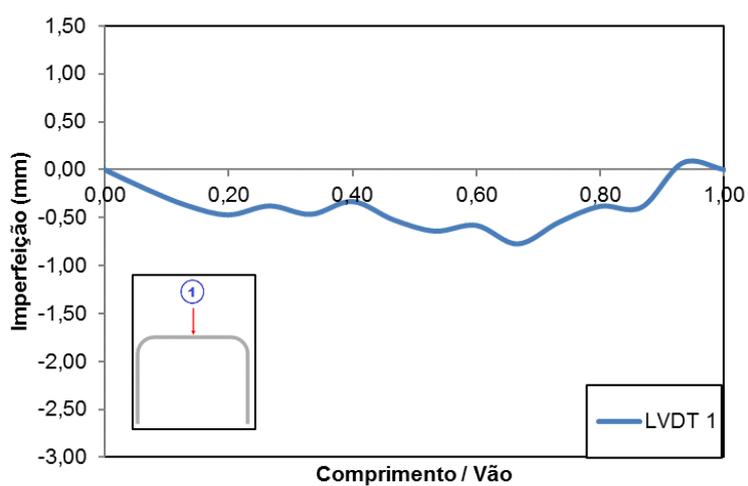
**Figura 95 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-750-4.**



(a) Mesa 1

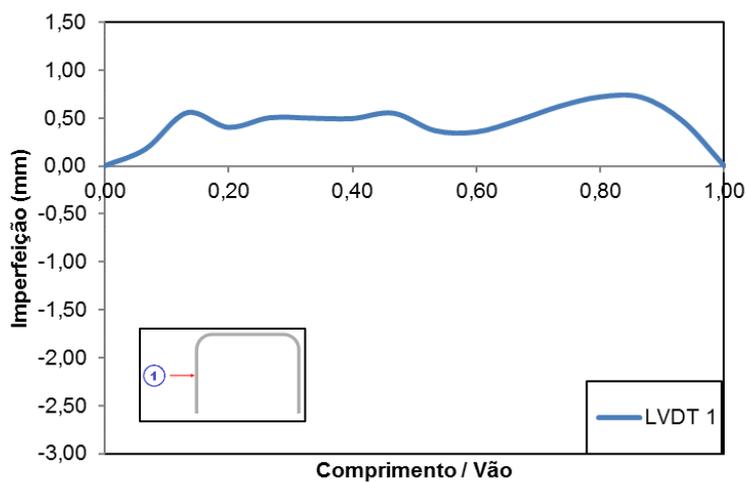


(b) Mesa 2

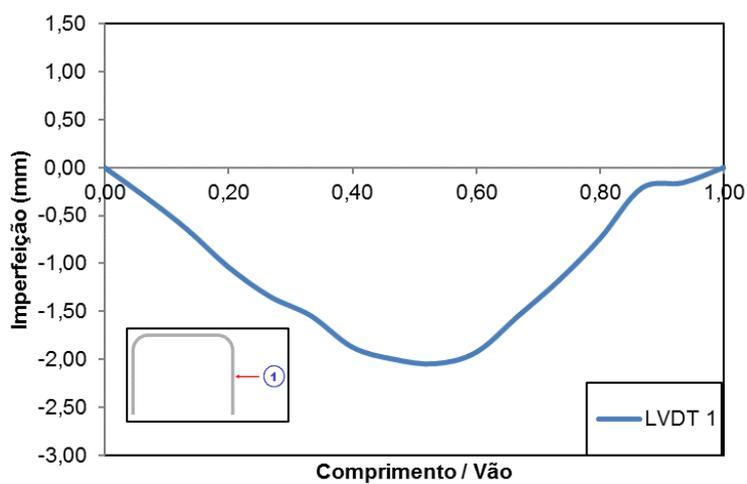


(c) Alma

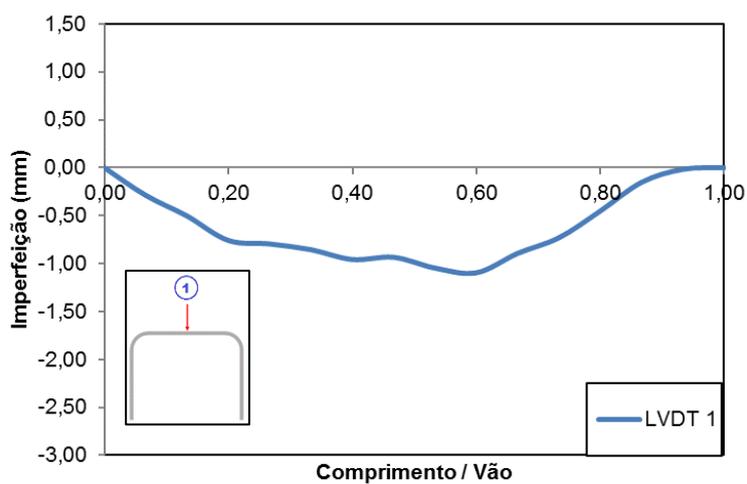
**Figura 96 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-1500-1.**



(a) Mesa 1

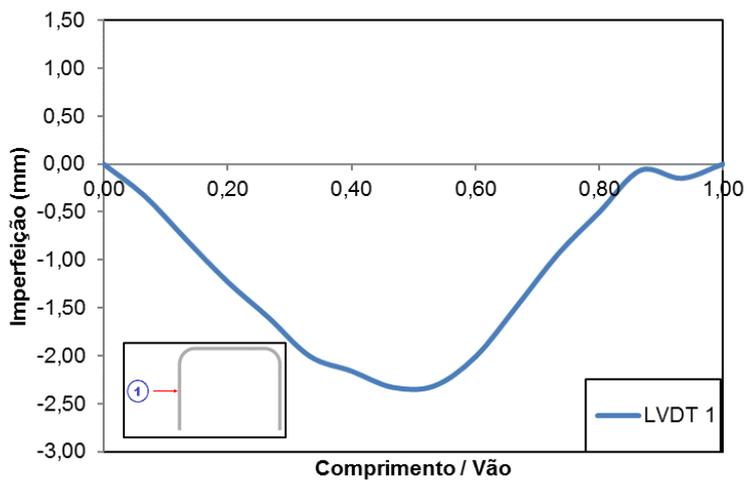


(b) Mesa 2

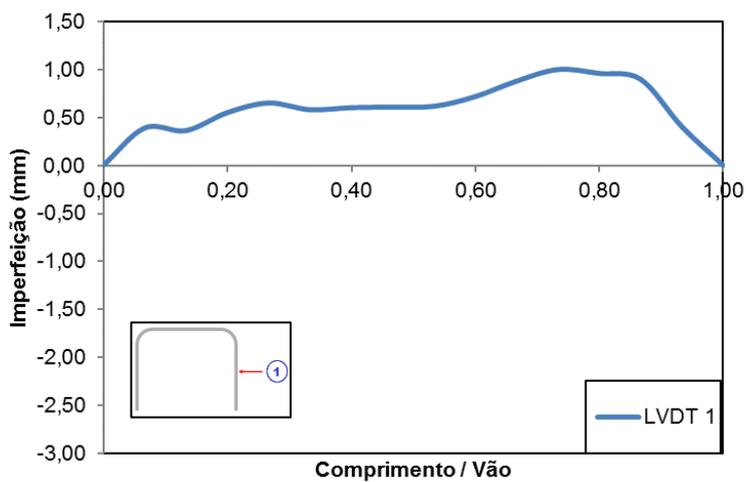


(c) Alma

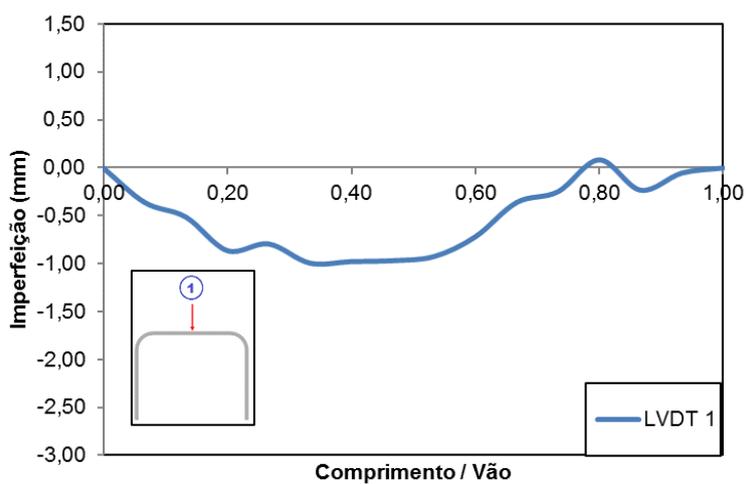
Figura 97 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-1500-2.



(a) Mesa 1

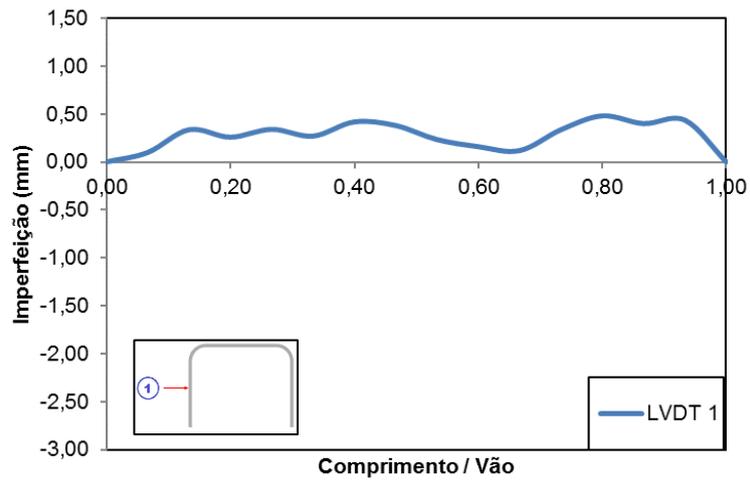


(b) Mesa 2

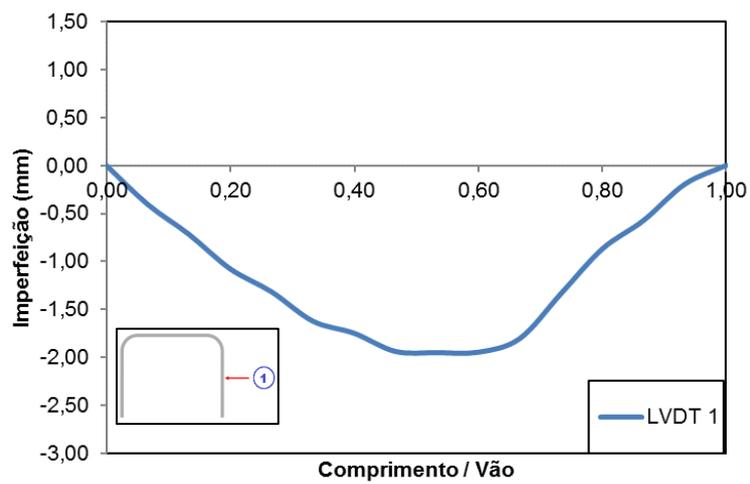


(c) Alma

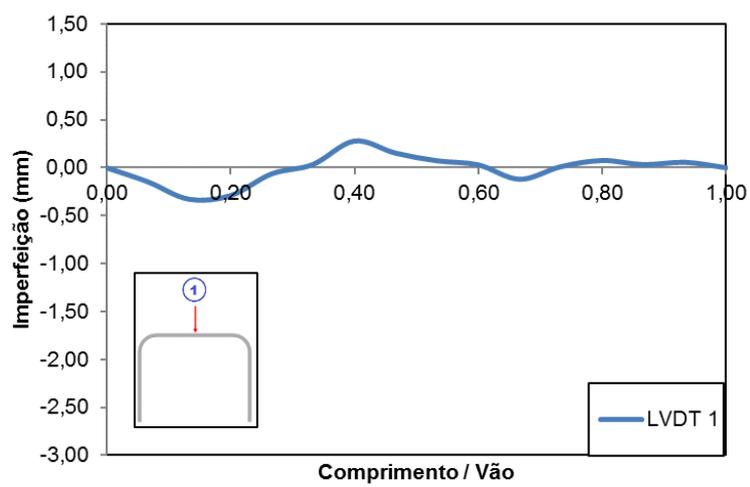
**Figura 98 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-1500-3.**



(a) Mesa 1

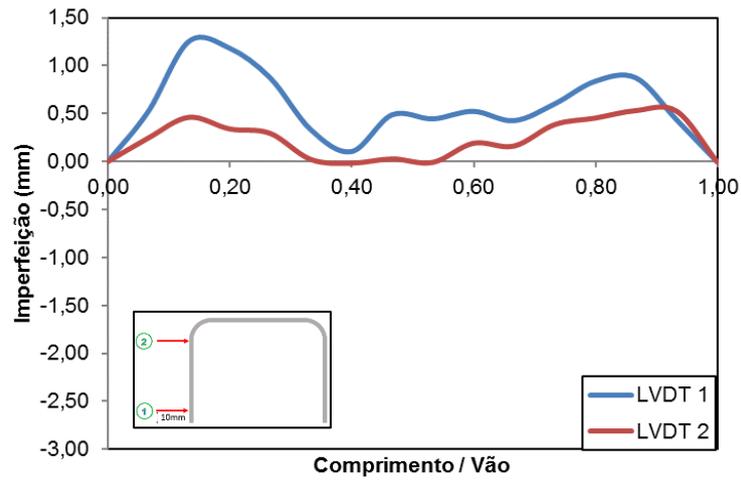


(b) Mesa 2

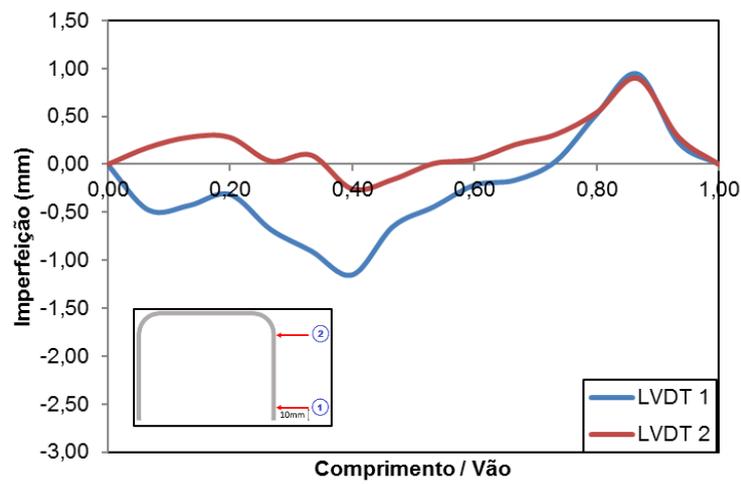


(c) Alma

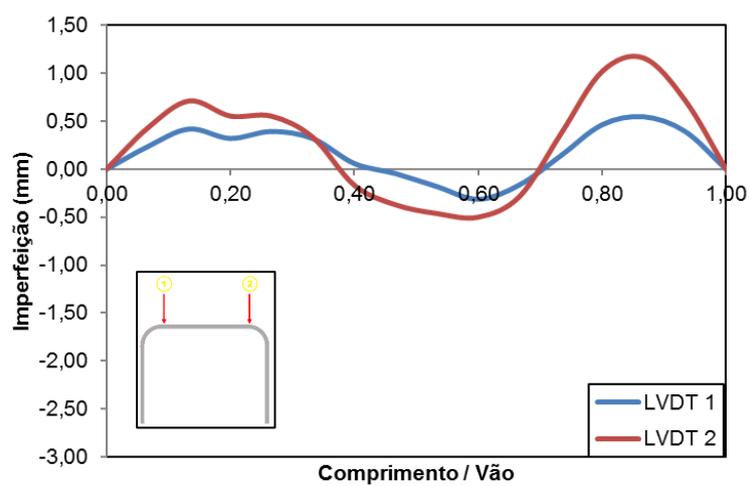
**Figura 99 – Imperfeições perfil C40X40X5X5-1500-4.**



(a) Mesa 1

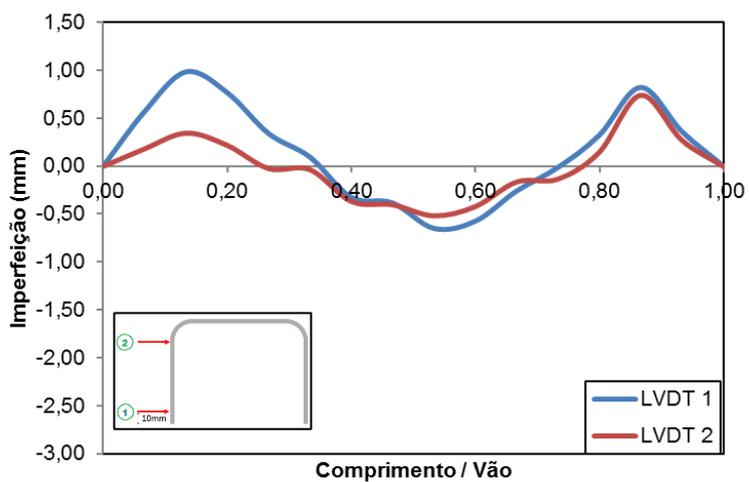


(b) Mesa 2

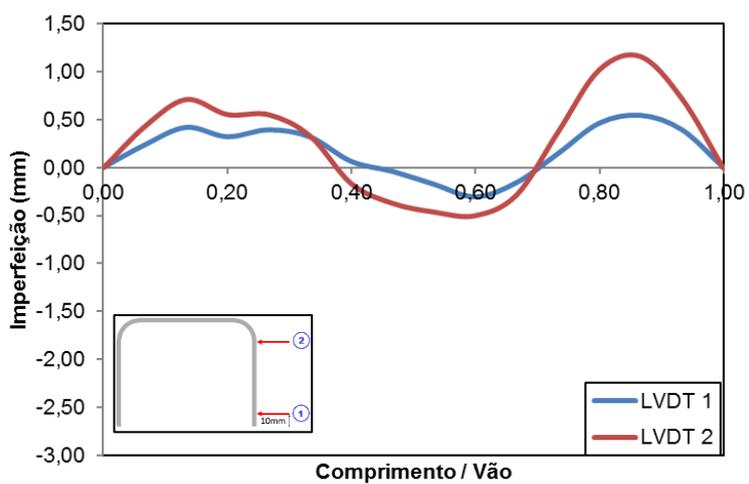


(c) Alma

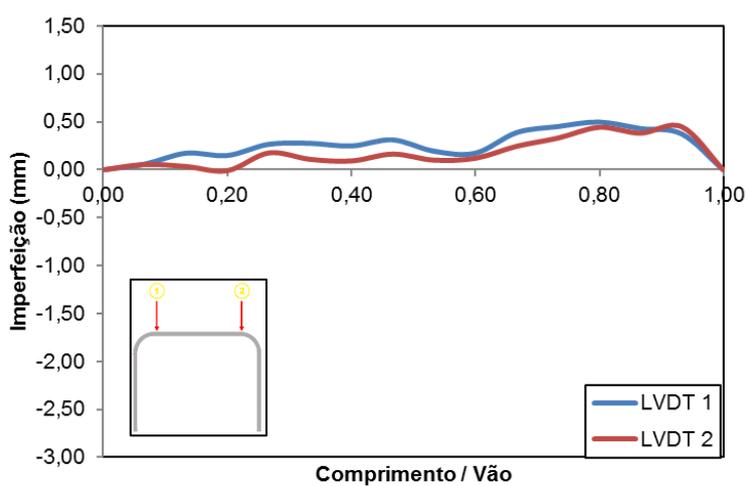
Figura 100 – Imperfeições perfil C80X80X3X3-1500-1.



(a) Mesa 1

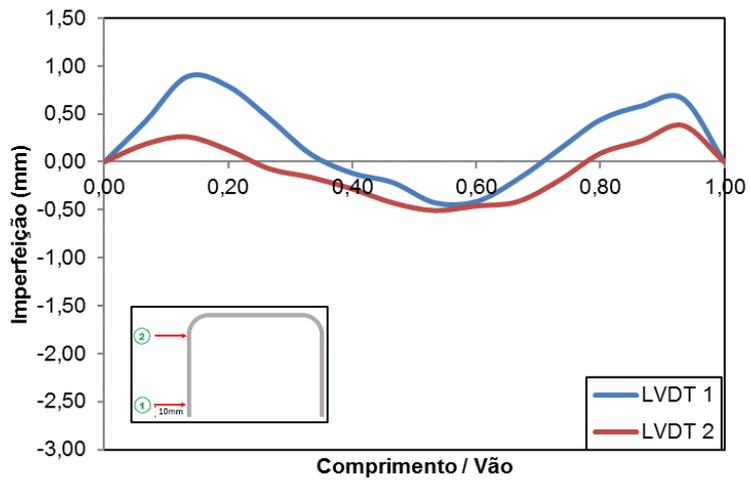


(b) Mesa 2

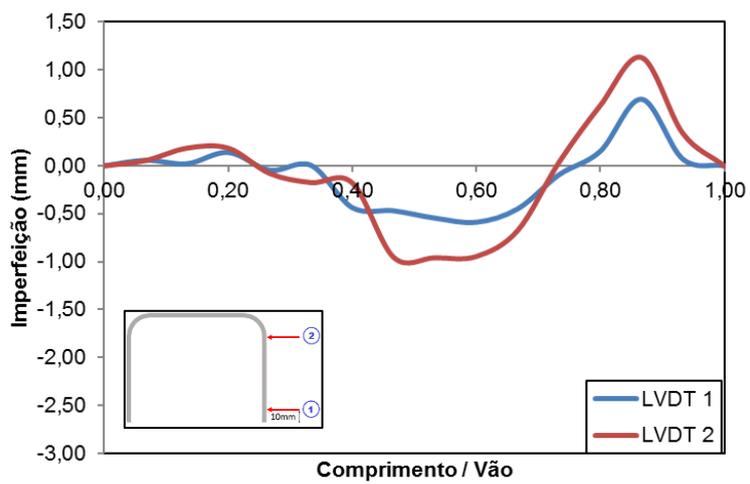


(c) Alma

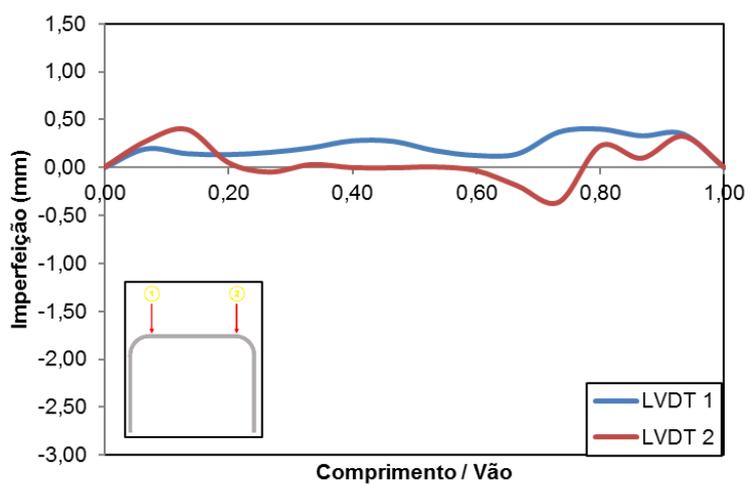
Figura 101 – Imperfeições perfil C80X80X3X3-1500-2.



(a) Mesa 1

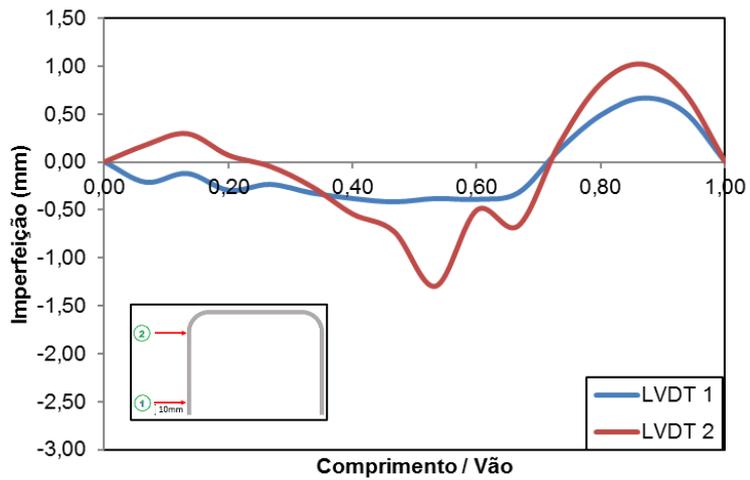


(b) Mesa 2

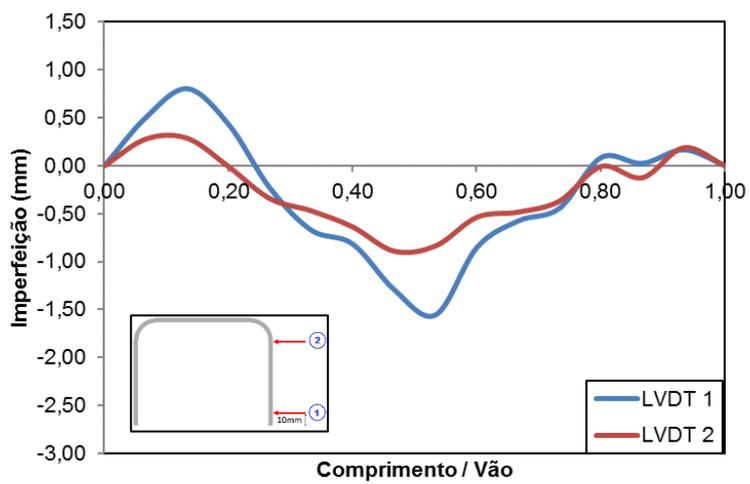


(c) Alma

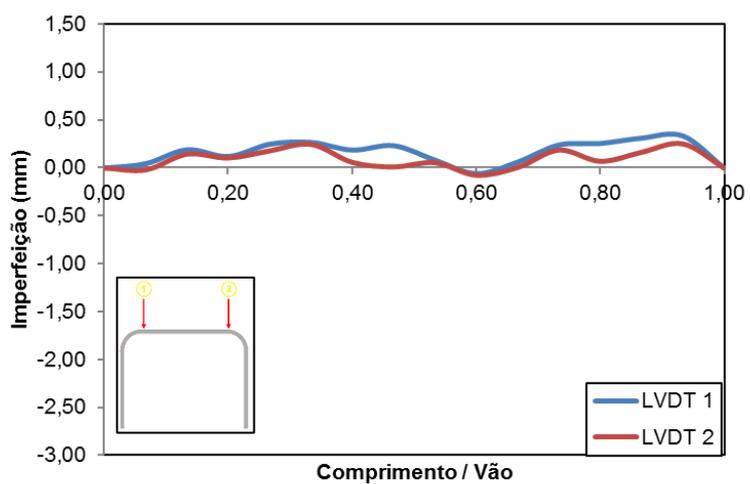
Figura 102 – Imperfeições perfil C80X80X3X3-1500-3.



(a) Mesa 1



(b) Mesa 2

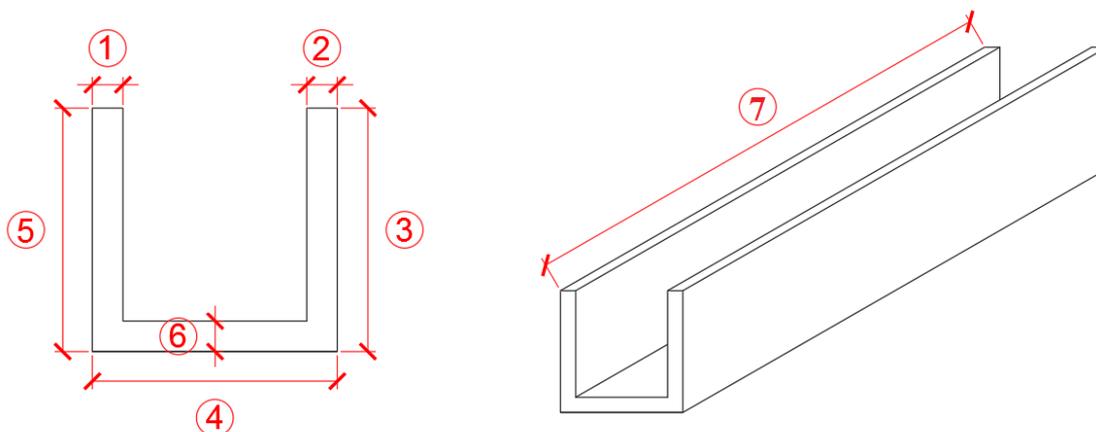


(c) Alma

Figura 103 – Imperfeições perfil C80X80X3X3-1500-4.

## APÊNDICE B

O Apêndice B mostra, da Tabela 46 a Tabela 57, os valores das medições das seções transversais dos perfis C aferidos neste trabalho. A Figura 104 retrata os pontos medidos.



**Figura 104 – Dimensões Medidas.**

**Tabela 46 – Medições perfil C40X40X5X5-750-1.**

| 40u750-1 |           |           |           |       |           |
|----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Medida   | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média | Variância |
| 1        | 5,07      | 5,04      | 5,11      | 5,07  | 0,00      |
| 2        | 5,09      | 5,05      | 5,12      | 5,09  | 0,00      |
| 3        | 40,91     | 40,89     | 40,79     | 40,86 | 0,00      |
| 4        | 41,42     | 41,60     | 41,38     | 41,47 | 0,01      |
| 5        | 38,55     | 38,17     | 38,93     | 38,55 | 0,14      |
| 6        | 5,08      | 5,11      | 5,12      | 5,10  | 0,00      |
| 7        | 850       | 850       | 850       | 850   | 0,00      |

**Tabela 47 – Medições perfil C40X40X5X5-750-2.**

| 40u750-2 |           |           |           |       |           |
|----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Medida   | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média | Variância |
| 1        | 5,06      | 5,16      | 5,08      | 5,10  | 0,00      |
| 2        | 5,05      | 5,34      | 5,07      | 5,15  | 0,03      |
| 3        | 41,05     | 41,54     | 41,28     | 41,29 | 0,06      |
| 4        | 40,72     | 41,02     | 40,68     | 40,81 | 0,03      |
| 5        | 40,11     | 39,01     | 39,84     | 39,65 | 0,33      |
| 6        | 5,11      | 5,12      | 5,08      | 5,10  | 0,00      |
| 7        | 850       | 850       | 850       | 850   | 0,00      |

**Tabela 48 – Medições perfil C40X40X5X5-750-3.**

| 40n750-1 |           |           |           |       |           |
|----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Medida   | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média | Variância |
| 1        | 4,73      | 4,73      | 4,98      | 4,81  | 0,02      |
| 2        | 5,00      | 4,80      | 4,86      | 4,89  | 0,01      |
| 3        | 39,48     | 39,50     | 39,73     | 39,57 | 0,02      |
| 4        | 42,20     | 42,43     | 42,19     | 42,27 | 0,02      |
| 5        | 40,78     | 39,98     | 40,31     | 40,36 | 0,16      |
| 6        | 4,87      | 5,01      | 4,82      | 4,90  | 0,01      |
| 7        | 850       | 850       | 850       | 850   | 0,00      |

**Tabela 49 – Medições perfil C40X40X5X5-750-4.**

| 40n750-2 |           |           |           |       |           |
|----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Medida   | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média | Variância |
| 1        | 5,06      | 5,13      | 5,13      | 5,11  | 0,00      |
| 2        | 5,15      | 5,43      | 5,08      | 5,22  | 0,03      |
| 3        | 41,54     | 41,04     | 41,45     | 41,34 | 0,07      |
| 4        | 40,97     | 40,94     | 40,94     | 40,95 | 0,00      |
| 5        | 38,93     | 40,76     | 39,18     | 39,62 | 0,98      |
| 6        | 5,09      | 5,24      | 5,12      | 5,15  | 0,01      |
| 7        | 850       | 850       | 850       | 850   | 0,00      |

**Tabela 50 – Medições perfil C40X40X5X5-1500-1.**

| 40u1500-1 |           |           |           |       |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Medida    | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média | Variância |
| 1         | 5,11      | 5,11      | 5,11      | 5,11  | 0,00      |
| 2         | 5,14      | 5,14      | 5,10      | 5,13  | 0,00      |
| 3         | 41,37     | 41,09     | 41,38     | 41,28 | 0,03      |
| 4         | 40,82     | 40,95     | 40,42     | 40,73 | 0,08      |
| 5         | 39,14     | 39,25     | 39,44     | 39,28 | 0,02      |
| 6         | 5,32      | 5,14      | 5,18      | 5,21  | 0,01      |
| 7         | 1600      | 1600      | 1600      | 1600  | 0,00      |

**Tabela 51 – Medições perfil C40X40X5X5-1500-2.**

| 40u1500-2 |           |           |           |       |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Medida    | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média | Variância |
| 1         | 5,15      | 5,09      | 5,19      | 5,14  | 0,00      |
| 2         | 5,18      | 5,28      | 5,20      | 5,22  | 0,00      |
| 3         | 39,44     | 40,76     | 40,26     | 40,15 | 0,44      |
| 4         | 42,01     | 41,18     | 40,62     | 41,27 | 0,49      |
| 5         | 40,52     | 40,57     | 40,33     | 40,47 | 0,02      |
| 6         | 5,13      | 5,37      | 5,23      | 5,24  | 0,01      |
| 7         | 1600      | 1600      | 1600      | 1600  | 0,00      |

**Tabela 52 – Medições perfil C40X40X5X5-1500-3.**

| 40n1500-1 |           |           |           |       |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Medida    | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média | Variância |
| 1         | 5,08      | 5,12      | 5,17      | 5,12  | 0,00      |
| 2         | 5,10      | 5,17      | 5,06      | 5,11  | 0,00      |
| 3         | 40,86     | 40,45     | 40,35     | 40,55 | 0,07      |
| 4         | 42,35     | 42,37     | 41,64     | 42,12 | 0,17      |
| 5         | 40,03     | 39,30     | 39,12     | 39,48 | 0,23      |
| 6         | 5,16      | 5,15      | 5,13      | 5,15  | 0,00      |
| 7         | 1600      | 1600      | 1600      | 1600  | 0,00      |

**Tabela 53 – Medições perfil C40X40X5X5-1500-4.**

| 40n1500-2 |           |           |           |       |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Medida    | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média | Variância |
| 1         | 5,13      | 5,30      | 5,14      | 5,19  | 0,01      |
| 2         | 5,08      | 5,06      | 5,09      | 5,08  | 0,00      |
| 3         | 40,45     | 40,66     | 41,25     | 40,79 | 0,17      |
| 4         | 40,45     | 40,62     | 40,68     | 40,58 | 0,01      |
| 5         | 39,31     | 39,10     | 39,46     | 39,29 | 0,03      |
| 6         | 5,09      | 5,15      | 5,25      | 5,16  | 0,01      |
| 7         | 1600      | 1600      | 1600      | 1600  | 0,00      |

**Tabela 54 – Medições perfil C80X80X3X3-1500-1.**

| 80u1500-1 |           |           |           |       |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Medida    | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média | Variância |
| 1         | 3,31      | 3,53      | 3,21      | 3,35  | 0,03      |
| 2         | 3,20      | 3,37      | 3,21      | 3,26  | 0,01      |
| 3         | 80,50     | 81,09     | 80,92     | 80,84 | 0,09      |
| 4         | 81,80     | 82,10     | 81,83     | 81,91 | 0,03      |
| 5         | 80,26     | 80,59     | 80,27     | 80,37 | 0,04      |
| 6         | 3,33      | 3,36      | 3,22      | 3,30  | 0,01      |
| 7         | 1610      | 1610      | 1610      | 1610  | 0,00      |

**Tabela 55 – Medições perfil C80X80X3X3-1500-2.**

| 80u1500-2 |           |           |           |       |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Medida    | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média | Variância |
| 1         | 3,30      | 3,22      | 3,34      | 3,29  | 0,00      |
| 2         | 3,27      | 3,20      | 3,20      | 3,22  | 0,00      |
| 3         | 81,59     | 81,09     | 81,59     | 81,42 | 0,08      |
| 4         | 81,77     | 80,94     | 81,78     | 81,50 | 0,23      |
| 5         | 80,75     | 81,25     | 80,55     | 80,85 | 0,13      |
| 6         | 3,19      | 3,20      | 3,23      | 3,21  | 0,00      |
| 7         | 1610      | 1610      | 1610      | 1610  | 0,00      |

**Tabela 56 – Medições perfil C80X80X3X3-1500-3.**

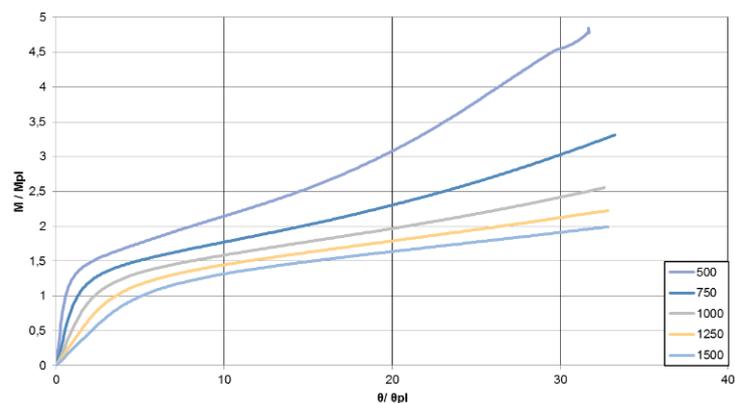
| 80n1500-1 |           |           |           |       |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Medida    | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média | Variância |
| 1         | 3,24      | 3,19      | 3,28      | 3,24  | 0,00      |
| 2         | 3,27      | 3,17      | 3,25      | 3,23  | 0,00      |
| 3         | 81,30     | 81,32     | 81,77     | 81,46 | 0,07      |
| 4         | 81,43     | 81,71     | 81,14     | 81,43 | 0,08      |
| 5         | 80,53     | 81,25     | 81,08     | 80,95 | 0,14      |
| 6         | 3,17      | 3,30      | 3,20      | 3,22  | 0,00      |
| 7         | 1600      | 1600      | 1600      | 1600  | 0,00      |

**Tabela 57 – Medições perfil C80X80X3X3-1500-4.**

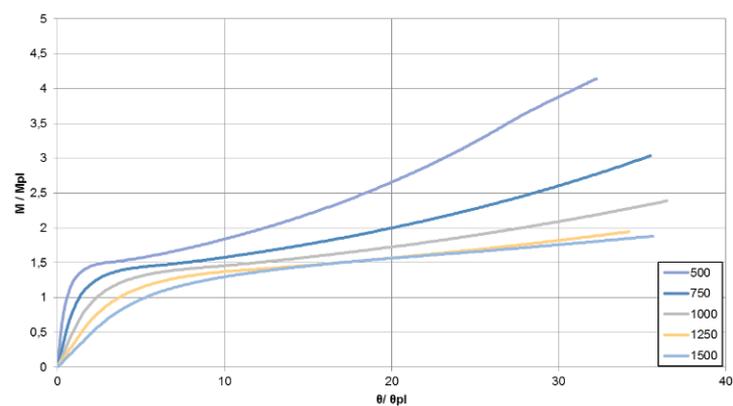
| 80n1500-2 |           |           |           |       |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Medida    | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média | Variância |
| 1         | 3,31      | 3,62      | 3,25      | 3,39  | 0,04      |
| 2         | 3,21      | 3,56      | 3,20      | 3,32  | 0,04      |
| 3         | 82,07     | 81,72     | 81,79     | 81,86 | 0,03      |
| 4         | 81,00     | 81,77     | 81,12     | 81,30 | 0,17      |
| 5         | 80,53     | 80,24     | 80,22     | 80,33 | 0,03      |
| 6         | 3,20      | 3,31      | 3,21      | 3,24  | 0,00      |
| 7         | 1610      | 1610      | 1610      | 1610  | 0,00      |

## APÊNDICE C

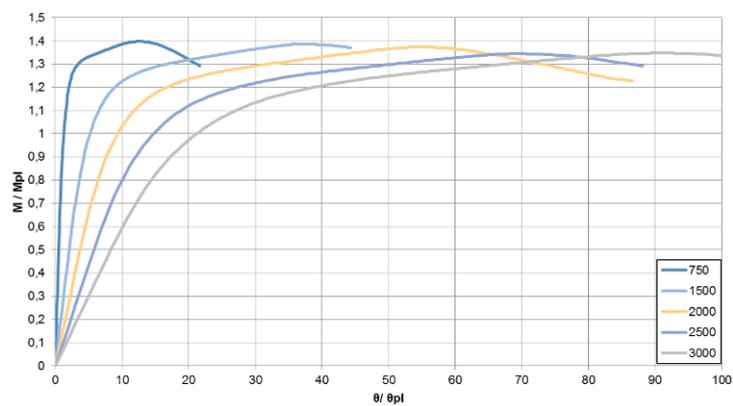
Da Figura 105 a Figura 121 são apresentadas as curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  de todas os modelos estudados para análise paramétrica deste trabalho.



C40X40X2X2-n

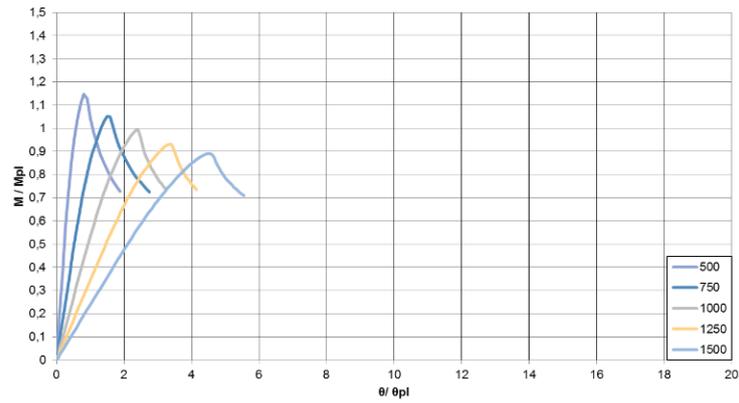


C75X40X2X2-n

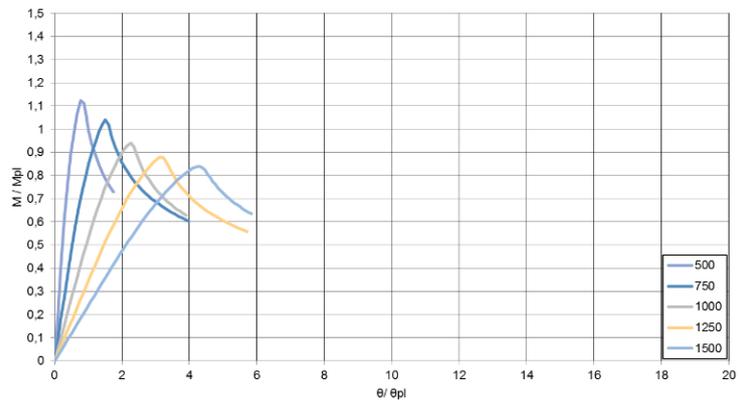


C75X75X2X2-n

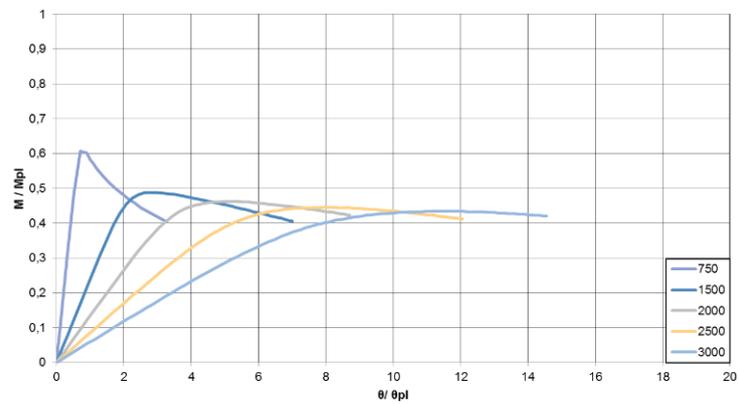
Figura 105 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 2 mm – parte 1, posição "n".



C40X40X2X2-u

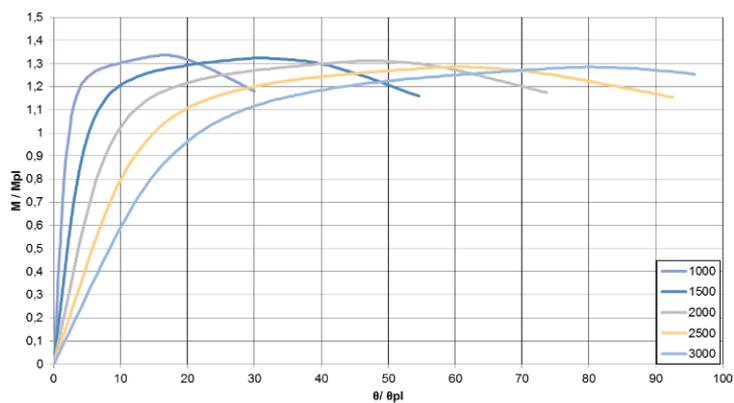


C75X40X2X2-u

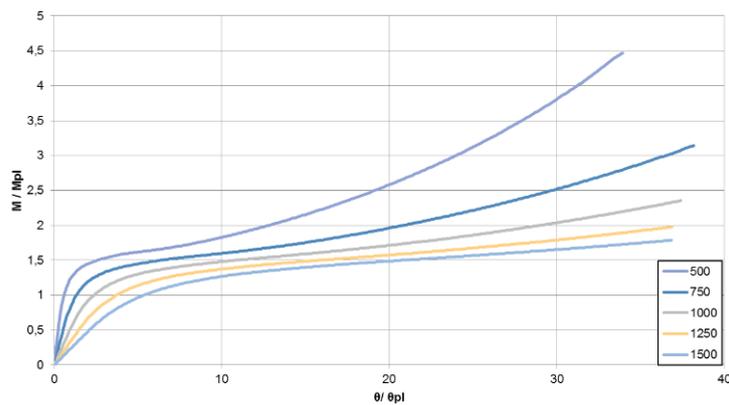


C75X75X2X2-u

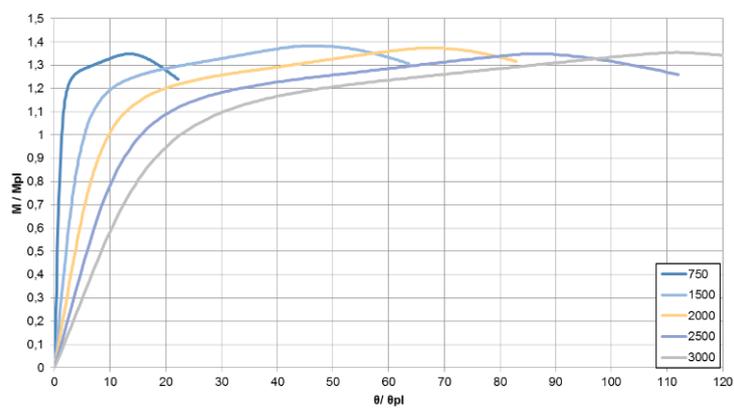
Figura 106 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 2 mm – parte 1, posição "u".



C80X80X2X2-n

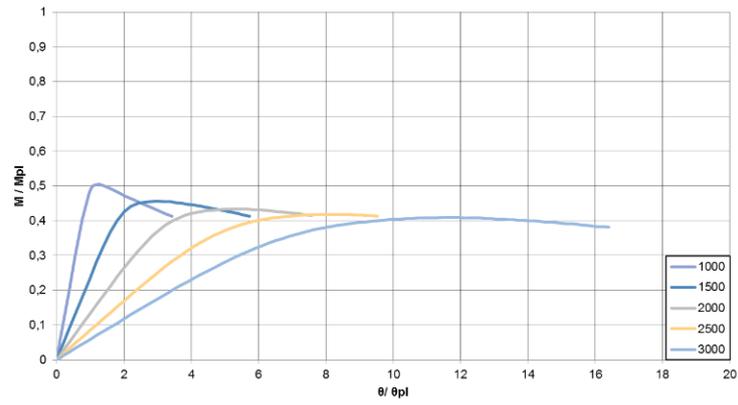


C100X40X2X2-n

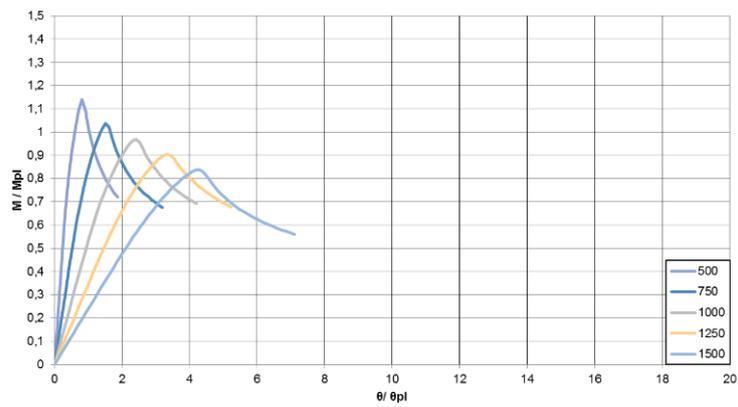


C100X75X2X2-n

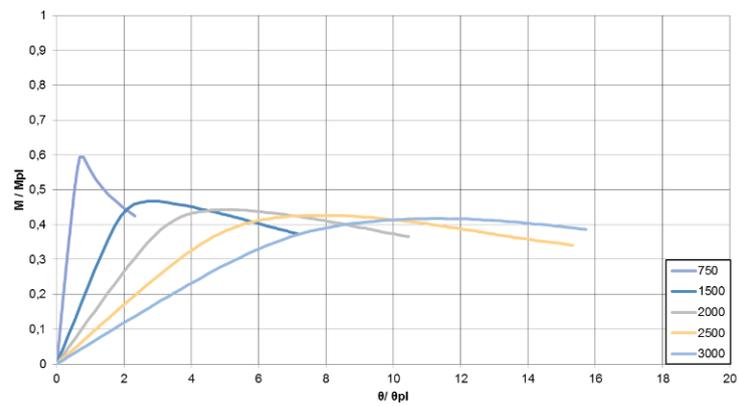
Figura 107 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 2 mm – parte 2, posição "n".



C80X80X2X2-u

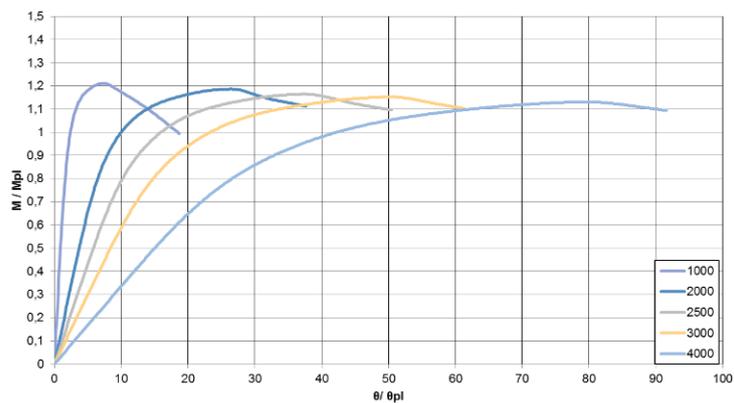


C100X40X2X2-u

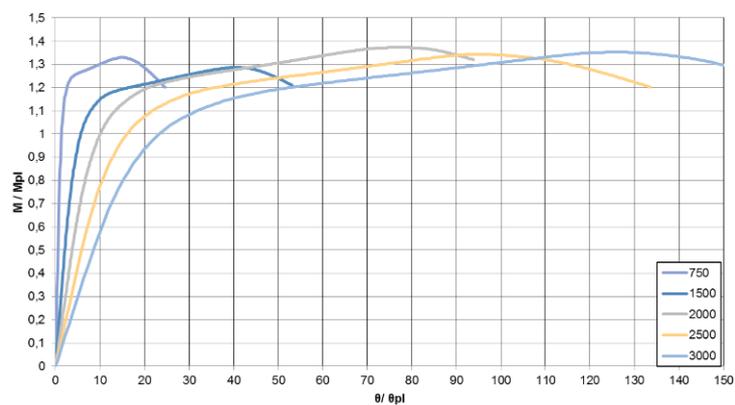


C100X75X2X2-u

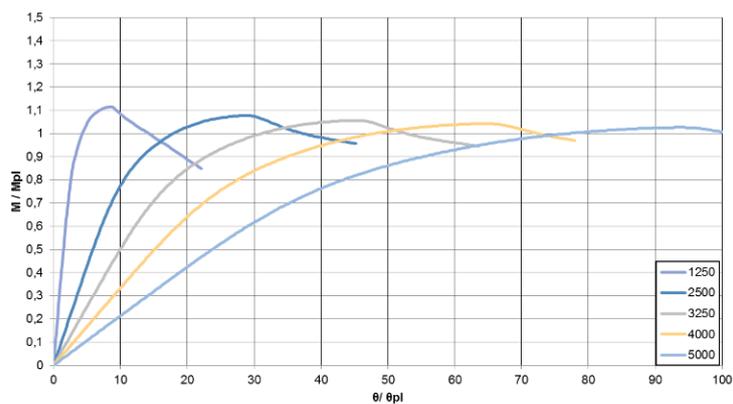
Figura 108 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 2 mm – parte 2, posição "u".



C100X100X2X2-n

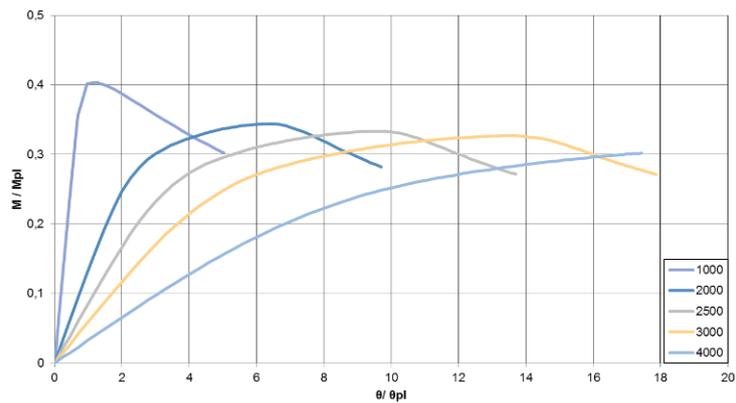


C125X75X2X2-n

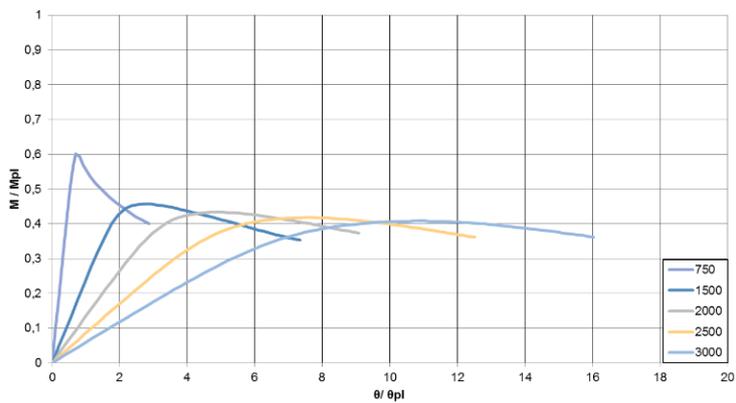


C125X125X2X2-n

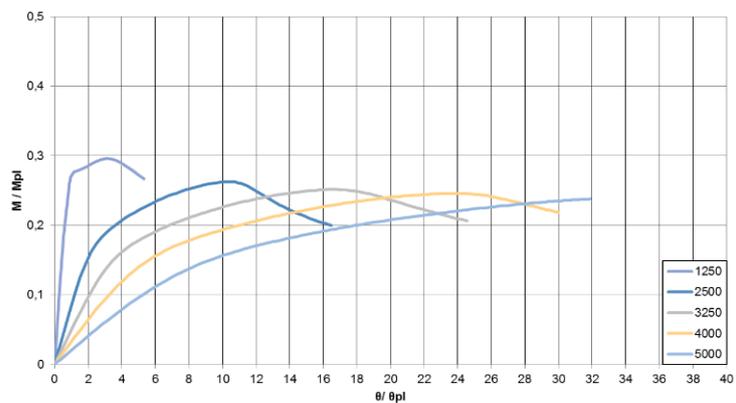
**Figura 109 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 2 mm – parte 3, posição "n".**



C100X100X2X2-u

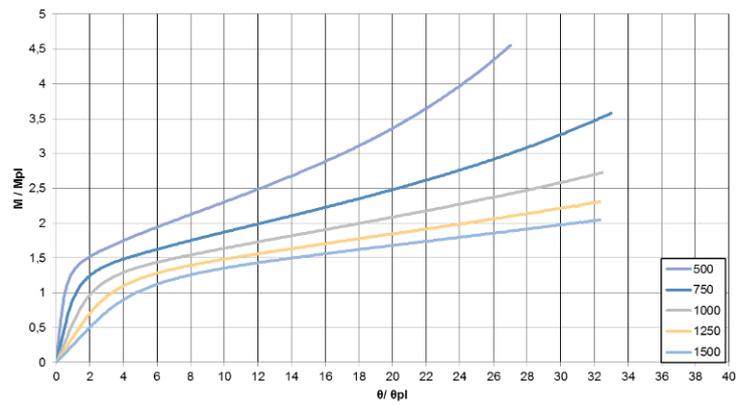


C125X75X2X2-u

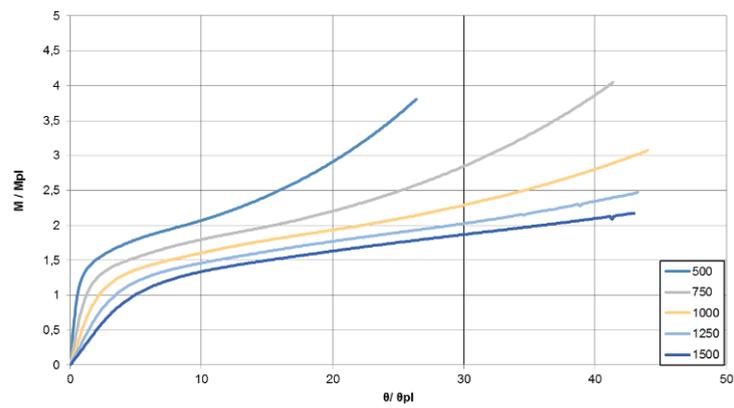


C125X125X2X2-u

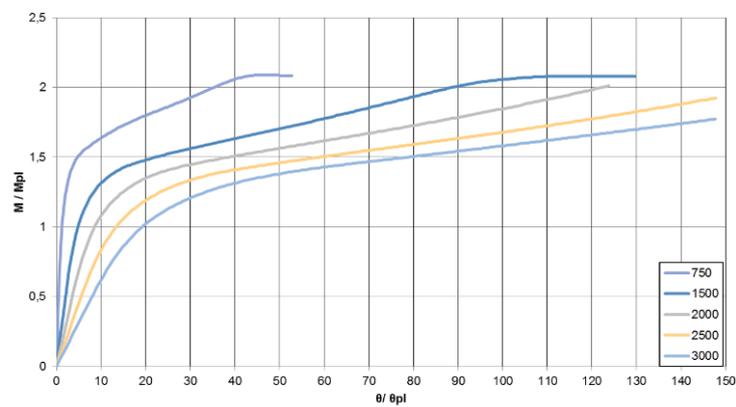
Figura 110 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 2 mm – parte 3, posição "u".



C40X40X3,35x3,35-n

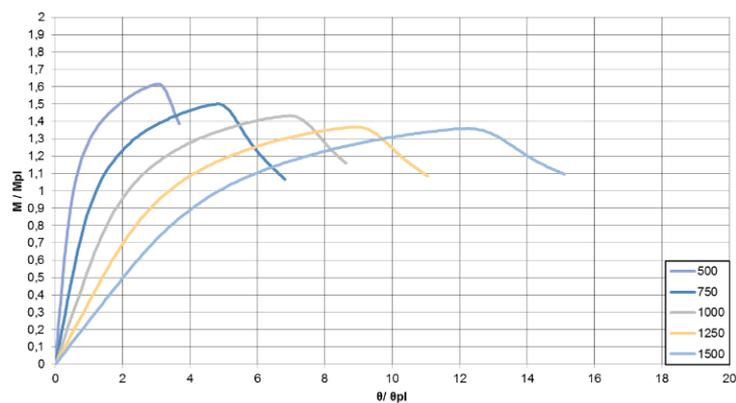


C75X40X3,35x3,35-n

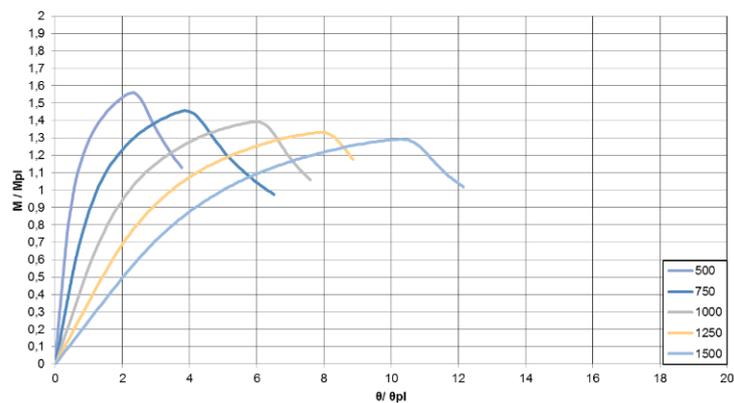


C75X75X3,35x3,35-n

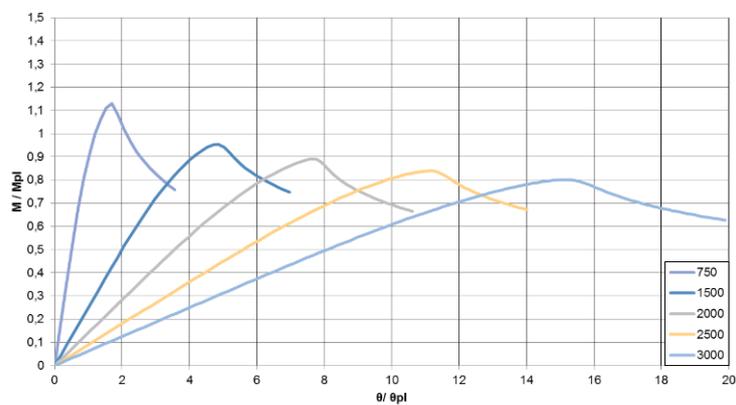
Figura 111 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 3,35 mm – parte 1, posição "n".



C40X40X3,35x3,35-u

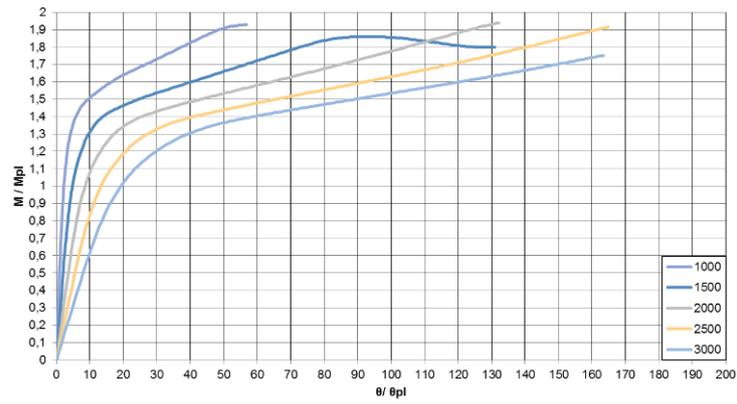


C75X40X3,35x3,35-u

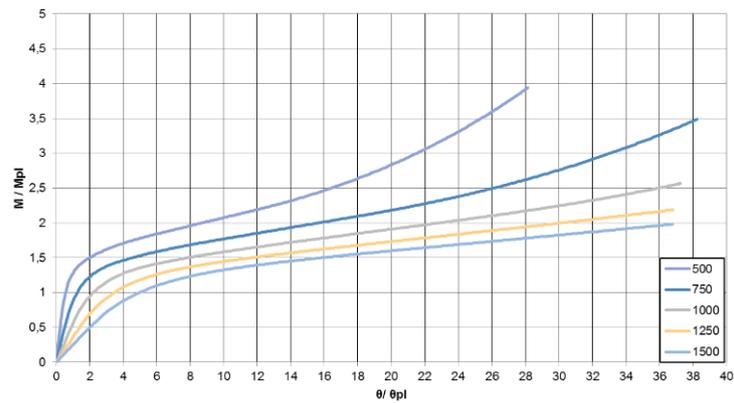


C75X75X3,35x3,35-u

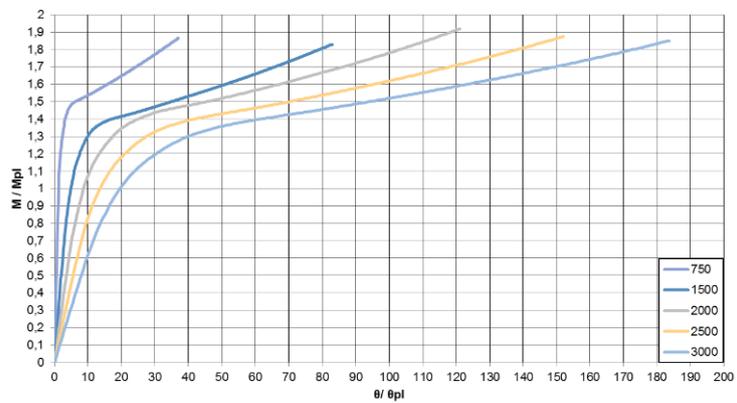
Figura 112 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 3,35 mm – parte 1, posição "u".



C80X80X3,35x3,35-n

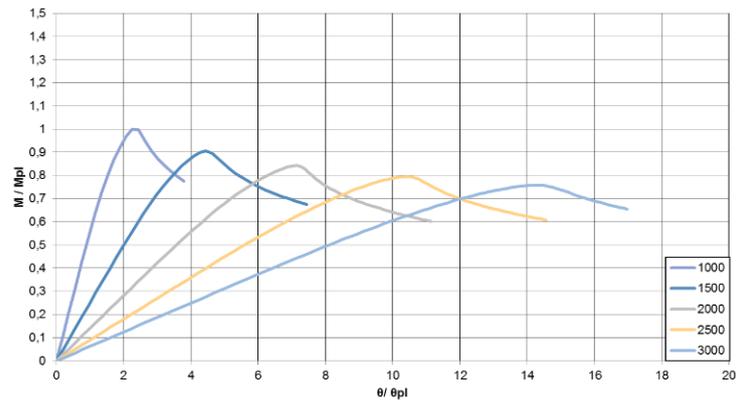


C100X40X3,35x3,35-n

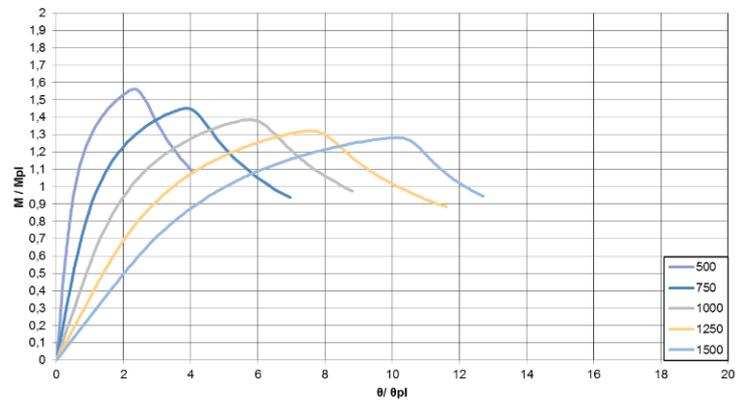


C100X75X3,35x3,35-n

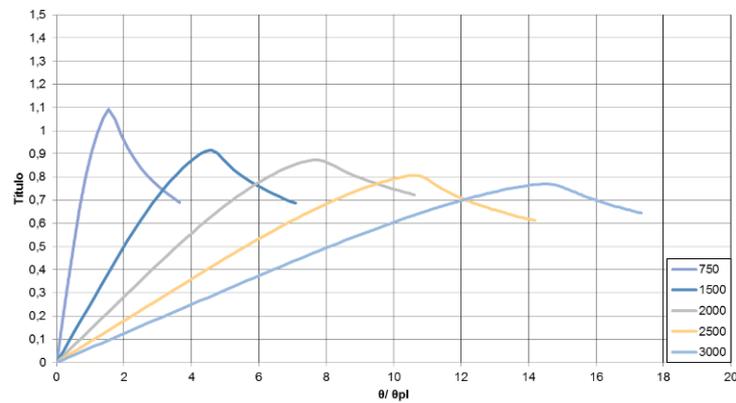
**Figura 113 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 3,35 mm – parte 2, posição "n".**



C80X80X3,35x3,35-u

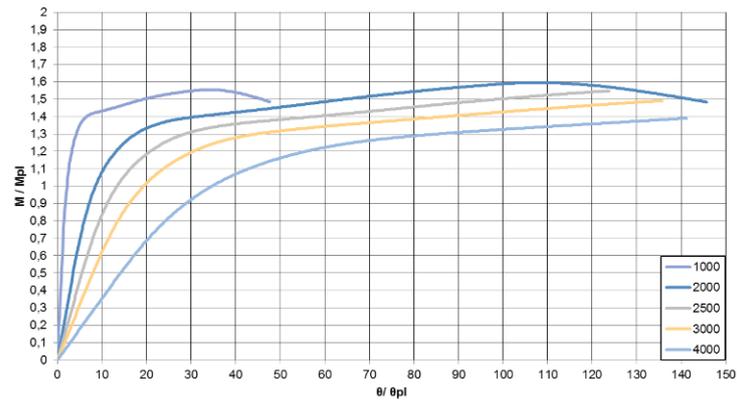


C100X40X3,35x3,35-u

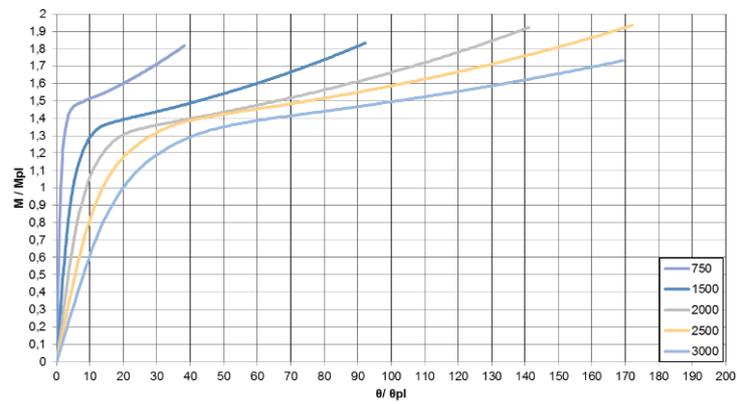


C100X75X3,35x3,35-u

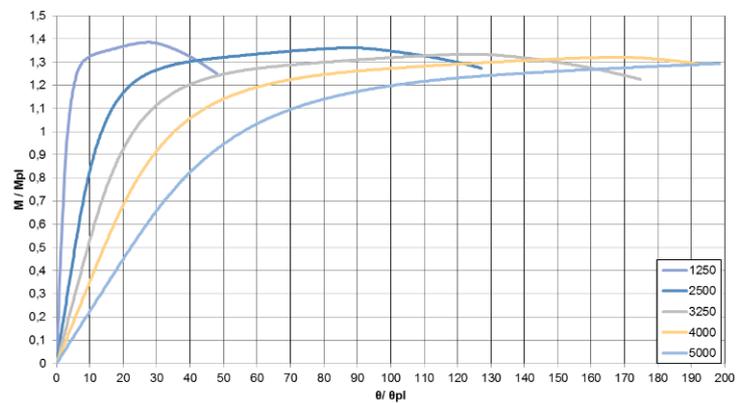
Figura 114 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 3,35 mm – parte 2, posição "u".



C100X100X3,35x3,35-n

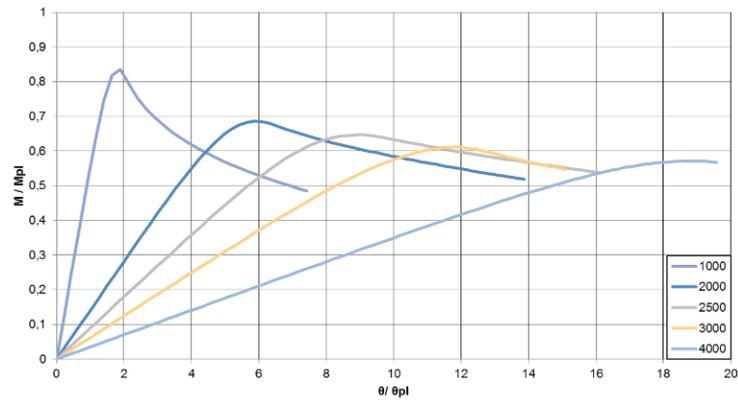


C125X75X3,35x3,35-n

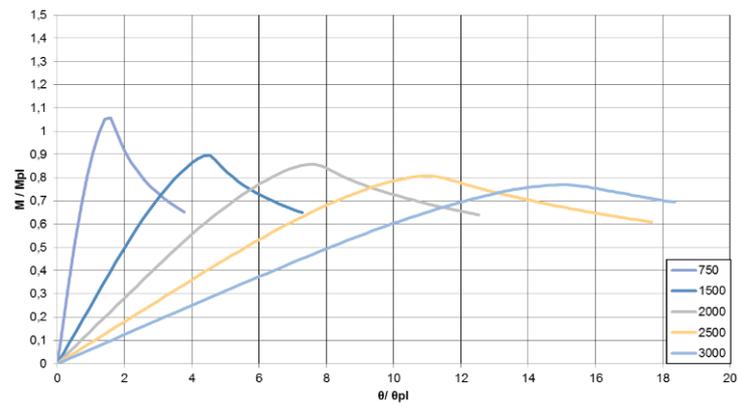


C125X125X3,35x3,35-n

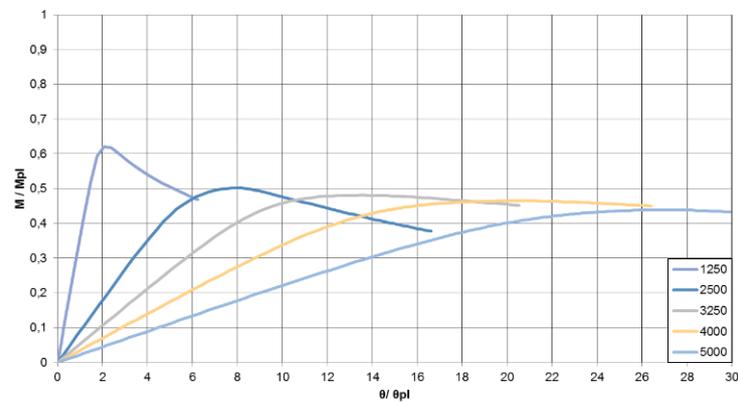
Figura 115 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 3,35 mm – parte 3, posição "n".



C100X100X3,35x3,35-u

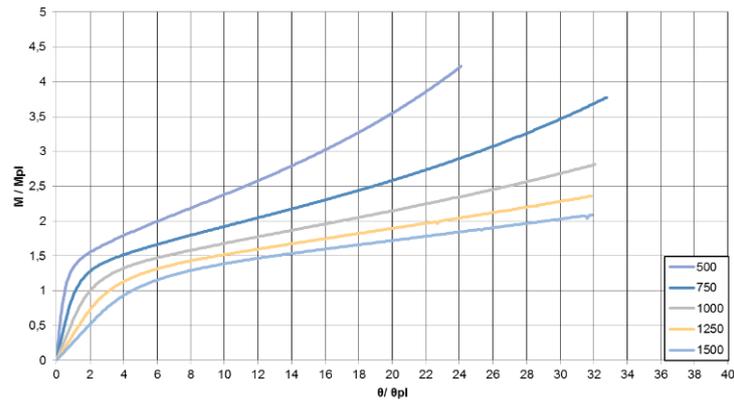


C125X75X3,35x3,35-u

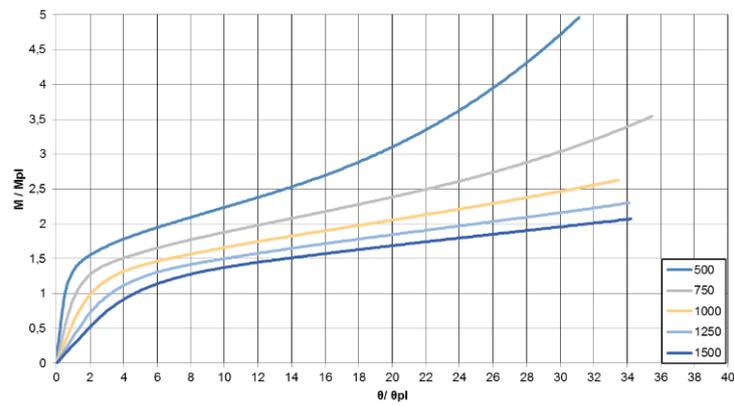


C125X125X3,35x3,35-u

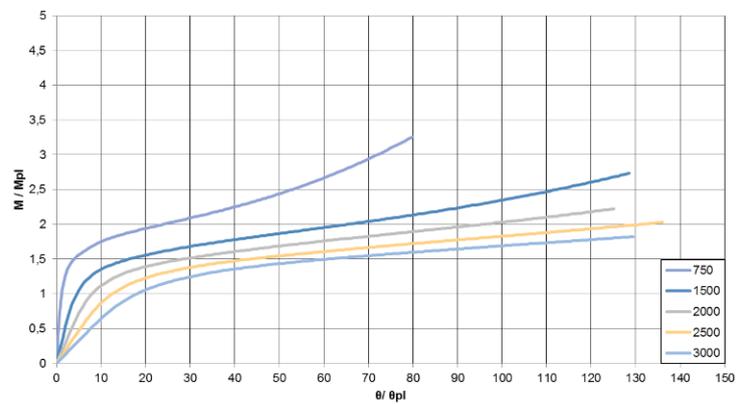
Figura 116 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 3,35 mm – parte 3, posição "u".



C40X40X4,75x4,75-n

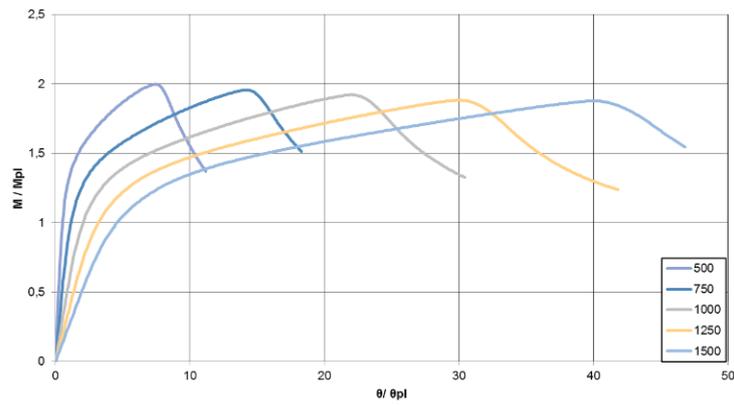


C75X40X4,75x4,75-n

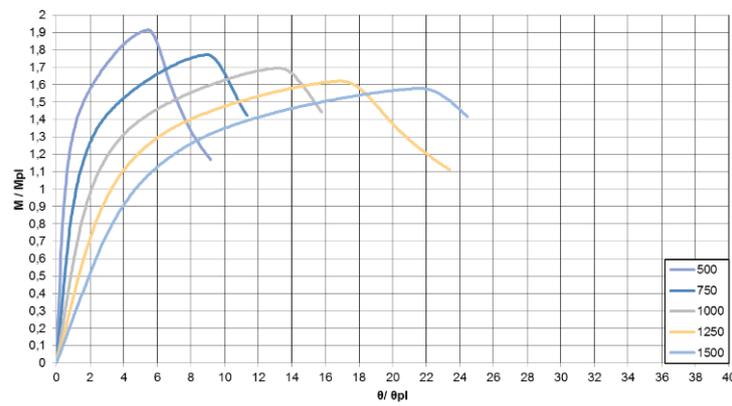


C75X75X4,75x4,75-n

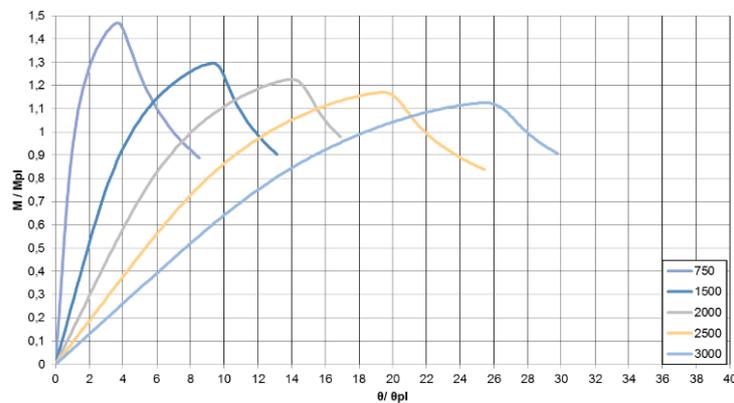
Figura 117 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 4,75 mm – parte 1, posição "n".



C40X40X4,75x4,75-u

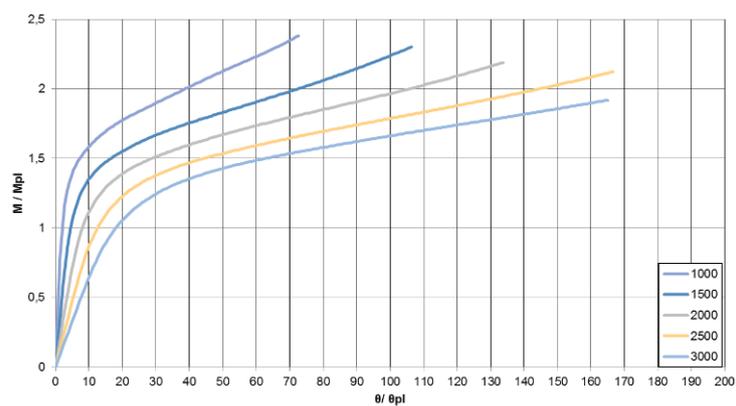


C75X40X4,75x4,75-u

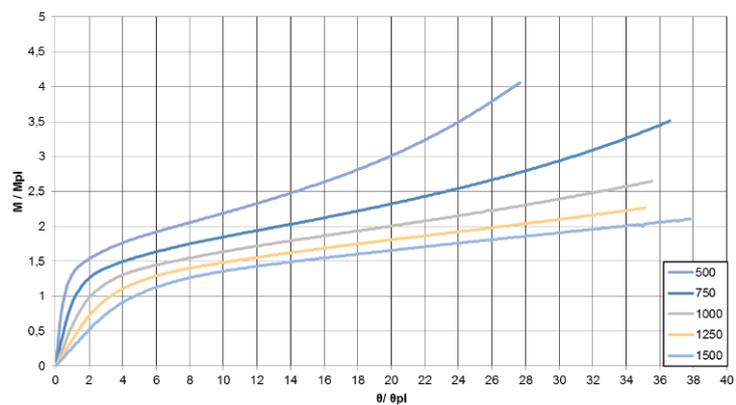


C75X75X4,75x4,75-u

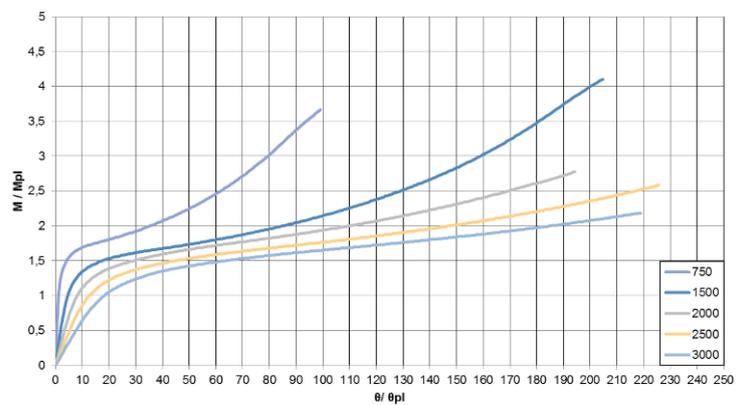
Figura 118 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 4,75 mm – parte 1, posição "u".



C80X80X4,75x4,75-n

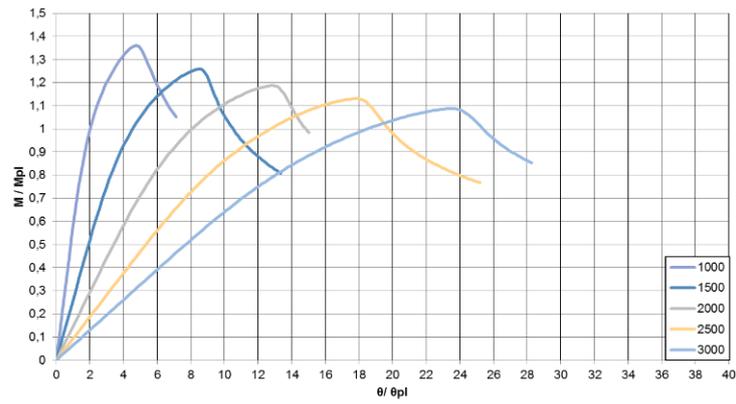


C100X40X4,75x4,75-n

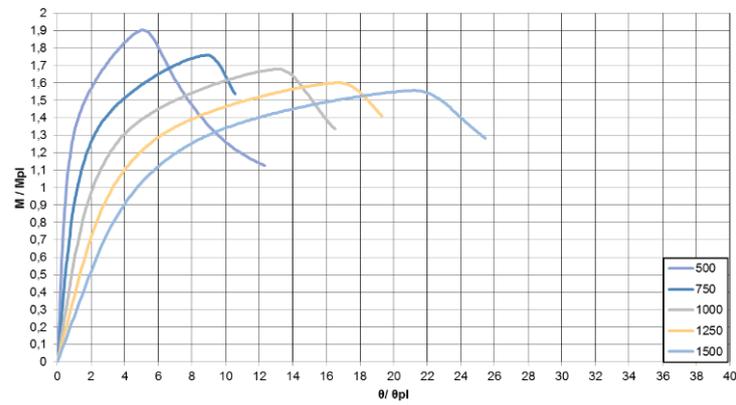


C100X75X4,75x4,75-n

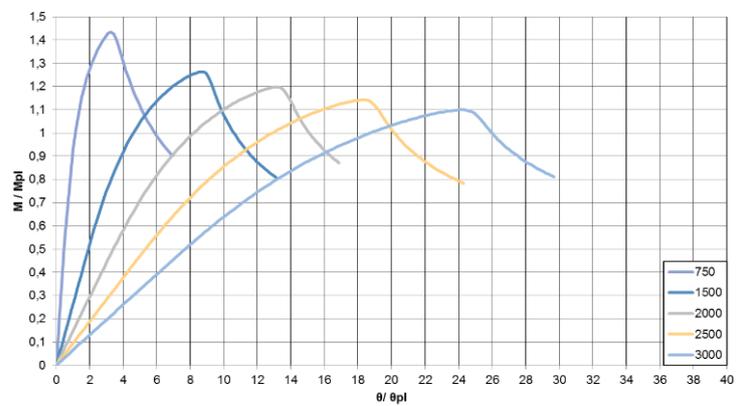
Figura 119 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 4,75 mm – parte 2, posição "n".



C80X80X4,75x4,75-u

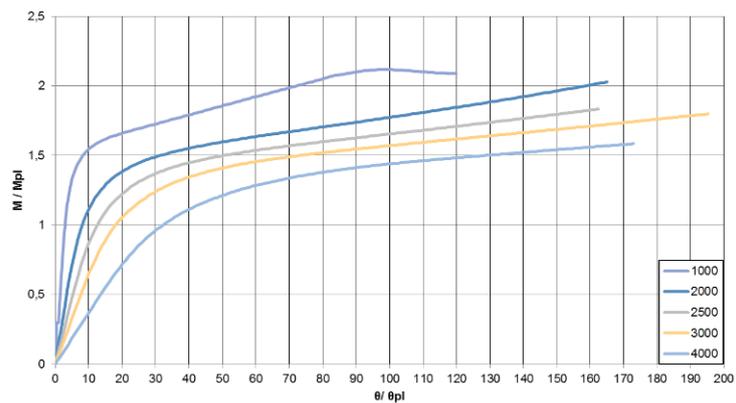


C100X40X4,75x4,75-u

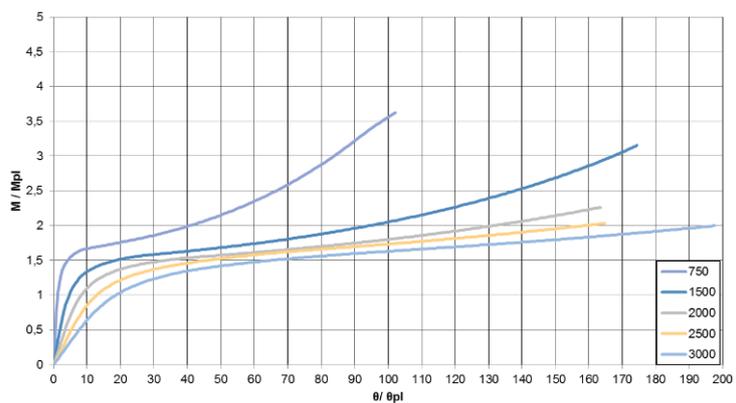


C100X75X4,75x4,75-u

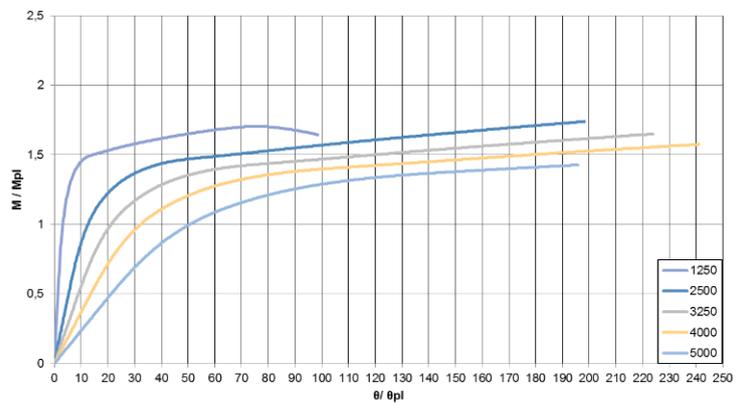
**Figura 120 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 4,75 mm – parte 2, posição "u".**



C100X100X4,75x4,75-n

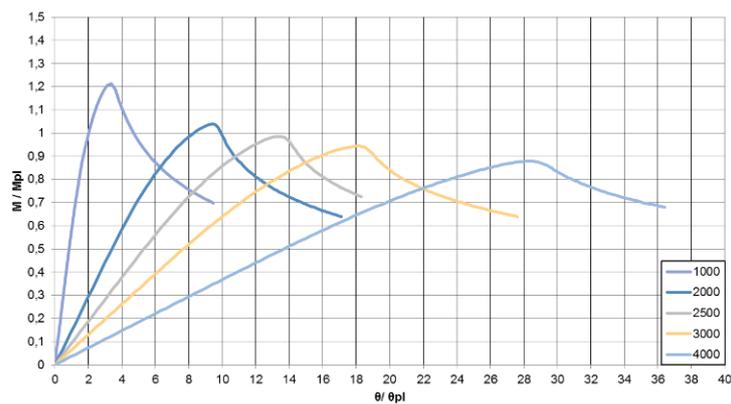


C125X75X4,75x4,75-n

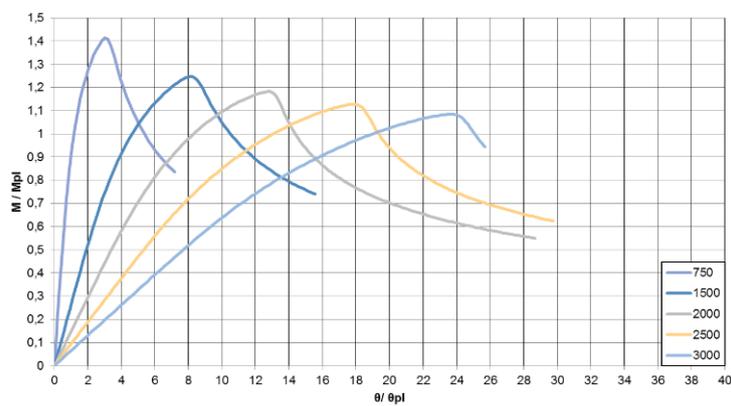


C125X125X4,75x4,75-n

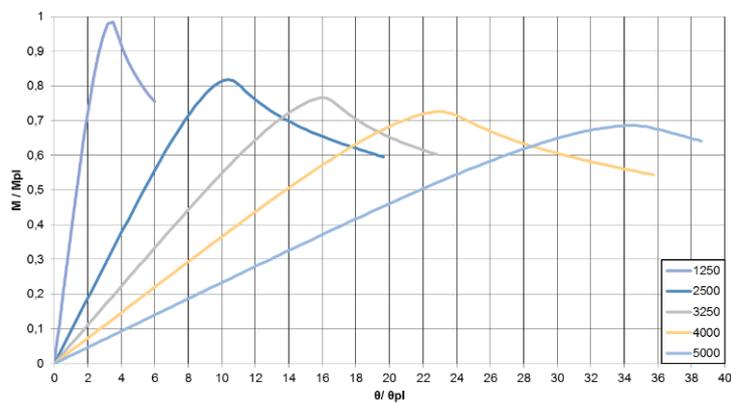
Figura 121 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 4,75 mm – parte 3, posição "n".



C100X100X4,75x4,75-u



C125X75X4,75x4,75-u



C125X125X4,75x4,75-u

Figura 122 – Curvas  $M/M_{pl}$  versus  $\theta/\theta_{pl}$  dos perfis com espessura de 4,75 mm – parte 3, posição "u".

## APÊNDICE D

O Apêndice D mostra, por meio da Tabela 58 até a Tabela 65, os resultados encontrados para os dimensionamentos segundo o Eurocode 3 – Parte 1.4 [17] e (CSM) [18]-[21], e também os resultados encontrados para as análises numéricas desenvolvidas no ANSYS 12.0 [9] para os diversos perfis e vãos estudados.

**Tabela 58 – Resultados para perfis com mesa igual a 40 mm – Parte 1.**

| Perfis                           |      | 40x40x 2x2-u | 40x40x 2x2-n | 40x40x 3,35x3,35-u | 40x40x 3,35x3,35-n | 40x40x 4,75x4,75-u | 40x40x 4,75x4,75-n | 40x40x 5x5-u |
|----------------------------------|------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| Resultados teóricos              | EC3  | 0,52         | 0,94         | 1,62               | 1,62               | 2,38               | 2,38               | 2,72         |
|                                  | CSM  | 0,43         | 0,91         | 1,37               | 1,58               | 2,33               | 2,33               | 2,66         |
| Resultados numéricos (vão em mm) | 500  | 0,86         | 1,55         | 2,10               | 2,68               | 3,80               | 3,88               | 5,34         |
|                                  | 750  | 0,79         | 1,44         | 1,95               | 2,46               | 3,72               | 3,50               | 5,02         |
|                                  | 1000 | 0,74         | 1,34         | 1,86               | 2,25               | 3,66               | 3,22               | 4,91         |
|                                  | 1250 | 0,70         | 1,28         | 1,78               | 2,16               | 3,58               | 3,16               | 4,81         |
|                                  | 1500 | 0,67         | 1,22         | 1,77               | 2,08               | 3,57               | 2,99               | 4,78         |
| $\bar{\lambda}_p$                |      | 0,68         | 0,25         | 0,41               | 0,15               | 0,29               | 0,11               | 0,28         |

Tabela 59 – Resultados para perfis com mesa igual a 40 mm – Parte 2.

| Perfis                            |      | 40x40x 5x5-n | 75x40x 2x2-u | 75x40x 2x2-n | 75x40x 3,35x3,35-u | 75x40x 3,35x3,35-n | 75x40x 4,75x4,75-u | 75x40x 4,75x4,75-n |
|-----------------------------------|------|--------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Resultados teóricos               | EC3  | 2,72         | 0,59         | 1,08         | 1,04               | 1,88               | 2,77               | 2,77               |
|                                   | CSM  | 2,66         | 0,47         | 0,93         | 1,55               | 1,81               | 2,69               | 2,69               |
| Resultados numéricos (vãos em mm) | 500  | 4,78         | 0,97         | 1,32         | 2,34               | 2,67               | 4,24               | 4,16               |
|                                   | 750  | 4,72         | 0,90         | 1,29         | 2,19               | 2,57               | 3,92               | 4,18               |
|                                   | 1000 | 4,13         | 0,81         | 1,24         | 2,09               | 2,57               | 3,75               | 3,87               |
|                                   | 1250 | 3,95         | 0,76         | 1,19         | 2,00               | 2,46               | 3,59               | 3,74               |
|                                   | 1500 | 3,87         | 0,72         | 1,31         | 1,94               | 2,45               | 3,49               | 3,47               |
| $\bar{\lambda}_p$                 |      | 0,10         | 0,70         | 0,39         | 0,42               | 0,24               | 0,30               | 0,18               |

Tabela 60 – Resultados para perfis com mesa igual a 40 mm – Parte 3.

| Perfis                            |      | 100x40x 2x2-u | 100x40x 2x2-n | 100x40x 3,35x3,35-u | 100x40x 3,35x3,35-n | 100x40x 4,75x4,75-u | 100x40x 4,75x4,75-n |
|-----------------------------------|------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Resultados teóricos               | EC3  | 0,58          | 1,09          | 1,08                | 1,92                | 2,86                | 2,86                |
|                                   | CSM  | 0,49          | 0,86          | 1,59                | 1,86                | 2,78                | 2,78                |
| Resultados numéricos (vãos em mm) | 500  | 1,00          | 1,41          | 2,40                | 2,81                | 4,36                | 4,30                |
|                                   | 750  | 0,91          | 1,41          | 2,23                | 2,80                | 4,03                | 4,13                |
|                                   | 1000 | 0,85          | 1,30          | 2,13                | 2,69                | 3,85                | 4,04                |
|                                   | 1250 | 0,79          | 1,28          | 2,03                | 2,66                | 3,67                | 3,92                |
|                                   | 1500 | 0,73          | 1,30          | 1,97                | 2,64                | 3,56                | 3,87                |
| $\bar{\lambda}_p$                 |      | 0,70          | 0,48          | 0,43                | 0,30                | 0,30                | 0,22                |

Tabela 61 – Resultados para perfis com mesa igual a 75 mm – Parte 1.

| Perfis                            |      | 75x75x 2x2-u | 75x75x 2x2-n | 100x75x 2x2-u | 100x75x 2x2-n | 100x75x 3,35x3,35-u | 100x75x 3,35x3,35-n | 100x75x 4,75x4,75-u |
|-----------------------------------|------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Resultados teóricos               | EC3  | 0,73         | 3,39         | 0,83          | 3,67          | 3,16                | 6,47                | 5,38                |
|                                   | CSM  | 1,00         | 2,70         | 1,03          | 2,46          | 2,66                | 5,94                | 6,71                |
| Resultados numéricos (vãos em mm) | 750  | 1,65         | 3,79         | 1,74          | 3,96          | 5,65                | 8,49                | 11,11               |
|                                   | 1500 | 1,32         | 3,76         | 1,37          | 4,06          | 4,75                | 7,77                | 9,78                |
|                                   | 2000 | 1,25         | 3,72         | 1,30          | 4,03          | 4,53                | 7,77                | 9,27                |
|                                   | 2500 | 1,21         | 3,65         | 1,25          | 3,96          | 4,18                | 7,61                | 8,84                |
|                                   | 3000 | 1,18         | 3,65         | 1,22          | 3,97          | 3,98                | 7,51                | 8,51                |
| $\bar{\lambda}_p$                 |      | 1,26         | 0,46         | 1,29          | 0,57          | 0,78                | 0,35                | 0,56                |

Tabela 62 – Resultados para perfis com mesa igual a 75 mm – Parte 2.

| Perfis                            |      | 100x75x 4,75x4,75-n | 125x75x 2x2-u | 125x75x 2x2-n | 125x75x 3,35x3,35-u | 125x75x 3,35x3,35-n | 125x75x 4,75x4,75-u | 125x75x 4,75x4,75-n |
|-----------------------------------|------|---------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Resultados teóricos               | EC3  | 9,67                | 0,81          | 3,83          | 3,22                | 6,77                | 5,57                | 10,13               |
|                                   | CSM  | 9,40                | 1,06          | 1,81          | 2,73                | 5,70                | 6,93                | 9,83                |
| Resultados numéricos (vãos em mm) | 750  | 12,77               | 1,84          | 4,05          | 5,73                | 8,72                | 11,46               | 13,62               |
|                                   | 1500 | 11,69               | 1,40          | 3,94          | 4,85                | 8,12                | 10,11               | 13,13               |
|                                   | 2000 | 11,69               | 1,33          | 3,87          | 4,65                | 7,85                | 9,59                | 12,89               |
|                                   | 2500 | 11,61               | 1,28          | 3,87          | 4,37                | 7,80                | 9,14                | 12,89               |
|                                   | 3000 | 11,53               | 1,25          | 3,93          | 4,17                | 7,75                | 8,79                | 13,21               |
| $\bar{\lambda}_p$                 |      | 0,25                | 1,31          | 0,68          | 0,79                | 0,41                | 0,56                | 0,29                |

Tabela 63 – Resultados para perfis com mesa igual a 80 mm.

| Perfis                            |      | 80x80x 2x2-u | 80x80x 2x2-n | 80x80x 3x3-u | 80x80x 3x3-n | 80x80x 3,35x3,35-u | 80x80x 3,35x3,35-n | 80x80x 4,75x4,75-u | 80x80x 4,75x4,75-n |
|-----------------------------------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Resultados teóricos               | EC3  | 0,84         | 2,21         | 3,25         | 6,80         | 3,34               | 6,82               | 5,85               | 10,19              |
|                                   | CSM  | 1,08         | 2,97         | 2,72         | 6,62         | 2,80               | 6,63               | 6,70               | 9,96               |
| Resultados numéricos (vãos em mm) | 1000 | 1,56         | 4,13         | 5,41         | 9,08         | 5,45               | 9,16               | 11,09              | 14,59              |
|                                   | 1500 | 1,41         | 4,09         | 4,82         | 8,43         | 4,94               | 8,62               | 10,25              | 14,43              |
|                                   | 2000 | 1,34         | 4,05         | 4,47         | 8,16         | 4,60               | 8,29               | 9,68               | 14,18              |
|                                   | 2500 | 1,29         | 3,97         | 4,21         | 7,89         | 4,33               | 8,07               | 9,22               | 13,86              |
|                                   | 3000 | 1,26         | 3,97         | 4,00         | 7,24         | 4,14               | 7,85               | 8,86               | 13,53              |
| $\bar{\lambda}_p$                 |      | 1,36         | 0,49         | 0,86         | 0,32         | 0,82               | 0,30               | 0,59               | 0,21               |

Tabela 64 – Resultados para perfis com mesa igual a 100 mm.

| Perfis                            |      | 100x100x 2x2-u | 100x100x 2x2-n | 100x100x 3,35x3,35-u | 100x100x 3,35x3,35-n | 100x100x 4,75x4,75-u | 100x100x 4,75x4,75-n |
|-----------------------------------|------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Resultados teóricos               | EC3  | 0,83           | 3,47           | 3,88                 | 10,75                | 8,47                 | 16,14                |
|                                   | CSM  | 1,38           | 3,67           | 3,73                 | 9,51                 | 7,06                 | 15,78                |
| Resultados numéricos (vãos em mm) | 1000 | 1,96           | 5,88           | 7,19                 | 13,34                | 15,65                | 23,11                |
|                                   | 2000 | 1,67           | 5,76           | 5,90                 | 13,68                | 13,43                | 22,08                |
|                                   | 3000 | 1,62           | 5,65           | 5,57                 | 12,99                | 12,72                | 21,43                |
|                                   | 4000 | 1,59           | 5,60           | 5,26                 | 12,65                | 12,18                | 21,17                |
|                                   | 5000 | 1,47           | 5,49           | 4,91                 | 12,05                | 11,34                | 20,01                |
| $\bar{\lambda}_p$                 |      | 1,71           | 0,62           | 1,04                 | 0,37                 | 0,74                 | 0,26                 |

Tabela 65 – Resultados para perfis com mesa igual a 125 mm.

| Perfis                            |      | 125x125x 2x2-u | 125x125x 2x2-n | 125x125x 3,35x3,35-u | 125x125x 3,35x3,35-n | 125x125x 4,75x4,75-u | 125x125x 4,75x4,75-n |
|-----------------------------------|------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Resultados teóricos               | EC3  | 0,90           | 5,45           | 4,04                 | 16,93                | 11,44                | 25,49                |
|                                   | CSM  | 1,77           | 4,06           | 4,92                 | 13,41                | 9,64                 | 24,18                |
| Resultados numéricos (vãos em mm) | 1250 | 2,26           | 8,50           | 8,42                 | 18,77                | 20,07                | 34,06                |
|                                   | 2500 | 2,00           | 8,21           | 6,80                 | 18,44                | 16,70                | 33,85                |
|                                   | 3250 | 1,92           | 8,05           | 6,52                 | 18,07                | 15,62                | 31,61                |
|                                   | 4000 | 1,88           | 7,94           | 6,30                 | 17,90                | 14,81                | 30,18                |
|                                   | 5000 | 1,81           | 7,82           | 5,94                 | 17,52                | 13,99                | 28,55                |
| $\bar{\lambda}_p$                 |      | 2,14           | 0,77           | 1,29                 | 0,47                 | 0,92                 | 0,33                 |