



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

Flávio Lacerda Torres

**Comportamento estrutural de cantoneiras de aço inoxidável
interconectadas em configuração cruciforme sob compressão axial**

Rio de Janeiro

2022

Flávio Lacerda Torres

**Comportamento estrutural de cantoneiras de aço inoxidável interconectadas
em configuração cruciforme sob compressão axial**

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.

Orientadores: Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco
Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

T693 Torres, Flávio Lacerda.
Comportamento estrutural de cantoneiras de aço inoxidável
interconectadas em configuração cruciforme sob compressão axial
/ Flávio Lacerda Torres. – 2022.
249f.

Orientadores: Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco,
Luciano Rodrigues Ornelas de Lima.

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

1. Engenharia civil - Teses. 2. Aço - Estruturas - Teses. 3.
Colunas metálicas - Teses. 4. Análise estrutural (Engenharia) -
Teses. 5. Aço inoxidável - Teses. I. Vellasco, Pedro Colmar
Gonçalves da Silva. II. Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de. 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

Flávio Lacerda Torres

**Comportamento estrutural de cantoneiras de aço inoxidável interconectadas
em configuração cruciforme sob compressão axial**

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: 18 de março de 2022

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. André Tenchini da Silva
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. Inácio Benvegnu Morsch
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Rio de Janeiro

2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e amigos, pelo apoio incondicional aos meus estudos durante toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por tudo.

A minha esposa, Raquel Negri, por todo afeto, amor e carinho, bem como pela compreensão e incentivo durante os momentos de dificuldade e angústia.

Aos meus amados pais e irmão, por sempre incentivarem a continuidade de meus estudos, sendo responsáveis pela pessoa que sou.

Aos professores Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco e Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, por todo conhecimento, orientação e motivação que sempre me ofereceram. Tenho elevada estima e gratidão por todo o tempo e atenção que me foram dedicados.

Aos amigos Luciano Guimarães Cabral, Paulo Cesar Portugal da Silva, Juliana Teixeira da Matta Xavier que estiveram sempre ao meu lado e me motivaram de forma ímpar durante todo curso de Mestrado.

Aos professores João Fortini Albano e Roberto Rios, ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela confiança e pronto atendimento ao meu pedido de recomendação para o curso de mestrado.

Ao amigo Fernando Rocha Sarquis, pelo imenso apoio ofertado durante o desenvolvimento do presente trabalho.

Aos amigos da turma de mestrado Iuri Gianini, Mateus Nogueira e Lucas Mariano pelo apoio e troca de ideias desde o início do curso.

Aos demais professores do corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UERJ.

A todos aqueles, que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

A Universidade do Estado do Rio de Janeiro, pois sem ela a conclusão deste trabalho e, conseqüentemente, a realização deste sonho, não seriam possíveis.

Cabe aqui tecer algumas palavras em homenagem ao Professor Pedro. Um ser humano gentil, educado, possuidor de um conhecimento ímpar e sempre disposto a ajudar. Como seu aluno, posso dizer, sem sombra de dúvidas, que fui um privilegiado por ter recebido a orientação deste eminente professor, cujos ensinamentos ficarão marcados de forma indelével em minha vida. Um grande homem que deixou um enorme vazio nos corações dos familiares, amigos e alunos que jamais poderá ser preenchido. Mestre, gratidão pelos seus ensinamentos e que Deus o guarde na glória eterna dos justos.

“É fácilimo dissimular a sabedoria, mas quase impossível ocultar a ignorância.”

Cid Cercal

RESUMO

TORRES, Flávio Lacerda. ***Análise estrutural de colunas cruciformes formadas por cantoneiras de abas iguais em aço inoxidável submetidas à compressão axial.*** Rio de Janeiro, 2021. 250f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

A vasta gama de possibilidades para aplicações com as mais variadas finalidades torna o aço inoxidável adequado ao emprego tanto do ponto de vista estrutural quanto arquitetônico. Entretanto, o comportamento não linear do aço inoxidável demanda regras diferenciadas no que tange o seu dimensionamento, especialmente nos fenômenos relacionados à instabilidade de colunas sob compressão axial. As cantoneiras em aço inoxidável são empregadas como componente estrutural em virtude da facilidade em executar ligações entre elementos e pela versatilidade na combinação das mesmas formando outras seções com maior capacidade de carga frente às solicitações. Com base tanto nas demandas citadas acima quanto na escassez de pesquisas relacionadas ao comportamento de cantoneiras duplas com seção cruciforme, surgiu a motivação para realizar o presente trabalho. Foram avaliadas colunas cruciformes, formadas por cantoneiras duplas de abas iguais laminadas a quente em aço inoxidável austenítico 304, com comprimentos de 900mm, 1400mm e 2200mm e seções transversais de 50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm e 50,8x7,93mm. As dimensões das colunas foram escolhidas com base em análises de estabilidade elástica utilizando o *software* GBTul. Já a concepção dos modelos numéricos e as análises foram realizadas com o auxílio do *software* ANSYS 2019 R3. A partir dos resultados fornecidos pelas análises de flambagem elástica das colunas foram elaboradas as curvas de assinatura para colunas com seções transversais, formadas tanto por cantoneiras simples quanto cantoneiras duplas cruciformes (com e sem interconexões). As curvas de assinatura forneceram informações importantes acerca das cargas críticas de flambagem elástica, dos modos de flambagem das colunas e do comprimento da coluna onde ocorre a transição entre os modos de flambagem. Com base nos modos de flambagem obtidos, foram introduzidas as imperfeições geométricas iniciais nas colunas e realizadas as análises não lineares das mesmas. De posse dos resultados obtidos nas análises numéricas, foi possível observar o comportamento das colunas frente a introdução de interconexões entre as cantoneiras duplas. Foi observado que, além do aumento da capacidade resistente da coluna, o modo de flambagem ao qual a coluna está suscetível, influenciou na determinação da distância entre interconexões, necessárias para promover o trabalho em conjunto da coluna. Ao comparar os resultados obtidos com as prescrições normativas do Eurocode 3, Parte 1-1 [25] e do AISC [24], foi possível observar que alguns valores normativos previstos são demasiadamente conservadores. Além disso, ambas as normas não apontam para a influência do modo de flambagem das colunas no que se refere a distância máxima entre as interconexões para promover o trabalho em conjunto da coluna. Por fim, foi proposta uma metodologia para determinar a distância ótima entre as interconexões das colunas duplas cruciformes com seção transversal formada por cantoneiras de abas iguais, com base nos modos de flambagem das colunas, capaz de promover o trabalho em conjunto da coluna.

Palavras-chave: Cantoneira dupla laminada a quente; Seção cruciforme; Aço inoxidável; Comportamento individual; Comportamento em conjunto; Flambagem; Compressão; Eurocódigo; AISC.

ABSTRACT

TORRES, Flávio Lacerda. ***Structural analysis of cruciform columns composed by stainless steel equal legs angles subjected to axial compression***. Rio de Janeiro, 2021. 250f. Dissertation (MSc in Civil Engineering) – Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

The wide range of possibilities for applications with the most varied purposes makes stainless steel suitable for use both structurally and architecturally. However, the non-linear characteristics of stainless steel demand different rules regarding its dimensioning, especially in the phenomena related to the instability of columns under axial compression. Stainless steel angle brackets are used as a structural component due to the ease in making connections between elements and the versatility in combining them, forming other sections with greater load capacity in response to requests. Based both on the demands mentioned above and on the scarcity of research related to the behavior of double angles with cross-section, the motivation to carry out the present work emerged. Cruciform columns were evaluated, formed by double angles with equal flaps hot-rolled in 304 austenitic stainless steel, with lengths of 900mm, 1400mm and 2200mm and cross sections of 50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm and 50,8x7,93mm. Column dimensions were chosen based on elastic stability analysis using GBTul software. The design of numerical models and analyzes were performed with the aid of ANSYS 2019 R3 software. From the results provided by the analysis of elastic buckling of the columns, signature curves were created for columns with cross sections, formed by both simple and double cruciform angles (with and without interconnections). Signature curves provided important information about elastic buckling critical loads, column buckling modes, and column length where the transition between buckling modes occurs. Based on the buckling modes obtained, the initial geometric imperfections in the columns were introduced and their non-linear analyzes were carried out. With the results obtained in the numerical analyses, it was possible to observe the behavior of the columns against the introduction of interconnections between the double angles. It was observed that, in addition to the increase in the column's resistant capacity, the buckling mode to which the column is susceptible influenced the determination of the distance between interconnections, necessary to promote the column's joint work. When comparing the results obtained with the normative prescriptions of Eurocode 3, Part 1-1 [25] and of the AISC [24], it was possible to observe that some predicted normative values are too conservative. In addition, both standards do not point to the influence of the column buckling mode regarding the maximum distance between the interconnections to promote the column's joint work. Finally, a methodology was proposed to determine the optimal distance between the interconnections of double cruciform columns with a cross section formed by angle bars with equal edges, based on the buckling modes of the columns, capable of promoting joint work in the column.

Keywords: Double hot-rolled angle; Cruciform section; Stainless steel; Individual behavior; Joint behavior; Buckling; Compression; Eurocode; AISC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção de aço bruto: América Latina - 2020 [2].	25
Figura 2 – Produção mundial de aço bruto - 2020 [2].	26
Figura 3 – Combinação de cantoneiras simples [5] (adaptado).	31
Figura 4 – Exemplo de coluna avaliada no presente trabalho.	32
Figura 5 – Métodos de análise para estruturas de aço [11].	37
Figura 6 – Curva tensão <i>versus</i> deformação: aços inoxidáveis e aço carbono [12].	38
Figura 7 – Flambagem global por flexão da coluna devido a carga axial P [15].	40
Figura 8 – Comprimento das colunas e modo de flambagem adotado para introdução das imperfeições geométricas iniciais - Menezes <i>et al.</i> [17].	42
Figura 9 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento: resultados numéricos e experimentais - Menezes <i>et al.</i> [17].	43
Figura 10 – Comparativo entre as cargas de falha obtidas nos ensaios experimentais e modelos numéricos com as previsões do EC3 1-4 e AISC, Zhang <i>et al.</i> [18].	45
Figura 11 – Seções transversais utilizadas nos ensaios das colunas - Botelho [30].	53
Figura 12 – Deformada dos modelos experimentais e numéricos - Botelho [30].	53
Figura 13 – Flambagem global por flexão [15] (adaptado).	58
Figura 14 – Valores adotados para o coeficiente de flambagem k [15] (adaptado).	59
Figura 15 – Flambagem global por torção em coluna com seção cruciforme [15] (adaptado).	61
Figura 16 – Flambagem global por flexo-torção [15] (adaptado).	63
Figura 17 – Seção transversal cantoneira simples de abas iguais.	64
Figura 18 – Seção cantoneira simples: flambagem por flexão em torno do eixo de menor inércia.	65
Figura 19 – Seção cantoneira simples: flambagem por flexo-torção.	65
Figura 20 – Seção cantoneira dupla cruciforme.	66
Figura 21 – Seção cantoneira dupla cruciforme: a) flambagem global por flexão em torno do eixo de menor inércia e b) flambagem global por flexo-torção.	67
Figura 22 – Seção cantoneira dupla cruciforme interconectada.	68
Figura 23 – Seção cantoneira dupla cruciforme interconectada: a) flambagem global por torção e b) flambagem global por flexão em torno do eixo de menor inércia do conjunto.	69

Figura 24 – Curva de assinatura - cantoneira simples de abas iguais L50,8x6,35mm.	70
Figura 25 – Interconexões: a) com chapa aparafusada e b) por meio de solda - Botelho [30].	76
Figura 26 – Arranjo de cantoneiras com abas em contato ou com pequeno afastamento.....	77
Figura 27 – GBTul [34]: a) seção transversal da cantoneira, b) discretização dos elementos de viga e aplicação da carga e c) condição de apoio biengastada.	81
Figura 28 – Seções transversais utilizadas neste trabalho.	83
Figura 29 – Nomenclatura utilizada na identificação dos elementos.	84
Figura 30 – Coluna formada por cantoneira dupla cruciforme com duas interconexões.	85
Figura 31 – Aço inoxidável austenítico: a) curva tensão <i>versus</i> deformação adotada nos modelos numéricos e b) detalhe dos pontos iniciais da curva - Sarquis [35].	88
Figura 32 – Vista frontal: colunas formadas por cantoneiras duplas cruciformes.	90
Figura 33 – Geometria das colunas e eixos de referência do <i>software</i> ANSYS [36].	91
Figura 34 – Malha 8,0mm x 8,0mm utilizada nas colunas com seção transversal formada por: a) Cantoneira simples e b) Cantoneira dupla cruciforme.	92
Figura 35 – Condições de contorno da coluna formada por cantoneira simples.	93
Figura 36 – Curva de assinatura GBTul [34]: SL-50,8x4,76.	97
Figura 37 – Participação dos modos de deformação - coluna com L = 800mm.	98
Figura 38 – Curva de assinatura ANSYS [36]: SL-50,8x4,76.	100
Figura 39 – Seção 50,8x4,76: (a) coluna com L=1000mm e modo de flambagem por flexo-torção e (b) coluna com L=1100mm e modo de flambagem por flexão.	102
Figura 40 – Curvas de Assinatura ANSYS <i>versus</i> GBTul: SL-50,8x4,76.	102
Figura 41 – Curvas de assinatura - seção 50,8x4,76mm.	103
Figura 42 – Curvas de assinatura - seção 50,8x6,35mm.	104
Figura 43 – Curvas de assinatura - seção 50,8x7,93mm.	104
Figura 44 – Eixos de maior e menor inércia para as colunas com seção formada por: a) cantoneira simples e b) cantoneira dupla cruciforme interconectada.	105
Figura 45 – Gráfico Tensão crítica (σ_{cr}) / Tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) <i>versus</i> Distância entre interconexões (a) / Comprimento da coluna (L) para L = 900mm.	108
Figura 46 – Gráfico Tensão máxima resistente (σ_u) / Tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) <i>versus</i> Distância entre interconexões (a) / Comprimento da coluna (L) para L = 900mm. .	108

Figura 47 – Coluna trabalhando de forma individual sem interconexão e modo de flambagem por flexo-torção: a) $N_{cr} = 658,66\text{kN}$ e b) $N_u = 258,02\text{kN}$	109
Figura 48 – Coluna trabalhando de forma conjunta com uma interconexão e modo de flambagem por torção: a) $N_{cr} = 676,20\text{kN}$ e b) $N_u = 269,72\text{kN}$	109
Figura 49 – Coluna trabalhando de forma individual com uma interconexão e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 1173,58\text{kN}$ e b) $N_u = 283,03\text{kN}$	110
Figura 50 – Coluna trabalhando de forma conjunta com duas interconexões e modo de flambagem por torção do conjunto: a) $N_{cr} = 1570,71\text{kN}$ e b) $N_u = 376,10\text{kN}$	110
Figura 51 – Coluna trabalhando de forma individual com duas interconexões e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 2703,54\text{kN}$ e b) $N_u = 393,14\text{kN}$	111
Figura 52 – Coluna trabalhando de forma conjunta com três interconexões e modo de flambagem por torção do conjunto: a) $N_{cr} = 2980,27\text{kN}$ e b) $N_u = 475,91\text{kN}$	111
Figura 53 – Gráfico carga máxima resistente <i>versus</i> deslocamento axial: colunas com 900mm de comprimento e seções transversais trabalhando de forma individual.	112
Figura 54 – Gráfico carga máxima resistente <i>versus</i> deslocamento axial: colunas com 900mm de comprimento e seções transversais trabalhando em conjunto.	112
Figura 55 – Gráfico Tensão crítica (σ_{cr}) / Tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) <i>versus</i> Distância entre interconexões (a) / Comprimento da coluna (L) para L = 1400mm.	114
Figura 56 – Gráfico Tensão máxima resistente (σ_u) / Tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) <i>versus</i> Distância entre interconexões (a) / Comprimento da coluna (L) para L = 1400mm.	114
Figura 57 – Coluna trabalhando de forma individual com uma interconexão e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 383,13\text{kN}$ e b) $N_u = 159,83\text{kN}$	115
Figura 58 – Coluna trabalhando de forma conjunta com duas interconexões e modo de flambagem por torção do conjunto: a) $N_{cr} = 657,49\text{kN}$ e b) $N_u = 265,89\text{kN}$	115
Figura 59 – Coluna trabalhando de forma individual com três interconexões e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 1303,93\text{kN}$ e b) $N_u = 293,18\text{kN}$	116
Figura 60 – Coluna trabalhando de forma conjunta com quatro interconexões e modo de flambagem por torção do conjunto: a) $N_{cr} = 1535,77\text{kN}$ e b) $N_u = 347,25\text{kN}$	116
Figura 61 – Coluna trabalhando de forma individual com quatro interconexões e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 1924,74\text{kN}$ e b) $N_u = 374,55\text{kN}$	117
Figura 62 – Coluna trabalhando de forma conjunta com cinco interconexões e modo de flambagem por flexão do conjunto: a) $N_{cr} = 2148,97\text{kN}$ e b) $N_u = 379,40\text{kN}$	117

Figura 63 – Gráfico carga máxima resistente <i>versus</i> deslocamento axial: colunas com 1400mm de comprimento e seções transversais trabalhando de forma individual.	118
Figura 64 – Gráfico carga máxima resistente <i>versus</i> deslocamento axial: colunas com 1400mm de comprimento e seções transversais trabalhando em conjunto. ...	118
Figura 65 – Gráfico Tensão crítica (σ_{cr}) / Tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) <i>versus</i> Distância entre interconexões (a) / Comprimento da coluna (L) para L = 2200mm.	120
Figura 66 – Gráfico Tensão máxima resistente (σ_u) / Tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) <i>versus</i> Distância entre interconexões (a) / Comprimento da coluna (L) para L = 2200mm.	120
Figura 67 – Coluna trabalhando de forma individual com cinco interconexões e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 543,81\text{kN}$ e b) $N_u = 185,42\text{kN}$	121
Figura 68 – Coluna trabalhando de forma conjunta com seis interconexões e modo de flambagem por flexão do conjunto: a) $N_{cr} = 581,24\text{kN}$ e b) $N_u = 190,56\text{kN}$	121
Figura 69 – Coluna trabalhando de forma individual com cinco interconexões e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 713,35\text{kN}$ e b) $N_u = 243,47\text{kN}$	122
Figura 70 – Coluna trabalhando de forma conjunta com seis interconexões e modo de flambagem por flexão do conjunto: a) $N_{cr} = 760,03\text{kN}$ e b) $N_u = 247,81\text{kN}$	122
Figura 71 – Coluna trabalhando de forma individual com cinco interconexões e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 878,61\text{kN}$ e b) $N_u = 299,58\text{kN}$	123
Figura 72 – Coluna trabalhando de forma conjunta com seis interconexões e modo de flambagem por flexão do conjunto: a) $N_{cr} = 911,79\text{kN}$ e b) $N_u = 301,26\text{kN}$	123
Figura 73 – Gráfico carga máxima resistente <i>versus</i> deslocamento axial: colunas com 2200mm de comprimento e seções transversais trabalhando de forma individual.	124
Figura 74 – Gráfico carga máxima resistente <i>versus</i> deslocamento axial: colunas com 2200mm de comprimento e seções transversais trabalhando em conjunto. ...	124
Figura 75 – Comprimento de transição e modos de flambagem: cantoneira dupla cruciforme com seção 50,8x4,76mm interconectada em todo seu comprimento.	133
Figura 76 – Comprimento de transição e modos de flambagem: cantoneira dupla sem interconexão com seção 50,8x4,76mm.	135
Figura 77 – Comprimento de transição e modos de flambagem: colunas com seção transversal DL - LT e DL - 0L.	137
Figura 78 – Coluna dupla cruciforme: diagrama de transição entre o comportamento individual (ft) para o comportamento em conjunto (T).	138

Figura 79 – Coluna dupla cruciforme: diagrama de transição entre o comportamento individual (f) para o comportamento em conjunto (T).	140
Figura 80 – Coluna dupla cruciforme: diagrama de transição entre o comportamento individual (f) para o comportamento em conjunto (F).	141
Figura 81 – Fluxograma para a determinação da distância ótima entre interconexões em colunas formadas por cantoneiras duplas cruciformes.	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores nominais de tensão de escoamento (f_y) e tensão última (f_u) para aços inoxidáveis estruturais [13].	39
Tabela 2 – Comparativo entre cargas de falha para o modo de flexo torção, obtidas por meio dos ensaios experimentais em relação às previsões normativas, Zhang <i>et al.</i> [18].	46
Tabela 3 – Comparativo entre cargas de falha: ensaios experimentais, EC3 1-4 [13], CSM [23] e DSM [24], Sirqueira <i>et al.</i> [22].	47
Tabela 4 – Resultados obtidos nos ensaios experimentais de Sarquis <i>et al.</i> [25].	48
Tabela 5 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios experimentais de Filipović <i>et al.</i> [26]	49
Tabela 6 – Resultados obtidos nos ensaios experimentais de Filipović <i>et al.</i> [26].	51
Tabela 7 – Resultados numéricos, teóricos e experimentais - Botelho [30].	54
Tabela 8 – Comparação entre os métodos de dimensionamento - Botelho <i>et al.</i> [31].	55
Tabela 9 – Classificação da seção transversal de cantoneiras - EC3 1-1 [6].	71
Tabela 10 – Parâmetros de distribuição de tensões (Ψ) e coeficiente de flambagem (k_σ) [4].	72
Tabela 11 – Fator de imperfeição (α) e limite de esbeltez normalizada λ_0 [13].	74
Tabela 12 – Distância máxima entre interconexões: cantoneiras compostas [6].	78
Tabela 13 – Propriedades do aço inoxidável austenítico 304 - Sarquis [35].	80
Tabela 14 – Dimensões nominais das cantoneiras de abas iguais.	82
Tabela 15 – Dimensões das colunas analisadas.	82
Tabela 16 – Propriedades geométricas das seções transversais [7]	83
Tabela 17 – Identificação dos modos de flambagem.	86
Tabela 18 – Deslocamentos “U” e rotações “R” impostos aos modelos numéricos.	93
Tabela 19 – Valores adotados para imperfeição geométrica inicial.	95
Tabela 20 – Valores referentes à curva de assinatura representada na Figura 36.	99
Tabela 21 – Valores referentes à curva de assinatura representada na Figura 38.	101
Tabela 22 – Resultados para colunas com comprimento de 900mm.	107
Tabela 23 – Resultados para colunas com comprimento de 1400mm.	113
Tabela 24 – Resultados para colunas com comprimento de 2200mm.	119

Tabela 25 – Distâncias máximas entre interconexões conforme EC3 1-1 [6].	128
Tabela 26 – Distâncias máximas entre interconexões conforme AISC [7].	128
Tabela 27 – Distâncias máximas entre interconexões - análises numéricas.	129
Tabela 28 – Resumo: distância entre interconexões e modo de flambagem das colunas.	130
Tabela 29 – Mudança de comportamento das colunas duplas cruciformes.	137
Tabela 30 – Resumo dos valores relativos às distâncias entre interconexões.	142
Tabela 31 – Taxa de variação (EC3 1-1 / Proposto) e (AISC / Proposto), taxa de variação média e desvio padrão.	143
Tabela 32 – Taxa de variação (EC3 1-1 / Numérico) e (AISC / Numérico), taxa de variação média e desvio padrão.	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISC	American Institute of Steel Construction
APDL	ANSYS Parametric Design Language
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
CSA	Canadian Standards Association
CSM	Continuous Strength Method
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
DSM	Direct Strenght Method
EC3 1-1	Eurocode 3 – Parte 1-1
EC3 1-4	Eurocode 3 – Parte 1-4
ELU	Estado Limite Último
Eurocode	European Committee for Standardisation
FEN	Faculdade de Engenharia
GBT	Generalized Beam Theory
IST	Instituto Técnico Superior de Lisboa
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
MEF	Método dos elementos finitos
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Distância entre interconexões (de centro a centro)
A	Área bruta da seção transversal
A_c	Área bruta da seção transversal (conjunto)
A_{eff}	Área efetiva da seção transversal
b	Comprimento da aba da cantoneira
b_{eff}	Comprimento efetivo da aba da cantoneira
CG	Centroide da seção transversal
CS	Centro de cisalhamento da seção transversal
C_w	Constante de empenamento da seção transversal
E	Módulo de elasticidade do material
F	Modo de flambagem global por flexão
FT	Modo de flambagem global por flexo-torção
f_u	Tensão última
f_y	Tensão de escoamento
G	Módulo de elasticidade transversal do material
J	Constante de torção da seção transversal
I	Momento de inércia da seção transversal
I_G	Momento polar de inércia da seção em relação ao CG
$I_{G,c}$	Momento polar de inércia da seção em relação ao CG (conjunto)
I_u	Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo u
$I_{u,c}$	Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo u (conjunto)
I_v	Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo v
$I_{v,c}$	Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo v (conjunto)
k	Coeficiente de flambagem
$k_u L$	Comprimento efetivo de flambagem do elemento em relação ao eixo u
$k_v L$	Comprimento efetivo de flambagem do elemento em relação ao eixo v
$k_z L$	Comprimento efetivo de flambagem do elemento em relação ao eixo z
k_c	Coeficiente de flambagem da coluna (conjunto)
L	Comprimento da coluna
L_{trans}	Comprimento de transição entre os modos de flambagem da coluna
N_{cr}	Carga crítica de flambagem elástica

$N_{b,Rd}$	Carga resistente de projeto do elemento comprimido
$N_{cr,Fu}$	Carga crítica de flambagem por flexão em torno do eixo u
$N_{cr,Fv}$	Carga crítica de flambagem por flexão em torno do eixo v
$N_{cr,F}$	Carga crítica de flambagem por flexão
$N_{cr,T}$	Carga crítica de flambagem por torção
$N_{cr,FT}$	Carga crítica de flambagem por flexo-torção
$N_{c,Sd}$	Esforço axial solicitante de projeto
$N_{c,Rd}$	Esforço axial resistente de projeto
N_u	Carga máxima resistente
P	Carga axial
r	Raio de giração da seção
r_0	Raio de giração polar da seção em relação ao CS
$r_{0,c}$	Raio de giração polar da seção em relação ao CS (conjunto)
r_G	Raio de giração polar da seção em relação ao CG
$r_{G,c}$	Raio de giração polar da seção em relação ao CG (conjunto)
$r_{\min}$	Raio de giração mínimo da seção
r_u	Raio de giração da seção em torno do eixo u
$r_{u,c}$	Raio de giração da seção em torno do eixo u (conjunto)
r_v	Raio de giração da seção em torno do eixo v
$r_{v,c}$	Raio de giração da seção em torno do eixo v (conjunto)
t	Espessura da aba da cantoneira
T	Modo de flambagem global por torção
u	Eixo principal de inércia da seção transversal cantoneira de abas iguais
u_{G0}	Distância entre o CG e o CS da seção transversal
v	Eixo principal de inércia da seção transversal cantoneira de abas iguais
α	Fator de imperfeição
β	Coeficiente que relaciona a distância entre o CG e o CS da seção
ε	Deformação
$\varepsilon_{0,2}$	Deformação a 0,2%
λ_u	Índice de esbeltez da coluna em relação ao eixo u
λ_v	Índice de esbeltez da coluna em relação ao eixo v
$\bar{\lambda}$	Esbeltez normalizada do elemento estrutural submetido à compressão
$\bar{\lambda}_0$	Limite de esbeltez normalizada

$\bar{\lambda}_p$	Coeficiente de esbeltez normalizado do elemento da seção
ν	Coeficiente de Poisson do aço
ρ	Fator de redução
σ	Tensão
$\sigma_{0,2}$	Tensão em 0,2% de deformação
σ_{cr}	Tensão crítica de flambagem elástica
$\sigma_{cr,Fu}$	Tensão crítica de flambagem por flexão em torno do eixo u
$\sigma_{cr,Fv}$	Tensão crítica de flambagem por flexão em torno do eixo v
$\sigma_{cr,p}$	Tensão crítica de flambagem local
σ_u	Tensão máxima resistente
γ_{M1}	Coeficiente de segurança parcial
χ	Fator de redução do Eurocode
ψ	Parâmetro do Eurocode que relaciona a distribuição de tensão na seção transversal com o coeficiente de flambagem da placa

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	24
Generalidades.....	24
O aço no Brasil	24
O Aço inoxidável	26
Aplicações do aço inoxidável	29
Colunas submetidas à compressão axial	30
Motivação.....	31
Objetivo	32
Escopo do trabalho	33
1 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA	35
1.1 Introdução.....	35
1.2 Teoria da Estabilidade	35
1.3 Análises lineares e não lineares	36
1.4 Curva tensão <i>versus</i> deformação e propriedades do aço inoxidável	37
1.5 Elementos formados por cantoneiras submetidos à compressão axial	40
1.5.1 Cantoneiras simples de abas iguais submetidas à compressão axial	41
1.5.2 Cantoneiras múltiplas de abas iguais submetidas à compressão axial	51
2 DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS FORMADOS POR CANTONEIRAS	
SUBMETIDOS À COMPRESSÃO AXIAL	56
2.1 Introdução.....	56
2.2 Flambagem - seção transversal formada por cantoneiras	57
2.2.1 Flambagem global por flexão.....	57
2.2.2 Flambagem global por torção	61
2.2.3 Flambagem global por flexo-torção	62
2.3 Características da flambagem em seções formadas por cantoneiras.....	64
2.3.1 Seção cantoneira simples de abas iguais.....	64
2.3.2 Seção cruciforme - cantoneira dupla de abas iguais	66
2.3.3 Seção cruciforme - cantoneira dupla de abas iguais com interconexões	67
2.3.4 Modos de flambagem <i>versus</i> curva de assinatura.....	69
2.4 Cantoneiras submetidas à compressão axial - Eurocode 3	71
2.4.1 Classificação da seção transversal.....	71

2.4.2	Dimensionamento de cantoneiras submetidas à compressão axial	73
2.5	Interconexões entre cantoneiras duplas cruciformes	75
2.5.1	Distância máxima entre interconexões - AISC.....	77
2.5.2	Distância máxima entre interconexões - EC3 1-1	77
3	PROPRIEDADES DO MATERIAL, DIMENSÕES E NOMENCLATURA	79
3.1	Introdução.....	79
3.2	Propriedades do material	79
3.3	Dimensões dos elementos	80
3.4	Nomenclatura	83
4	MODELAGEM E ANÁLISE NUMÉRICA	87
4.1	Introdução.....	87
4.2	Pré-processamento.....	87
4.2.1	Propriedades dos materiais e curva tensão <i>versus</i> deformação	87
4.2.2	Concepção geométrica das colunas.....	88
4.2.3	Tipo de elemento e malha em elementos finitos.....	91
4.2.4	Condições de contorno	92
4.3	Análise de flambagem elástica	94
4.4	Imperfeição geométrica inicial e análise não linear	94
5	CURVAS DE ASSINATURA.....	96
5.1	Introdução.....	96
5.2	Curvas de assinatura – GBTul <i>versus</i> ANSYS.....	96
5.2.1	Curvas de assinatura - GBTul.....	96
5.2.2	Curvas de assinatura - ANSYS.....	100
5.2.3	Comparação das curvas de assinatura - GBTul <i>versus</i> ANSYS.....	102
5.3	Curvas de assinatura	103
6	RESULTADOS NUMÉRICOS.....	105
6.1	Introdução.....	105
6.2	Colunas com comprimento de 900mm.....	107
6.3	Colunas com comprimento de 1400mm.....	113
6.4	Colunas com comprimento de 2200mm.....	119
6.5	Análise e observações dos resultados numéricos	125
7	AVALIAÇÃO DAS NORMAS EUROCODE-3 E AISC E FORMULAÇÃO DE UMA NOVA PROPOSTA PARA DISTÂNCIA ÓTIMA ENTRE INTERCONEXÕES	127

7.1 Introdução.....	127
7.2 Distância entre interconexões - Eurocode 3.....	127
7.3 Distância entre interconexões - AISC.....	128
7.4 Distância entre interconexões - Resultados Numéricos.....	129
7.5 Avaliação das prescrições normativas: EC3 1-1 e AISC.....	130
7.6 Nova proposta - determinação da distância ótima entre interconexões....	131
7.6.1 Comprimento de transição - coluna dupla totalmente interconectada	132
7.6.2 Comprimento de transição - coluna dupla sem interconexão	134
7.6.3 Comparação dos comprimentos de transição das colunas.....	136
7.6.4 Processo para determinação da distância ótima entre interconexões	138
7.7 Comparação dos resultados	142
7.8 Fluxograma - Determinação da distância ótima entre interconexões	144
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	146
8.1 Introdução.....	146
8.2 Principais contribuições do presente trabalho	148
8.3 Conclusões	149
8.4 Sugestões para trabalhos futuros	151
REFERÊNCIAS.....	152
ANEXO A.....	155
ANEXO B.....	161
ANEXO C.....	171
ANEXO D.....	181
ANEXO E.....	191
ANEXO F.....	201
ANEXO G.....	211
ANEXO H.....	221
ANEXO I.....	231
ANEXO J.....	241

INTRODUÇÃO

Generalidades

A idade do ferro teve início por volta de 1200 a.C. sendo considerada o último estágio tecnológico e cultural da pré-história permitindo grandes mudanças na sociedade. A agricultura experimentou um grande salto na produção, devido aos novos equipamentos e utensílios fabricados com esse versátil material, bem como a expansão territorial de diversos povos, que se deu por meio do desenvolvimento e fabricação de novas armas.

No decorrer dos anos, novas técnicas de manufatura foram sendo descobertas, tornando o ferro mais duro e resistente à corrosão. Além disso, técnicas de aquecimento e materiais resistentes a temperaturas elevadas foram sendo desenvolvidos permitindo o manuseio do ferro na sua forma líquida (ferro fundido).

Entretanto, a grande mudança só ocorreu em 1856, quando foi descoberto como produzir o aço. Na Inglaterra, por volta do ano de 1856, o inglês Henry Bessemer inventou um forno que permitiu a produção do aço em larga escala, tornando viável o emprego deste material na construção.

Atualmente é impossível imaginar o mundo sem o uso do aço, sendo a produção do mesmo um forte indicador do estágio de desenvolvimento econômico de um país [1].

O aço no Brasil

No Brasil, a exploração do ferro/aço sempre foi propícia devido aos minérios encontrados em Minas Gerais e pelo desenvolvimento das primeiras usinas logo após a chegada da família real portuguesa em terras brasileiras. Entretanto, o mercado do aço somente começou a expandir no século XX, impulsionado pelo surto industrial ocorrido entre 1917 e 1930 [1].

Em 1921, foi criada a Companhia Siderúrgica Mineira, que depois tornou-se Siderúrgica Belgo-Mineira. A década de 30 registrou um grande aumento na produção siderúrgica nacional, incentivada pelo crescimento da Belgo-Mineira que, em 1937, inaugurou a usina de Monlevade, com capacidade inicial de 50 mil toneladas anuais

de lingotes de aço. Ainda em 1937, foram constituídas a companhia siderúrgica de Barra Mansa e a Companhia Metalúrgica de Barbará. Apesar do crescimento da indústria siderúrgica nacional, o Brasil continuava muito dependente de aços importados. Somente em 1946, com a criação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em Volta Redonda – RJ, o cenário foi alterado [1].

O ano de 1950 marcou um novo ciclo de crescimento da siderurgia no Brasil. A produção nacional de aço bruto alcançou 788 mil toneladas, iniciando uma fase de crescimento continuado da produção do aço no Brasil. Em 1960 a produção brasileira de aço triplicou e dez anos depois o Brasil alcançou a marca de 5,5 milhões de toneladas de aço entregues ao mercado [1]. Com uma história tão rica, o Brasil tem hoje o maior parque industrial de aço da América do Sul.

Conforme mostrado na Figura 1, o Brasil ocupa a primeira colocação como produtor de aço bruto quando comparado com os países da América Latina. Os dados são relativos ao ano de 2020 (unidade: 10^3 toneladas) [2].

Produção de Aço Bruto da América Latina <i>Crude Steel Production in Latin America</i>					Unid./Unit: 10^3t	
Pais/ Country	2016	2017	2018	2019	2020 (*)	2020 (%)
Brasil / Brazil	31.642	34.778	35.407	32.569	31.415	56,1
México / Mexico	18.811	19.924	20.204	18.387	16.803	30,0
Argentina	4.126	4.624	5.162	4.645	3.651	6,5
Chile	1.153	1.158	1.145	1.133	1.157	2,1
Colômbia / Colombia	1.272	1.253	1.219	1.333	1.149	2,1
Peru	1.168	1.207	1.217	1.230	731	1,3
Equador / Ecuador	576	561	583	607	482	0,9
América Central / Central America	414	390	399	408	324	0,6
Cuba	244	221	225	230	185	0,3
Uruguai / Uruguay	61	58	60	62	49	0,1
Venezuela	553	444	129	51	29	0,1
Paraguai / Paraguay	35	24	25	26	23	0,0
Trinidad e Tobago / Trinidad and Tobago	35	-	-	-	-	0,0
TOTAL	60.090	64.642	65.775	60.681	55.998	100,0

(*) Dados preliminares./Preliminary figures.

Figura 1 – Produção de aço bruto: América Latina - 2020 [2].

Em relação a produção mundial de aço bruto, o Brasil ocupa a nona colocação em relação ao ano de 2020. A Figura 2 mostra a produção mundial de aço para o ano de 2020 (unidade: 10^6 toneladas) [2].

Produção Mundial de Aço Bruto World Crude Steel Production					Unid./Unit: 10 ⁶ t	
Pais/ Country	2016	2017	2018	2019	2020 (*)	2020 (%)
China	807,6	870,7	929,0	995,4	1.064,8	56,7
Índia / India	95,5	101,5	109,3	111,4	100,2	5,3
Japão / Japan	104,8	104,7	104,3	99,3	83,2	4,4
EUA / USA	78,5	81,6	86,6	87,8	72,7	3,9
Rússia / Russia	69,0	71,5	72,1	71,7	71,6	3,8
Coreia do Sul / Rep. of Korea	68,6	71,0	72,5	71,4	67,1	3,6
Turquia / Turkey	33,2	37,5	37,3	33,7	35,8	1,9
Alemanha / Germany	42,1	43,3	42,4	39,6	35,7	1,9
Brasil / Brazil	31,6	34,8	35,4	32,6	31,4	1,7
Irã / Iran	17,9	21,2	24,5	25,6	29,0	1,5
Ucrânia / Ukraine	24,2	21,4	21,1	20,8	20,6	1,1
Formosa / Taiwan	21,8	22,4	23,2	22,0	20,6	1,1
Itália / Italy	23,3	24,0	24,5	23,2	20,4	1,1
Vietnã / Vietnam	7,8	11,5	15,5	17,5	19,5	1,0
México / Mexico	18,8	19,9	20,2	18,4	16,8	0,9
França / France	14,4	15,5	15,4	14,5	11,6	0,6
Espanha / Spain	13,6	14,4	14,3	13,6	11,0	0,6
Canadá / Canada	12,6	13,2	13,4	12,9	11,0	0,6
Egito / Egypt	5,0	6,9	7,8	7,3	8,2	0,4
Polônia / Poland	9,0	10,3	10,2	9,0	7,9	0,4
Arábia Saudita / Saudi Arabia	5,5	4,8	8,2	8,2	7,8	0,4
Reino Unido / United Kingdom	7,6	7,5	7,3	7,2	7,1	0,4
Áustria / Austria	7,4	8,1	6,9	7,4	6,7	0,4
Bélgica / Belgium	7,7	7,8	8,0	7,8	6,1	0,3
Países Baixos / Netherlands	6,9	6,8	6,8	6,7	6,1	0,3
Austrália / Australia	5,3	5,3	5,7	5,5	5,5	0,3
Rep. Tcheca / Czech Republic	5,3	4,6	4,9	4,4	4,5	0,2
Suécia / Sweden	4,8	4,9	4,7	4,7	4,4	0,2
África do Sul / South Africa	6,1	6,3	6,3	6,2	3,9	0,2
Argentina	4,1	4,6	5,2	4,6	3,7	0,2
Outros / Other	71,5	77,1	83,5	84,0	82,4	4,4
TOTAL	1.631,5	1.735,1	1.826,5	1.874,4	1.877,3	100,0

(*) Dados preliminares./Preliminary figures.

Figura 2 – Produção mundial de aço bruto - 2020 [2].

O Aço inoxidável

Os aços inoxidáveis surgiram de estudos realizados em 1912, tanto na Inglaterra como na Alemanha. O aço estudado na Inglaterra era uma liga de ferro e cromo (Fe-Cr), com cerca de 13% de cromo (Cr). Na Alemanha, tratou-se de uma liga que, além de Fe e Cr, continha também níquel (Ni). No primeiro caso, era um aço inoxidável muito próximo ao que hoje se denomina de 420 e, no segundo caso, outro aço inoxidável bastante parecido com o atual 302 [3].

De forma geral, todos os metais (salvo raras exceções) tem uma tendência natural a reagir com o meio onde estão inseridos, formando compostos químicos (óxidos, hidróxidos e sais) por meio de reações espontâneas [3].

O processo natural de transformação de metais em compostos químicos é conhecido como corrosão. Devido ao custo de combate à corrosão, diversas técnicas vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas com a intenção de diminuir os prejuízos causados por este fenômeno, onde pintar uma superfície metálica, utilizar revestimentos, fazer metalizações, são algumas das formas encontradas. Outra maneira é desenvolver ligas metálicas que sejam mais resistentes à corrosão. Nessa última, participam os aços inoxidáveis. A resistência à corrosão de ligas metálicas a base de ferro e cromo está associada ao fenômeno da passivação. Este fenômeno consiste na formação de uma camada de óxido e a dissolução desta camada no meio corrosivo. Em geral, os aços inoxidáveis apresentam elevada resistência à corrosão em meios oxidantes (que facilitam a formação e a conservação dos filmes passivos). Entretanto, a resistência destes materiais é fraca em meios redutores (que não possibilitam a formação destes filmes ou os destroem) [3].

Tanto as propriedades mecânicas quanto a resistência a diferentes ambientes corrosivos são modificadas por meio da adição de elementos de liga (elementos químicos) na estrutura dos aços inoxidáveis. Com base no tipo de elemento químico e na concentração do mesmo sendo que na liga metálica, os aços inoxidáveis podem ser classificados em cinco grupos, onde cada grupo apresenta propriedades únicas, sendo eles:

- Aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem elevada resistência à corrosão, ductilidade e soldabilidade [3]. Possuem de 17% a 18% de cromo e de 8% a 11% de níquel em sua composição. Estes aços apresentam estrutura atômica cúbica de face centrada (CFC). Em comparação com os aços carbono, os aços austeníticos apresentam maior tenacidade em elevadas temperaturas. Além disso, possuem resistência à corrosão, grande ductilidade, boa soldabilidade e são facilmente deformáveis a frio. Podem ser endurecidos por deformação a frio, mas nunca por processos térmicos. Seu desempenho em relação à corrosão é satisfatório, sendo possível melhorá-lo por meio da adição de molibdênio [4].

- Aços inoxidáveis ferríticos

Normalmente, os aços inoxidáveis ferríticos apresentam quantidades de cromo entre 10,5% e 18%. Não possuem níquel em sua composição e sua estrutura atômica é cúbica de corpo centrado (CCC). São em geral menos dúcteis e apresentam baixa soldabilidade quando comparados aos aços austeníticos. Possuem bom desempenho frente à corrosão, podendo ser melhorados por meio da adição de molibdênio. Assim como os aços austeníticos, os aços ferríticos não podem ser endurecidos por tratamentos a quente [4].

- Aços inoxidáveis martensíticos

Possuem em sua composição, cerca de 12% de cromo e 0,35% de carbono [3]. Os aços martensíticos apresentam uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) semelhante à dos aços ferríticos. Estes aços são geralmente utilizados em condições endurecidas ou temperadas, o que lhes confere grande resistência mecânica e moderada resistência à corrosão. São utilizados em situações em que se deseja elevada resistência ao desgaste, abrasão e dureza. Estes aços são menos dúcteis quando comparados aos aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos e duplex. Embora a maioria dos aços martensíticos possam ser soldados, este processo requer tratamentos a quente nas fases de pré-soldagem e pós soldagem, o que limita o uso deste tipo de aço em componentes soldados [4].

- Aços inoxidáveis duplex (austeníticos-ferríticos)

Os aços inoxidáveis duplex apresentam uma microestrutura entre a austenita e a ferrita, e por isso são denominados de aços austeníticos-ferríticos. Estes aços contêm entre 20% e 26% de cromo, 1% a 8% de níquel, 0,05% a 5% de molibdênio e 0,05% a 3% de nitrogênio. Apresentam maior resistência mecânica quando comparados aos austeníticos, fator este que possibilita uma redução das seções quando utilizados em estruturas que requerem diminuição de peso próprio (estruturas *offshore*, por exemplo). São aços com características apropriadas para uma vasta gama de ambientes corrosivos. Embora os aços inoxidáveis duplex apresentem alta ductilidade, são menos deformáveis, devido a sua elevada resistência, quando

comparado com os aços inoxidáveis austeníticos. Apresentam boa soldabilidade e boa resistência a fissuração causada por corrosão [4].

- Aços inoxidáveis endurecidos por precipitação

A resistência à corrosão deste tipo de aço é mais elevada do que a dos aços martensíticos e similar aos aços austeníticos. Nos aços inoxidáveis endurecidos por precipitação, sua resistência mecânica pode ser elevada por meio de tratamentos térmicos, e dependendo da classe do aço, podem apresentar três microestruturas diferentes: martensíticos, semi-austeníticos e austeníticos. São aços que não apresentam boa soldabilidade sendo a aplicação mais comum deste tipo de aço, a indústria aeroespacial, entretanto, podem ser utilizados em elementos que requerem o uso de materiais com elevada resistência mecânica e moderada resistência à corrosão [4].

Aplicações do aço inoxidável

Devido a vasta gama de possibilidades para aplicações com as mais variadas finalidades, os principais fatores que tornam o aço inoxidável atrativo são:

- Resistência à corrosão;
- Resistência à oxidação;
- Resistência mecânica.

A resistência a corrosão dos aços inoxidáveis permite o seu emprego em diversos meios com elevada agressividade química, sendo eles: recipientes, tubulações e componentes de equipamentos de processamento de produtos alimentares e farmacêuticos, de celulose e papel, de produtos de petróleo e de produtos químicos em geral.

A resistência a oxidação, em temperaturas mais elevadas, torna possível o seu uso em componentes de fornos, câmaras de combustão, trocadores de calor e motores térmicos, dentre outros.

Por fim, a elevada resistência mecânica permite que sejam utilizados em componentes de máquinas e equipamentos nos quais se exige alta confiabilidade e

desempenho. Como exemplo deste último, pode-se citar a aplicação, de componentes produzidos em aço inoxidável, em partes de aeronaves.

Além dos fatores descritos acima, a aparência brilhante e atraente dos aços inoxidáveis, que se mantêm ao longo do tempo com relativa facilidade de manutenção, associada a elevada resistência mecânica, torna esse material adequado ao uso na construção civil tanto do ponto de vista estrutural quanto arquitetônico [4].

Colunas submetidas à compressão axial

Para que um elemento estrutural seja empregado de forma correta, ele deve:

- Atender aos requisitos relativos aos estados limites a que estiver sujeito;
- Resistir às ações provenientes da fabricação, transporte e montagem;
- Resistir a danos provenientes de eventuais ações acidentais;
- Possuir vida útil adequada ao fim a que se destina;
- Possuir custos de produção e manutenção viáveis.

Em relação aos estados limites, destacam-se aqueles cujas condições, quando excedidas, tornam o elemento estrutural ou a própria estrutura incapaz de cumprir os requisitos relativos à segurança. Em elementos estruturais sob compressão axial, os fenômenos relacionados à instabilidade caracterizam uma situação na qual o elemento comprimido torna-se incapaz de resistir ao esforço atuante e entra em colapso. Este fenômeno de perda de estabilidade é conhecido na literatura especializada como flambagem.

O dimensionamento de elementos esbeltos (elementos com elevada relação largura/espessura), na grande maioria dos casos, tem o seu estado limite último associado à flambagem. Cabe salientar que o colapso estrutural devido à este fenômeno pode ocorrer tanto em situações globais (flambagem global do elemento componente da estrutura) quanto em situações locais (flambagem local das placas de um elemento componente da estrutura).

As cantoneiras metálicas são elementos com seção relativamente simples e largamente utilizada como componente estrutural. A facilidade em executar ligações e a versatilidade na combinação de cantoneiras formando outras seções (seção T, cruciforme, tubular etc.) faz com que sejam empregadas na construção de treliças,

torres de transmissão de energia, contraventamentos e diversos outros tipos de estruturas.

A combinação de elementos estruturais, com seções formadas por cantoneiras simples, tem como objetivo principal formar novos elementos estruturais com maior capacidade carga. Na Figura 3 é possível observar alguns arranjos formados pela combinação de cantoneiras [5].

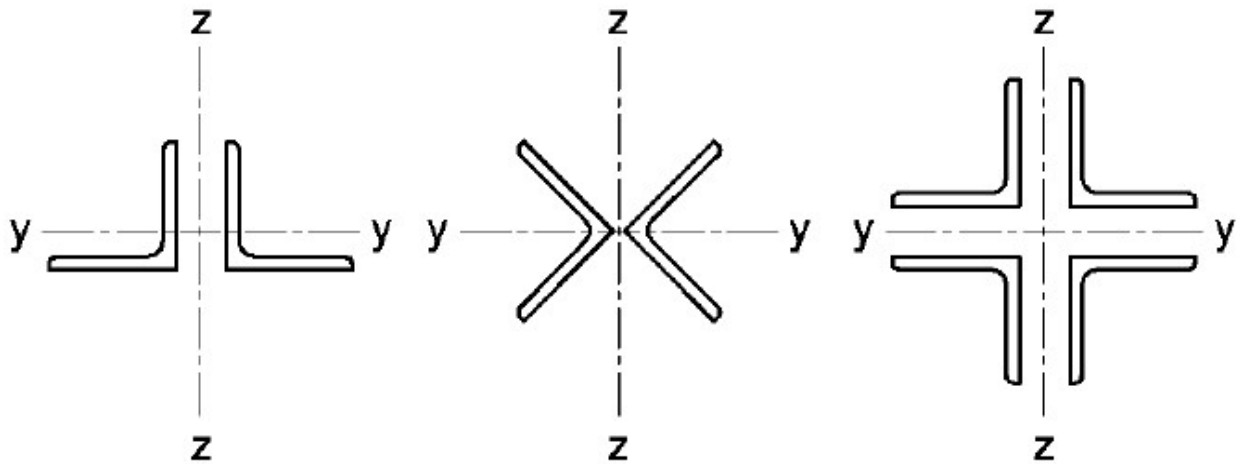


Figura 3 – Combinação de cantoneiras simples [5] (adaptado).

Entretanto, o fenômeno da flambagem manifesta-se de forma específica para cada tipo de combinação entre cantoneiras, o que torna de vital importância prever o comportamento do conjunto para um correto dimensionamento.

Motivação

O aço inoxidável austenítico vem sendo empregado na construção civil, com as mais variadas finalidades, desde a sua criação. São produtos resistentes à corrosão, possuem elevada resistência mecânica e ductilidade, requerem pouca manutenção, apresentam boa soldabilidade e são totalmente recicláveis no fim do seu ciclo de vida útil.

A inexistência de normas que amparam o projeto de estruturas em aços inoxidáveis no Brasil deixa uma lacuna no que tange a utilização deste material de forma eficiente e segura. Por outro lado, as normas de dimensionamento estrutural internacionais têm base em analogias às prescrições normativas voltadas ao aço

carbono, levando ao dimensionamento de estruturas demasiadamente conservadoras e dispendiosas.

Quando se trata de assuntos mais específicos, como no caso das seções cruciformes formadas por cantoneiras duplas (*starred angles*) de abas iguais em aço inoxidável, a literatura técnica é ainda extremamente escassa e pouco explorada.

Devido ao exposto nos parágrafos acima, surgiu a motivação para a realização do presente trabalho e assim contribuir com o desenvolvimento do tema em tela.

Objetivo

O principal objetivo do presente trabalho é avaliar o comportamento de colunas compostas por cantoneiras duplas cruciformes, em aço inoxidável austenítico, interconectadas por solda sob compressão axial. Para tal propósito, foram desenvolvidos modelos numéricos, com base no Método dos Elementos Finitos (MEF), com o intuito de compreender os modos de colapso das referidas colunas e o carregamento associado a estes modos. Como consequência foi possível desenvolver uma avaliação das distâncias entre as interconexões dos referidos modelos para depois compará-las com as distâncias previstas tanto pelo Eurocode 3 - Parte 1-1 (EC3 1-1) [6] quanto pelo American Institute of Steel Construction (AISC) [7]. A Figura 4 mostra, como exemplo de coluna avaliada no presente trabalho, uma coluna cruciforme composta por cantoneiras duplas, interconectada por solda.

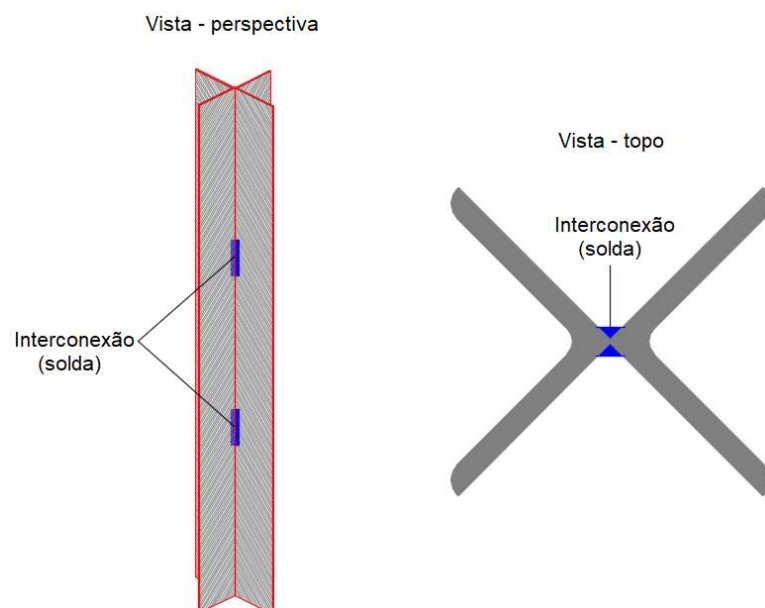


Figura 4 – Exemplo de coluna avaliada no presente trabalho.

Escopo do trabalho

A presente dissertação é formada por uma introdução seguida de oito capítulos. Na introdução são apresentados breves tópicos relativos ao surgimento do aço no mundo, o desenvolvimento do aço no Brasil e sua contextualização com os demais países produtores deste material. Em seguida são abordados aspectos referentes aos tipos de aços inoxidáveis, suas características, a vasta gama de aplicação deste notável material e sua aplicação mais específica como elemento estrutural, com seção transversal formada por cantoneiras, submetido à compressão.

No primeiro capítulo são apresentados alguns importantes conceitos relacionados ao comportamento de elementos submetidos à compressão axial com base na Teoria da Estabilidade, nos tipos de análise estrutural, nas características e propriedades do aço inoxidável e em trabalhos, já desenvolvidos, no que tange as colunas, com seções formadas tanto por cantoneiras simples quanto por cantoneiras cruciformes, submetidas à compressão.

O segundo capítulo trata do fenômeno da flambagem em colunas axialmente comprimidas. Neste capítulo são abordados: os modos de flambagem e suas características em relação às colunas com seções formadas por cantoneiras (simples e cruciformes), as variáveis que influenciam na ocorrência do fenômeno da flambagem, o dimensionamento de elementos sob compressão axial e a influência da distância entre interconexões (com base tanto no EC3 1-1 [6] quanto no AISC [7]) para seções formadas por cantoneira dupla cruciforme.

No terceiro capítulo são descritas as propriedades do material utilizado (aço inoxidável austenítico 304), os estudos e os critérios utilizados na escolha das dimensões dos elementos analisados e a nomenclatura criada com o objetivo de identificar e organizar as análises efetuadas neste trabalho.

No quarto capítulo desta dissertação é apresentada a metodologia utilizada na modelagem e análise numérica. São descritas as etapas de pré-processamento, análise de flambagem elástica, a introdução da imperfeição geométrica inicial e, por fim, a análise não linear das colunas.

O quinto capítulo foi dedicado às curvas de assinatura, uma importante ferramenta relacionada à investigação do fenômeno da flambagem. Foram descritas as ferramentas utilizadas na obtenção das referidas curvas bem como importantes

informações extraídas delas. Em seguida são apresentadas as curvas de assinatura para as seções analisadas nesta dissertação.

O sexto capítulo foi dedicado a apresentação dos resultados obtidos por meio das análises numéricas. Os resultados são apresentados de acordo com as dimensões das colunas estudadas.

No sétimo capítulo é realizada uma comparação entre os resultados numéricos obtidos neste trabalho e as prescrições normativas, disciplinadas pelo EC3 1-1 [6] e AISI [7], no que se refere as distâncias máximas entre interconexões de elementos submetidos à compressão axial. Em seguida, com base nos estudos realizados, uma nova proposta para determinação da distância ótima entre interconexões para cantoneiras duplas cruciformes é apresentada.

Por fim, o oitavo capítulo apresenta as considerações finais, apontando as principais contribuições do presente trabalho bem como as conclusões. Além disso, são feitas sugestões para futuras pesquisas neste campo ainda pouco explorado.

1 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

1.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados importantes conceitos que influenciam no comportamento de elementos submetidos à compressão axial e que foram utilizados no desenvolvimento do presente trabalho. A Teoria da Estabilidade, os tipos de análise estrutural, as características e propriedades do aço inoxidável e os trabalhos e pesquisas já desenvolvidos, em relação às colunas formadas por cantoneiras, nortearam o desenvolvimento deste capítulo.

1.2 Teoria da Estabilidade

O colapso de um elemento estrutural pode ocorrer de três modos: ruptura do material, instabilidade estrutural ou uma combinação deles [8]. Neste trabalho serão abordados o segundo e o terceiro modo de colapso supracitado, tomando como base, os conceitos estabelecidos na Teoria da Estabilidade. Esta teoria tem como propósito, o estudo dos fenômenos que influenciam no comportamento e na segurança das estruturas esbeltas, cujo emprego vem se tornando frequente.

A instabilidade estrutural tem como base o conceito de equilíbrio. A configuração de equilíbrio, em elementos sujeitos a cargas de compressão, sofre alteração à medida que as ações e os deslocamentos, experimentados por este elemento, modificam-se. Com isso, ao longo de uma trajetória de equilíbrio, a configuração do elemento sob compressão passa de estável para instável [9].

Quando se trata de instabilidade estrutural, esta pode se manifestar de dois modos: a instabilidade bifurcacional e a instabilidade por “*snap-through*”. O fenômeno de flambagem está associado à instabilidade bifurcacional, cuja análise envolve: a determinação das coordenadas do ponto de bifurcação (carga de bifurcação), a configuração da deformada do elemento estrutural quando ocorre a bifurcação (modo de instabilidade) e as características da trajetória pós-flambagem (nos arredores do ponto de bifurcação) [8].

1.3 Análises lineares e não lineares

O comportamento de uma estrutura pode ser definido pela relação entre o carregamento atuante e os efeitos causados por este carregamento. A Teoria das Estruturas dispõe de equações que auxiliam na descrição do fenômeno, sendo elas: equações de equilíbrio, relações constitutivas, relações cinemáticas e equações de compatibilidade.

Apesar da maioria das estruturas projetadas exibirem um comportamento linear elástico sob ação das cargas de serviço, existem alguns casos em que esse comportamento não ocorre. Deformações geradas por incrementos de carga acabam assumindo comportamentos não lineares, necessitando com isso de uma análise mais complexa. Enquanto sistemas lineares apresentam apenas uma configuração de equilíbrio, os sistemas não lineares podem exibir mais de uma configuração, sendo algumas estáveis e outras não. Com isso, dependendo do tipo de abordagem a ser realizada em torno do problema e das hipóteses adotadas, o comportamento da estrutura pode ser modelado de diversas maneiras, cada qual correspondendo a um tipo de análise estrutural [9].

A análise linear de estruturas está baseada na hipótese de que todas as equações do modelo são lineares, sendo elas: a linearidade física (relações constitutivas lineares e materiais elásticos lineares) e a linearidade geométrica (equações de equilíbrio formuladas para a configuração indeformada da estrutura e relações cinemáticas lineares). Entretanto, este tipo de análise possui limitações. A natureza intrinsecamente não linear dos fenômenos de instabilidade requer uma abordagem mais ampla, sendo necessário, para isso, estabelecer as equações de equilíbrio na configuração deformada da estrutura e nas relações cinemáticas não lineares. Tais modelos, em que o cômputo dos deslocamentos faz-se obrigatório, confere aos fenômenos de instabilidade, o caráter não linear, cuja análise requer métodos iterativos para resolução dos problemas [8].

O EC3 1-6 [10] detalha os tipos de análises a serem realizadas dependendo das considerações feitas. A Figura 5 apresenta um resumo dos tipos de análises com base nos efeitos provocados pelas não linearidades e imperfeições geométricas [11].

		<i>Inclusion of Imperfections</i>	<i>Material behavior</i>	
			<i>Linear</i>	<i>Non-linear</i>
Geometric behavior	Linear	No	LA - LBA	MNA
	Non-linear	No	GNA	GMNA
		Yes	GNIA	GMNIA

LA: Linear Analysis
LBA: Linear Buckling Analysis
MNA: Materially non-linear Analysis
GNA: Geometrically non-linear Analysis
GMNA: Geometrically and Materially non-linear Analysis
GNIA: Geometrically non-linear Analysis with Imperfections
GMNIA: Geometrically and Materially non-linear Analysis with Imperfections

Figura 5 – Métodos de análise para estruturas de aço [11].

1.4 Curva tensão *versus* deformação e propriedades do aço inoxidável

A grande quantidade de trabalhos realizados com aço carbono leva, naturalmente, a uma comparação com o aço inoxidável. Entretanto, os dois materiais diferem em alguns aspectos importantes, sendo a curva de tensão *versus* deformação um desses aspectos.

O aço carbono apresenta um comportamento elástico-linear até que seja atingida a tensão de escoamento. A partir deste ponto, o comportamento passa a ser não linear e o material entra no regime plástico de deformações.

Com relação ao aço inoxidável, este apresenta um comportamento não linear desde o início das deformações, além de não possuir uma tensão de escoamento bem definida. O aço inoxidável também apresenta um fenômeno conhecido por anisotropia, resultando em diferentes curvas tensão *versus* deformação em relação a direção da laminação do material que o constitui. Com isso, do ponto de vista de engenharia, as curvas características do aço inoxidável mais relevantes são as que levam em consideração o ensaio realizado na direção paralela a laminação. Para atender aos critérios de dimensionamento, a curva tensão *versus* deformação utilizada é aquela obtida nos ensaios à tração com a carga aplicada na direção paralela à direção de laminação do material. Esta curva fornece elevados valores de deformação e tensões relativamente menores, o que se reflete em um dimensionamento mais seguro. Na Figura 6 estão representadas as curvas tensão *versus* deformação para os aços inoxidáveis austenítico e duplex e para o aço carbono [12].

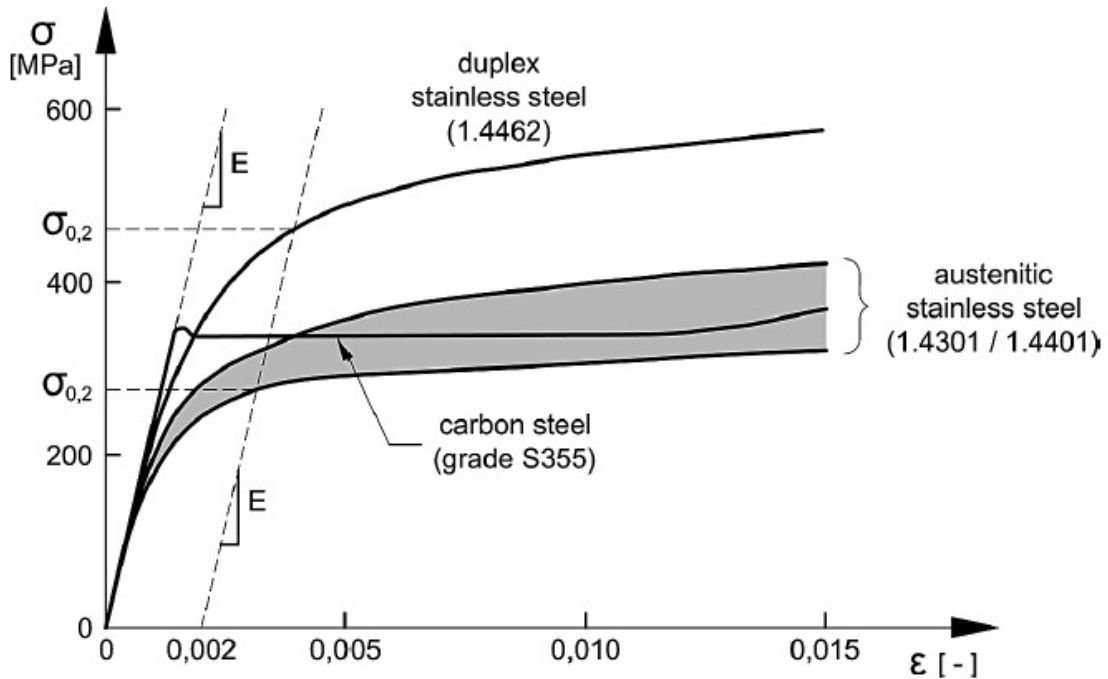


Figura 6 – Curva tensão *versus* deformação: aços inoxidáveis e aço carbono [12].

Conforme observado na Figura 6, o aço inoxidável não possui patamar de escoamento bem definido. Em virtude deste fato, a tensão de escoamento deste material ($\sigma_{0,2}$) é obtida em um ponto da curva tensão *versus* deformação onde ocorre a interseção entre a tangente inicial (Módulo de Elasticidade Inicial - E) deslocada até o ponto correspondente a deformação de 0,002 (0,2%). Na presente dissertação, tanto a tensão de escoamento (f_y) quanto a tensão última (f_u) serão representadas por $\sigma_{0,2}$ e σ_u , respectivamente.

Uma importante característica do aço inoxidável, que merece destaque, está relacionada com os fatores que afetam sua curva tensão *versus* deformação. Quando comparado com os aços carbono, a metalurgia dos aços inoxidáveis é mais complexa e o processo de produção tem um maior impacto em suas propriedades finais. Para qualquer classe de aço inoxidável, a conformação a frio e a taxa de deformação podem modificar a forma da curva tensão *versus* deformação [4].

De acordo com o Eurocode 3 – Parte 1-4 (EC3 1-4) [13], os valores relativos à tensão de escoamento (f_y) e tensão última (f_u), a serem utilizados no dimensionamento de estruturas em aço inoxidável do tipo austenítico, ferrítico e austenítico-ferrítico (duplex), podem ser utilizados conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores nominais de tensão de escoamento (f_y) e tensão última (f_u) para aços inoxidáveis estruturais [13].

Tipo de aço inoxidável	Graus	Tipologia do Produto							
		Chapas enformadas a frio		Chapas laminadas a quente		Placas laminadas a quente		Barras, vergalhões e seções	
		Espessura nominal t							
		$t \leq 6\text{mm}$		$t \leq 12\text{mm}$		$t \leq 75\text{mm}$		$t \leq 250\text{mm}$	
		f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Aços Ferríticos	1.4003	280	450	280	450	250 ³⁾	450 ³⁾	260 ⁴⁾	450 ⁴⁾
	1.4016	260	450	240	450	240 ³⁾	430 ³⁾	240 ⁴⁾	400 ⁴⁾
	1.4512	210	380	210	380	-	-	-	-
Aços Austeníticos	1.4306	220	520	200	520	200	500	180	180
	1.4307							175	450
	1.4541							190	500
	1.4301	230	540	210	520	210	520	200	500
	1.4401	240	530	220	530	220	520		
	1.4404								
	1.4539							230	530
	1.4571	540	540	200	500				
	1.4432	240	550			220	550	220	520
	1.4435								
	1.4311	290	550	270	550	270	550	270	550
	1.4406	300	580	280	580	280	580	280	580
	1.4439	290		270		270			
	1.4529	-	-	-	-	300	650	300 ²⁾	650 ²⁾
	1.4547	320	650	300	650	300	650	300	650
	1.4318	350	650	330	650	330	630	-	-
Aços Austenítico- Ferríticos (Duplex)	1.4062	530 ⁵⁾	700 ⁵⁾	480 ⁶⁾	680 ⁶⁾	450 ⁷⁾	650 ⁷⁾	380 ⁵⁾	650 ⁵⁾
	1.4162	530 ⁵⁾	700 ⁵⁾	480 ⁶⁾	680 ⁶⁾	450	650	450 ⁵⁾	650 ⁵⁾
	1.4482	500 ⁵⁾	700 ⁵⁾	480 ⁶⁾	660 ⁶⁾	450	650	400 ⁵⁾	650 ⁵⁾
	1.4662	550 ⁵⁾	750 ⁵⁾	550	750	480	680	450 ⁵⁾	650 ⁵⁾
	1.4362	450	650	400	650	400	630	400 ⁵⁾	600 ⁵⁾
	1.4462	500	700	460	700	460	640	450 ⁵⁾	650 ⁵⁾

1) Os valores nominais de f_y e f_u dados nesta tabela podem ser usados no dimensionamento sem levar em conta de forma especial os efeitos de anisotropia ou de endurecimento.

2) $t \leq 160\text{ mm}$	3) $t \leq 25\text{ mm}$	4) $t \leq 100\text{ mm}$
5) $t \leq 6,4\text{ mm}$	6) $t \leq 10\text{ mm}$	
7) $t \leq 50\text{ mm}$ ($f_y = 430\text{ N/mm}^2$ e $f_u = 625\text{ N/mm}^2$ para $50\text{ mm} < t \leq 75\text{ mm}$)		

De acordo com o EC3 1-4 [13], os seguintes valores podem ser adotados para:

- Módulo de Elasticidade Inicial – E .

$E = 200000 \text{ N/mm}^2$ para os graus austeníticos e austenítico-ferríticos da Tabela 1, exceto os graus 1.4539, 1.4529 e 1.4547;

$E = 195000 \text{ N/mm}^2$ para os graus austeníticos 1.4539, 1.4529 e 1.4547;

$E = 220000 \text{ N/mm}^2$ para os graus ferríticos da Tabela 1.

- Módulo de Elasticidade Transversal – G , onde:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

- Coeficiente de Poisson no regime elástico – ν , onde: $\nu = 0,3$.

1.5 Elementos formados por cantoneiras submetidos à compressão axial

Os elementos estruturais submetidos a compressão axial podem colapsar por escoamento ou por flambagem (global ou local). Nos elementos esbeltos, a flambagem (global ou local) é, de maneira geral, o estado limite último mais comum. A Figura 7(a) mostra uma coluna de comprimento L submetida a uma carga axial P enquanto na Figura 7(b), pode-se observar a configuração da coluna sofrendo flambagem global por flexão [15].

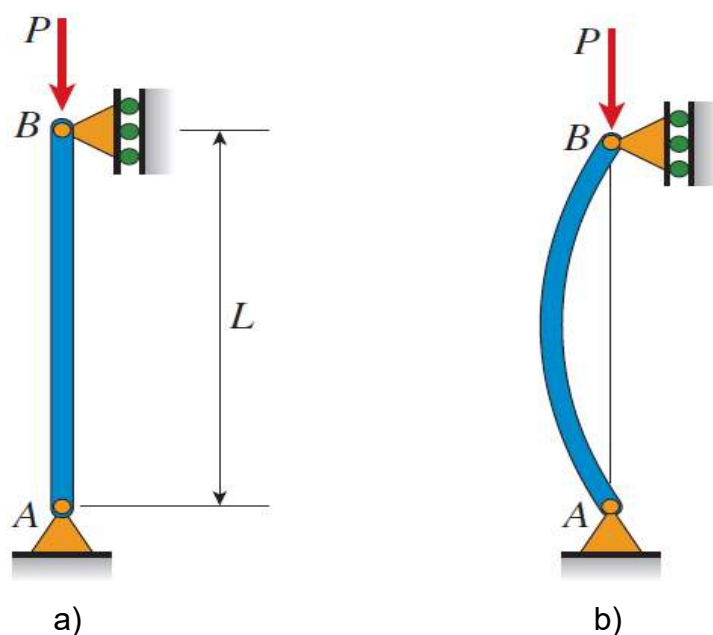


Figura 7 – Flambagem global por flexão da coluna devido a carga axial P [15].

1.5.1 Cantoneiras simples de abas iguais submetidas à compressão axial

Cantoneiras são elementos com seção transversal em formato de “L”. Podem apresentar abas com comprimentos iguais (cantoneiras de abas iguais) ou com abas que possuem comprimentos diferentes (cantoneiras de abas desiguais). São fabricadas a partir de diversos tipos de materiais (aço inoxidável, aço carbono, alumínio) e com as mais variadas dimensões.

No universo da construção metálica, cantoneiras são largamente empregadas devido a versatilidade e facilidade no que tange a execução de ligações e manuseio das peças. Entretanto, o correto dimensionamento e utilização de cantoneiras metálicas em aço inoxidável ainda carece de estudos. Observa-se que o emprego deste material, como elemento estrutural, ainda é feito de forma ineficiente e onerosa com base em adaptações das prescrições normativas para o aço carbono.

No ano de 1924 foi realizado, no *National Bureau of Standards – USA*, o primeiro ensaio à compressão em cantoneiras dando início às pesquisas em relação a este elemento estrutural.

Entretanto, um trabalho importante neste campo foi publicado por Usami & Galambos [16] em 1971. Foram realizados ensaios em cantoneiras individuais submetidas à compressão axial excêntrica com a posterior avaliação por meio de modelos numéricos. Este trabalho tinha como objetivo determinar o comportamento elasto-plástico dos elementos, levando em consideração condições mais realistas tais como os efeitos das tensões residuais e das imperfeições geométricas existentes nas cantoneiras.

Em 2017, Menezes *et al.* [17] realizou ensaios experimentais em cantoneiras de aço inoxidável austenítico ASTM A276 304 submetidas a compressão, acompanhados pelo desenvolvimento de modelos numéricos com o objetivo de comparar os resultados com as prescrições normativas estabelecidas no EC3 1-4 [13]. Foram realizados treze ensaios experimentais em colunas de cantoneiras de abas iguais em aço inoxidável austenítico com comprimento variando de 250mm a 1500mm. Todas as cantoneiras possuíam seção transversal de 64x64x6,4mm cujas condições dos apoios das colunas eram biengastadas. Menezes *et al.* [17] também desenvolveu modelos numéricos com geometrias, imperfeições geométricas e condições de contornos semelhantes à dos ensaios experimentais com o intuito de

extrapolar a análise para outras faixas de esbeltez. O modelo numérico foi calibrado com base nos resultados obtidos nos ensaios experimentais. Menezes *et al.* [17] observou que, para colunas com comprimentos menores ou iguais a um metro, o primeiro modo de flambagem obtido foi o de flexo-torção. Entretanto, ao introduzir os valores relativos às imperfeições geométricas iniciais, com base no modo de flambagem supracitado, os valores referentes as cargas finais de falha da coluna apresentaram diferença quando comparado com os valores de cargas obtidos nos ensaios experimentais. A Figura 8 mostra os comprimentos de colunas, os modos de flambagem analisados e qual modo foi adotado para introdução das imperfeições geométricas iniciais.

L (mm)	Used buckling mode number	Type of buckling mode ⁽¹⁾	Buckling modes							
			1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	7 th	8 th
250	1	L								
500	1	L								
750	8	F								
875	7	F								
1000	6	F								
1062.5	5	F								
1125	3	F								
1187.5	2	F								
1250 1375 1500	1	F								

⁽¹⁾ L is local buckling mode and F is flexural buckling mode

Figura 8 – Comprimento das colunas e modo de flambagem adotado para introdução das imperfeições geométricas iniciais - Menezes *et al.* [17].

A Figura 8 mostra que o autor avaliou o modo de flambagem mais adequado e introduziu as imperfeições geométricas iniciais com vistas a obtenção de resultados mais coerentes em relação aos resultados obtidos nos ensaios experimentais. Outro ponto de destaque observado pelo autor foi em relação às cargas obtidas por meio dos modelos numéricos em colunas com comprimento entre 1200mm e 1250mm. Ao introduzir as imperfeições geométricas no modo de flexo-torção, sendo este o primeiro modo de flambagem, os modelos numéricos apresentaram uma queda brusca nos valores referentes as cargas. Porém, tal queda, referente as cargas, não foi observada nos valores obtidos nos ensaios experimentais bem como nos modelos numéricos, onde o modo de flambagem por flexão em torno do eixo de menor inércia foi utilizado como primeiro modo. A Figura 9 mostra os gráficos carga *versus* deslocamento considerando as imperfeições geométricas iniciais introduzidas no primeiro modo (tanto de flexo-torção como flexão) dos modelos numéricos. Além disso, é mostrado a curva carga versus deslocamento com os valores obtidos nos ensaios experimentais.

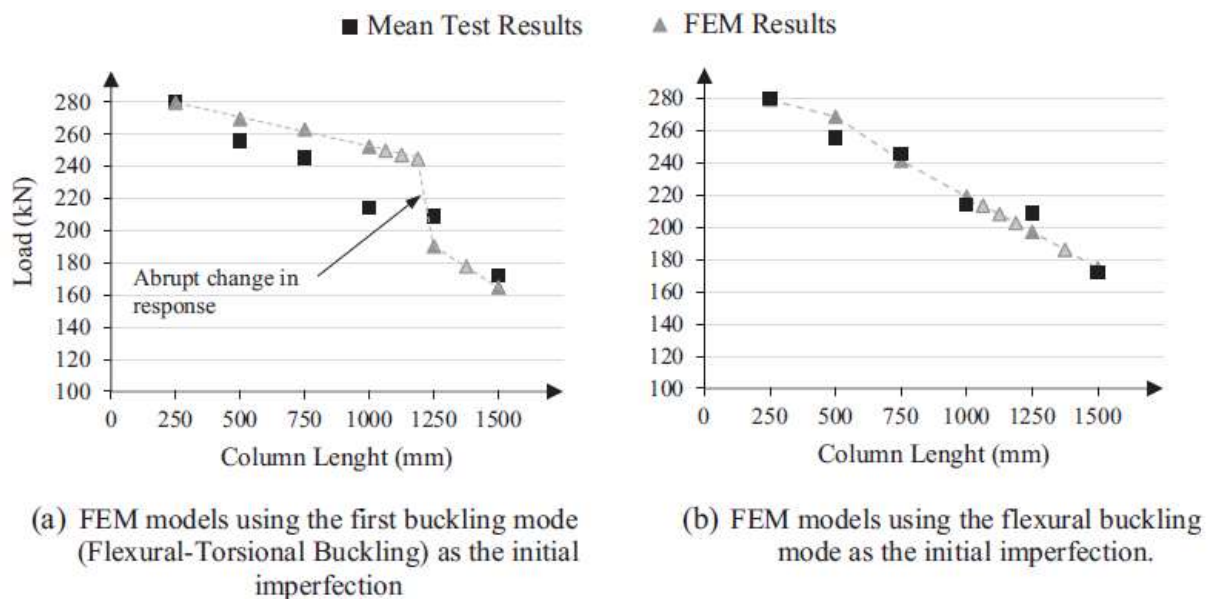


Figura 9 – Gráfico carga versus deslocamento: resultados numéricos e experimentais - Menezes *et al.* [17].

Por fim, com base nos resultados experimentais, Menezes *et al.* [17], mostrou que, em colunas com comprimento menor ou igual 750mm, o modo de falha característico é a flambagem por flexo-torção. Para as colunas com comprimento entre 750mm e 1500mm o modo de falha característico foi a flambagem global por

flexão. Além disso, o autor propôs modificações tanto no limite de esbeltez quanto no fator de imperfeição para uma melhora nos resultados de dimensionamentos de colunas formadas por cantoneiras. Menezes *et al.* [17] observou que, ao ajustar os parâmetros referentes a esbeltez ($\bar{\lambda}_0$) e fator de imperfeição (α) para 0,23 e 0,60, respectivamente, os resultados obtidos foram significativamente mais precisos em relação aos resultados experimentais, considerando o dimensionamento de colunas com seção transversal formada por cantoneira em aço inoxidável austenítico ASTM A276 304 sofrendo flambagem por flexão em torno do eixo de menor inércia

No ano de 2018, Zhang *et al.* [18] publicou um estudo relativo a colunas engastadas, formadas por cantoneiras de abas iguais em aço inoxidável, falhando por flambagem por flexão em torno do eixo de menor inércia. Nesse estudo, o autor realizou doze ensaios em colunas formadas por cantoneiras de aço inoxidável com seção transversal 80x80x10mm e comprimentos variando de 549mm a 1798,5mm, submetidas à compressão axial, levando em consideração as imperfeições geométricas iniciais (não foram medidas e introduzidas imperfeições relativas à rotação da seção transversal). Além disso, o autor realizou um estudo com base em modelos numéricos, validados pelos resultados dos ensaios experimentais, bem como um estudo paramétrico com o objetivo de ampliar os resultados para outras dimensões tanto de seções transversais quanto de comprimentos. Zhang *et al.* [18] concluiu que o EC3 1-4 [13] fornece previsões consistentes em relação a flambagem por flexão, entretanto, quando se trata de colunas com índice de esbeltez adimensional inferior a 1,0, os resultados fornecidos pela norma supracitada não são confiáveis. Em relação ao AISC [7], o autor mostrou que os resultados obtidos por meio dessa norma são demasiadamente conservadores, principalmente quando se trata de colunas com esbeltez mais elevada. Por fim, o autor propôs, com o objetivo de trazer mais precisão e segurança no que tange o dimensionamento das referidas colunas, uma alteração na curva de flambagem do EC3 1-4 [13] com fator de imperfeição de $\alpha=0,76$ e esbeltez limite de $\lambda_0=0,2$. A Figura 10 mostra as curvas de flambagem do EC3 1-4 [13], do AISC [7] bem como as curvas com base nos ensaios experimentais e nos modelos numéricos. Na Figura 10 também é possível observar a curva construída com base na proposta feita pelo autor utilizando fator de imperfeição de $\alpha=0,76$ e de $\lambda_0=0,2$.

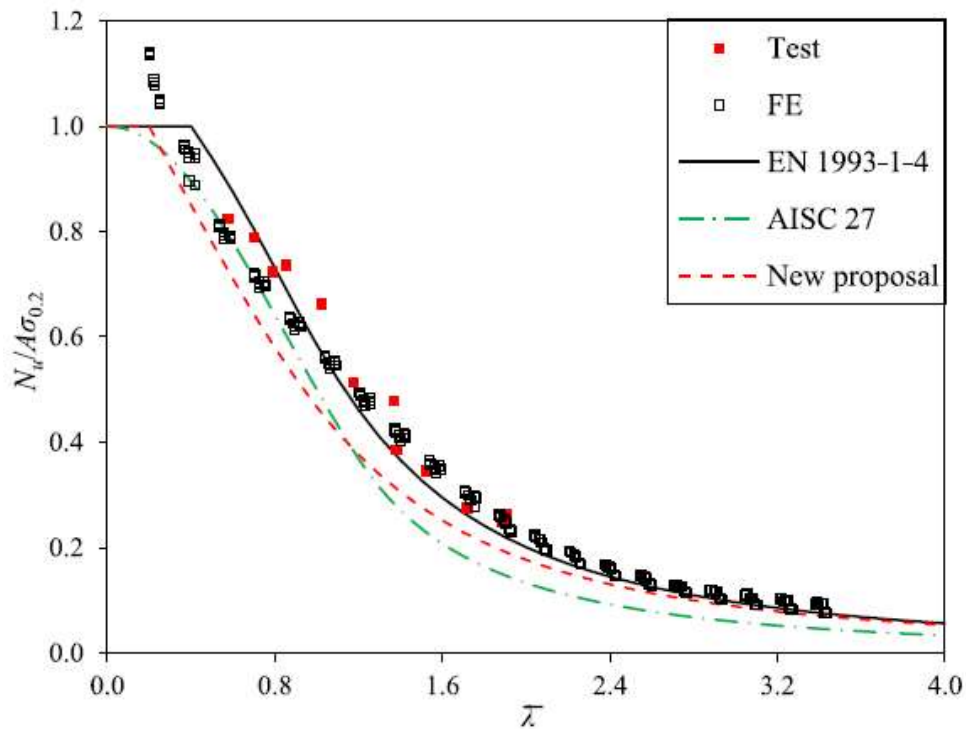


Figura 10 – Comparativo entre as cargas de falha obtidas nos ensaios experimentais e modelos numéricos com as previsões do EC3 1-4 e AISC, Zhang *et al.* [18].

Ainda em 2018, Zhang *et al.* [19] publicou um estudo cujo objetivo foi a avaliação do modo de falha por flexo-torção em colunas com seção formada por cantoneira em aço inoxidável. O autor realizou ensaios em colunas engastadas, formadas por cantoneiras de abas iguais em aço inoxidável submetidas à compressão. Além disso, foram construídos modelos numéricos com o propósito de ampliar os resultados para outras dimensões de seções e comprimentos, por meio de estudos paramétricos. Foram medidas e introduzidas imperfeições geométricas em todas as colunas ensaiadas. Foram realizados doze ensaios de colunas com seções transversais 80x80x10mm e 100x100x8mm com comprimentos variando de 299mm a 1148,5mm. No que se refere as imperfeições geométrica iniciais, o autor introduziu tanto deslocamentos transversais quanto rotações das seções (ambos foram medidos durante a fase experimental). Com base nos resultados, Zhang *et al.* [19] comparou as cargas relativas às falhas, obtidas nos ensaios experimentais, com as normas EC3 1-4 [13], SEI/ASCE 8-2 [20], AS/NZS 4673 [21] e com o Método da Resistência Direta (*Direct Strength Method* - DSM). O autor concluiu que, em relação a flambagem por flexo-torção, o EC3 1-4 [13], o SEI/AISC 8-2 [20] e o AS/NZS [21] fornecem resultados conservadores. Já o DSM fornece resultados precisos quando comparado com os

resultados experimentais. A Tabela 2 apresenta um comparativo entre as cargas de falha para colunas formadas por cantoneiras de abas iguais em aço inoxidável, obtidas por meio dos ensaios experimentais, e as cargas, previstas nas normas, para a o modo de flexo-torção.

Tabela 2 – Comparativo entre cargas de falha para o modo de flexo torção, obtidas por meio dos ensaios experimentais em relação às previsões normativas, Zhang *et al.* [18].

Grade	Cross-section	Specimen ID	$N_{u,test}/N_{u,EC3}$	$N_{u,test}/N_{u,ASCE}$	$N_{u,test}/N_{u,AS/NZS}$	$N_{u,test}/N_{u,DSM}$
14.307	A 80 × 10	A1-L1	1.11	1.62	1.62	1.09
		A1-L2	0.99	1.51	1.51	0.99
		A1-L3	0.91	1.46	1.46	0.95
	A 100 × 10	A2-L1	1.09	1.65	1.65	1.01
		A2-L2	1.07	1.64	1.64	1.01
		A2-L3	0.96	1.54	1.54	0.98
14.571	A 80 × 10	A3-L1	1.03	1.48	1.48	1.00
		A3-L2	1.00	1.47	1.47	0.98
		A3-L3	0.96	1.45	1.45	0.98
	A 100 × 8	A4-L1	1.98	1.64	1.64	0.97
		A4-L2	1.83	1.61	1.61	0.97
		A4-L3	1.78	1.58	1.58	1.12
Mean		1.23	1.55	1.55	1.00	
COV		0.32	0.05	0.05	0.05	

Em 2020, Sirqueira *et al.* [22] realizou o ensaio de dezoito colunas com seção transversal formada por cantoneiras de abas iguais compactas, laminadas a quente, em aço inoxidável austenítico 304. Foram ensaiadas colunas com três seções transversais distintas, sendo elas: L64x64x4,8mm, L76x76x6,4mm e L102x102x6,4mm. As colunas possuíam comprimentos que variavam de 152mm até 1893mm e suas condições de contorno eram biengastadas. Com relação aos resultados obtidos nos ensaios, o autor concluiu que das dezoito colunas ensaiadas, dezessete colunas apresentaram falha por flexo-torção, conforme o esperado, de acordo com as análises de estabilidade elástica realizada por meio do software GBTul [34]. Tais resultados foram tomados como base para verificar a precisão das prescrições normativas do EC3 1-4 [13], do Métodos da Resistência Contínua (*Continuous Strenght Method* - CSM) [23] e do Método da Resistência Direta (*Direct Strenght Method* - DSM) [24]. O autor mostrou que o EC3 1-4 [13] apresenta

diferenças significativas em relação ao dimensionamento quando comparado com o CSM [23] e DSM [24]. A Tabela 3 mostra o resumo dos resultados relativos às cargas de falha obtidas nos ensaios experimentais realizados pelo autor, bem como as comparações entre os resultados experimentais e os valores previstos pelo EC3 1-4 [13], CSM [23] e DSM [24].

Tabela 3 – Comparativo entre cargas de falha: ensaios experimentais, EC3 1-4 [13], CSM [23] e DSM [24], Sirqueira *et al.* [22].

Test ID	b/t	$N_{u,exp}$ [kN]	$N_{u,EC3}$ [kN]	$N_{u,mDSM}$ [kN]	$N_{u,CSM}$ [kN]	$N_{u,exp} /$ $N_{u,EC3}$	$N_{u,exp} /$ $N_{u,mDSM}$	$N_{u,exp} /$ $N_{u,CSM}$	Failure mode
L_64x64x4.8_L250_A	13.33	289.77	174.39	278.95	255.40	1.66	1.04	1.13	FT
L_64x64x4.8_L250_B		276.41	174.39	278.95	255.40	1.58	0.99	1.08	FT
L_64x64x4.8_L500_A		253.92	157.09	244.78	228.53	1.62	1.04	1.11	FT
L_64x64x4.8_L500_B		259.52	157.09	244.78	228.53	1.65	1.06	1.14	FT
L_64x64x4.8_L1000_A		227.31	149.48	216.12	218.49	1.52	1.05	1.04	FT
L_64x64x4.8_L1000_B		235.11	149.48	216.12	218.49	1.57	1.09	1.08	FT
L_64x64x4.8_L1470	11.88	213.06	145.74	181.88	213.86	1.46	1.17	1.00	F
L_76x76x6.4_L152		373.38	319.96	403.06	423.91	1.17	0.93	0.88	FT
L_76x76x6.4_L496		327.47	271.04	393.96	371.97	1.21	0.83	0.88	FT
L_76x76x6.4_L753		312.73	262.78	381.21	359.79	1.19	0.82	0.87	FT
L_76x76x6.4_L990		309.78	258.98	365.41	354.46	1.20	0.85	0.87	FT
L_76x76x6.4_L1196		276.77	256.51	348.94	351.09	1.08	0.79	0.79	FT
L_76x76x6.4_L1410	15.94	268.45	254.13	325.32	347.91	1.06	0.83	0.77	FT
L_102x102x6.4_L203		461.64	322.61	497.55	373.91	1.43	0.93	1.23	FT
L_102x102x6.4_L407		456.35	277.06	459.32	315.93	1.65	0.99	1.44	FT
L_102x102x6.4_L998		407.01	242.91	385.77	277.58	1.68	1.06	1.47	FT
L_102x102x6.4_L1480		386.71	236.73	355.05	271.61	1.63	1.09	1.42	FT
L_102x102x6.4_L1893		304.9	233.64	332.00	268.70	1.31	0.92	1.13	FT
Mean						1.43	0.97	1.07	
Minimum						1.06	0.79	0.77	
Maximum						1.68	1.17	1.47	
Standard deviation						0.22	0.11	0.22	
CoV						0.16	0.12	0.20	

FT - flexural torsional buckling

F - minor axis flexural buckling

Em 2020, Sarquis *et al.* [25] realizou ensaios experimentais com o objetivo de compreender o modo de falha em colunas com seção em cantoneira de abas iguais compactas, laminadas a quente, constituídas de aço inoxidável austenítico e obter a carga máxima resistente. Foram utilizadas cantoneiras de abas iguais compactas,

constituídas de aço inoxidável austenítico, com seções L76x76x6,4mm, L64x64x4,8mm e L64x64x6,4mm. Os comprimentos das colunas, as condições de apoio das colunas, a carga máxima resistente ($N_{u,ensaio}$), as rotações (β), os deslocamentos (d_M e d_m) e os modos de falha obtidos nos ensaios experimentais estão descritos na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Resultados obtidos nos ensaios experimentais de Sarquis *et al.* [25].

Column	Bondary Conditions	$N_{u,ensaio}$ (kN)	β (rad)	d_M (mm)	d_m (mm)	Failure Mode
L76x76x6,4 - 1350	FF	219,98	0,079	1,67	0,86	FT
L76x76x6,4 - 1500	FF	185,55	0,051	0,44	-1,07	FT
L64x64x4,8 - 1260	FF	156,26	0,088	1,60	2,17	FT
L64x64x4,8 - 1400	FF	136,25	-0,070	-2,48	4,85	FT + F
L64x64x6,4 - 800	FF	232,19	0,111	0,28	-0,74	FT
L64x64x6,4 - 850	FF	226,45	0,100	2,10	1,60	FT
L64x64x6,4 - 1450	FF	198,29	-0,005	0,64	4,38	F

Cabe salientar que, as rotações (β), os deslocamentos (d_M e d_m) são referentes as imperfeições geométricas iniciais, medidas pelo autor, para cada coluna ensaiada.

Além dos resultados expostos na tabela acima, Sarquis *et al.* [25] também mostrou que, à medida que o comprimento da coluna aumenta, a força máxima resistente diminui e a participação dos modos de falha alteram-se, de forma que a participação da flexo-torção diminui enquanto a flexão, tanto no eixo de menor inércia quanto no eixo de maior inércia, aumenta. Ainda em relação ao trabalho de Sarquis *et al.* [25], o mesmo mostrou o equívoco cometido em classificar as seções formadas por cantoneiras como classe 4, conforme previsto pelo EC3 1-4 [13]. O autor observou que o fenômeno da flambagem local não ocorre nas seções citadas. Além disso, Sarquis *et al.* [25] comparou os resultados numéricos e experimentais com as previsões normativas do EC3 1-4 [13] e verificou que a curva de dimensionamento da referida norma não permite um adequado dimensionamento da coluna.

Em 2021, Filipović *et al.* [26] avaliou, por meio de ensaios experimentais, o comportamento de colunas articuladas em aço inoxidável EN grau 1.4301 formadas por cantoneiras de abas iguais laminadas a quente sob compressão axial pura, com

o objetivo de fornecer dados confiáveis para o desenvolvimento de diretrizes para projetos. O autor realizou ensaios experimentais, considerando imperfeições geométricas iniciais e tensões residuais, para colunas formadas por cantoneiras com 60x60x6mm e 100x100x10mm. A Tabela 5 mostra um resumo dos resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados por Filipović *et al.* [26]

Tabela 5 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios experimentais de Filipović *et al.* [26].

Specimen	Failure mode	$P_{b,u,exp}$ (kN)	$d_{u,u}$ (mm)	$d_{v,u}$ (mm)	φ_u (deg)
AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 1	FB	163.9	-0.023	+2.235	-0.298
AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 2	FB	145.1	-0.388	-4.308	+0.126
AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 3	FB	172.2	-0.142	+1.834	+0.097
AHR 60 × 60 × 6 – 800 – 4	FB	151.6	-0.081	+3.170	+0.343
Mean value		158.2			
Standard deviation		12.2			
CoV (%)		7.7			
AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 1	FB	38.0	+0.384	+9.609	-0.175
AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 2	FB	47.1	+0.198	+14.113	+0.098
AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 3	FB & FTB	64.4	+2.313	32.614	+8.286
AHR 60 × 60 × 6 – 2000 – 4	FB	43.8	+0.987	-10.246	-1.186
Mean value		48.3			
Standard deviation		11.4			
CoV (%)		23.6			
AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 1	FB & FTB	466.0	-0.921	-2.488	+0.296
AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 2	FB & FTB	671.7	-0.668	+2.987	+0.409
AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 3	FTB & FB	558.7	-0.527	+0.369	+0.158
AHR 100 × 100 × 10 – 500 – 4	FB & FTB	595.2	+0.303	-1.617	+0.585
Mean value		572.9			
Standard deviation		85.4			
CoV (%)		14.9			
AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 1	FB	333.7	-0.722	+6.621	-0.369
AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 2	FB	290.2	-0.098	+9.506	-0.036
AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 3	FB & FTB	423.0	-1.533	-10.467	+1.163
AHR 100 × 100 × 10 – 1500 – 4	FB	289.4	-0.672	+8.587	+0.561
Mean value		334.1			
Standard deviation		62.8			
CoV (%)		18.8			
AHR 100 × 100 × 10 – 2500 – 1	FB	182.9	-0.117	-8.279	-0.056
AHR 100 × 100 × 10 – 2500 – 2	FB	188.9	-0.857	-8.791	+0.114
AHR 100 × 100 × 10 – 2500 – 3	FB	181.8	+0.294	+6.155	-0.035
AHR 100 × 100 × 10 – 2500 – 4	FB	204.7	-0.462	+17.624	-0.059
Mean value	186.5				
Standard deviation	14.1				
CoV (%)	7.6				

Na Tabela 5, $P_{b,u,exp}$ é a capacidade máxima de carga axial (carga de falha) obtida nos ensaios experimentais, FB e FTB representam os modos de falha por flexão e flexo-torção, respectivamente, $d_{v,u}$ e $d_{u,u}$ são, respectivamente, as deflexões laterais da seção transversal, localizadas na metade do comprimento da coluna, em relação aos eixos de maior e menor inércia e representa a rotação da seção transversal, também localizadas na metade do comprimento da coluna. Tanto $d_{u,v}$ e $d_{u,u}$ quanto φ estão associados à carga de falha ($P_{b,u,exp}$). As seções são classificadas como classe 3, segundo o EC3 1-4, e como seções não esbeltas de acordo com a classificação prevista pelo AISC.

Conforme mostrado na Tabela 5, os resultados obtidos por Filipović *et al.* [26] apontaram que colunas com seção 60x60x6mm e 100x100x10mm com 180mm e 300mm de comprimento, respectivamente, apresentaram falha por flexo-torção. As colunas com seção 100x100x10mm e 500mm de comprimento falharam pelo modo da flexo-torção acompanhado de flexão em torno do eixo de menor inércia. Para colunas com esbeltez intermediária, todas as seções 60x60x6mm e 800mm de comprimento apresentaram falha por flexão em torno do eixo de menor inércia, em três dos quatro ensaios da seção 100x100x10mm e 1500mm de comprimento o modo de falha governante foi a flambagem por flexão em torno do eixo de menor inércia, entretanto, em um dos ensaios da seção citada anteriormente a falha por flexão em torno do eixo de menor inércia foi acompanhada pela flexo-torção. Para as colunas com esbeltez elevada, o modo de falha dominante, para as colunas 60x60x6mm com 2000mm de comprimento e 100x100x10mm e 2500mm de comprimento, foi a flexão em torno do eixo de menor inércia, porém, em uma das colunas 60x60x6mm e 2000mm de comprimento, houve a interação da flexão em torno do eixo de menor inércia com a flexo-torção.

Por fim, Filipović *et al.* [26] comparou os resultados relativos as cargas de falha, obtidos nos ensaios experimentais das colunas com seção transversal formada por cantoneira laminada a quente, com os valores de carga de falha previstos pelas curvas de flambagem do EC3 1-1 [6], do EC3 1-4 [13] e do AISC [14]. A Tabela 6 mostra um resumo do comparativo citado acima, bem como os valores da esbeltez adimensional e dos modos de falha de cada coluna.

Tabela 6 – Resultados obtidos nos ensaios experimentais de Filipović *et al.* [26].

Specimen	Predicted buckling mode	Non-dimensional slenderness	EN 1993-1-1, EN 1993-1-4			AISC Design Guide 27
			$\bar{\lambda}_0 = 0.4$	$\bar{\lambda}_0 = 0.2$	$\bar{\lambda}_0 = 0.2$	
			$\alpha = 0.49$	$\alpha = 0.34$	$\alpha = 0.49$	
			$P_{u,exp} / P_{u,pred}$	$P_{u,exp} / P_{u,pred}$	$P_{u,exp} / P_{u,pred}$	
AHR 60×60×6 – 180	Major-axis FTB	0.186	1.78	1.85	1.98	2.00
AHR 60×60×6 – 800	Minor-axis FB	1.011	1.37	1.34	1.48	1.62
AHR 60×60×6 – 2000	Minor-axis FB	2.250	1.49	1.43	1.52	2.32
AHR 100×10×10 – 300	Major-axis FTB	0.186	1.39	1.45	1.55	1.56
AHR 100×10×10 – 500	Major-axis FTB	0.421	1.26	1.32	1.41	1.40
AHR 100×10×10 – 1500	Minor-axis FB	1.041	1.11	1.08	1.20	1.29
AHR 100×10×10 – 2500	Minor-axis FB	1.660	1.24	1.18	1.28	1.77

O autor ressalta que os resultados obtidos com base nas previsões normativas contidas no EC3 1-1 [6], EC3 1-4 [13] e AISC [14], são relativamente conservadores quando comparados com os resultados experimentais, especialmente os resultados previstos por esta última norma citada.

1.5.2 Cantoneiras múltiplas de abas iguais submetidas à compressão axial

Cantoneiras são elementos com diversas possibilidades de arranjos formando as mais variadas configurações. As cantoneiras duplas opostas pelo vértice, com o formato da seção cruciforme (*starred angle*), são amplamente utilizadas em estruturas metálicas, entretanto a quantidade de estudos voltados ao dimensionamento desses elementos é bastante reduzida.

O emprego de elementos estruturais formados por cantoneiras com seção cruciforme, foi investigado por Temple e Mok [27] com o intuito de avaliar a sua utilização em treliças secundárias de edifícios industriais. Geralmente, estes elementos são dimensionados com base no carregamento axial dos mesmos. Entretanto, a geometria da seção transversal das cantoneiras individuais (seção

transversal aberta) e a forma de ligação entre os elementos levou a alguns questionamentos no que diz respeito as considerações de carregamento.

Para tanto, Temple e Mok [27] realizaram onze ensaios em cantoneiras duplas opostas pelo vértice com dimensões de L45x45x5mm para a seção transversal e com comprimentos de 2100mm e 1270mm, gerando coeficientes de esbeltez iguais a 124 e 75, respectivamente. Com relação aos ensaios, cinco dos onze ensaios foram realizados com a aplicação da carga de compressão diretamente nos elementos enquanto nos demais ensaios a carga foi aplicada por meio de uma treliça. Os resultados experimentais obtidos foram comparados com os requisitos previstos pela *Canadian Standard Association* (CSA) S16.1 [28]. Com relação aos resultados, os autores concluíram que as normas e especificações não amparavam o projeto dos elementos formados por cantoneiras cruciformes. Além disso, Temple e Mok [27] propuseram um método de dimensionamento simplificado onde os fatores de comprimento efetivo são modificados de acordo com os requisitos do *Manuals and Reports on Engineering Practice* nº 52 da *American Society of Civil Engineers* (ASCE) [29]. A carga resistente à compressão é calculada conforme a cláusula 13.3.1 de S16.1 da CSA [28].

Em 2020, Botelho [30] avaliou o comportamento estrutural de seções cruciformes constituídas por cantoneiras de abas iguais de aço inoxidável austenítico com o objetivo de avaliar o desempenho das colunas quando submetidas à compressão centrada. Foram realizados oito ensaios experimentais em cantoneiras com seção transversal medindo L63,5x63,5x4,76mm com comprimento de 700mm, condições de apoio biengastada e com diferentes arranjos da seção transversal, sendo eles: seção com cantoneira simples, cantoneira dupla disposta em cruz sem ligação interna, cantoneira dupla disposta em cruz com ligações internas soldadas e cantoneira dupla disposta em cruz ligadas por chapa aparafusada. A Figura 11 mostra as configurações utilizadas no trabalho realizado pelo autor.

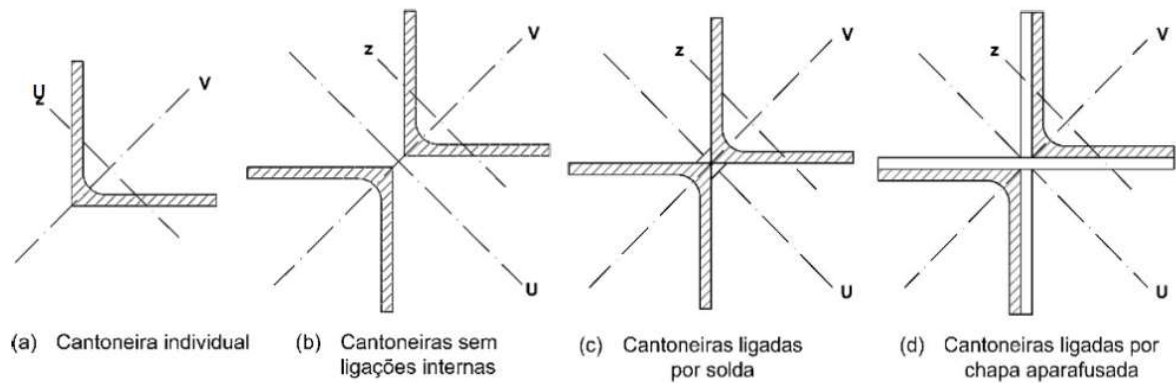


Figura 11 – Seções transversais utilizadas nos ensaios das colunas - Botelho [30].

Botelho [30] avaliou o espaçamento entre as interconexões executadas no caso de colunas compostas por cantoneiras duplas interligadas tanto por solda quanto por chapa e parafuso. Além disso, o autor também desenvolveu modelos numéricos com geometria e condições de contorno semelhantes às dos ensaios experimentais. Foram medidas as imperfeições geométricas das cantoneiras utilizadas nos ensaios e aplicadas nos modelos numéricos de modo que, tanto as configurações deformadas quanto as cargas resistentes fossem semelhantes às obtidas nos ensaios experimentais. A Figura 12 mostra a configuração deformada dos modelos experimentais e numéricos das duas colunas formadas por cantoneira dupla cruciforme, interconectadas por solda, estudadas pelo autor.

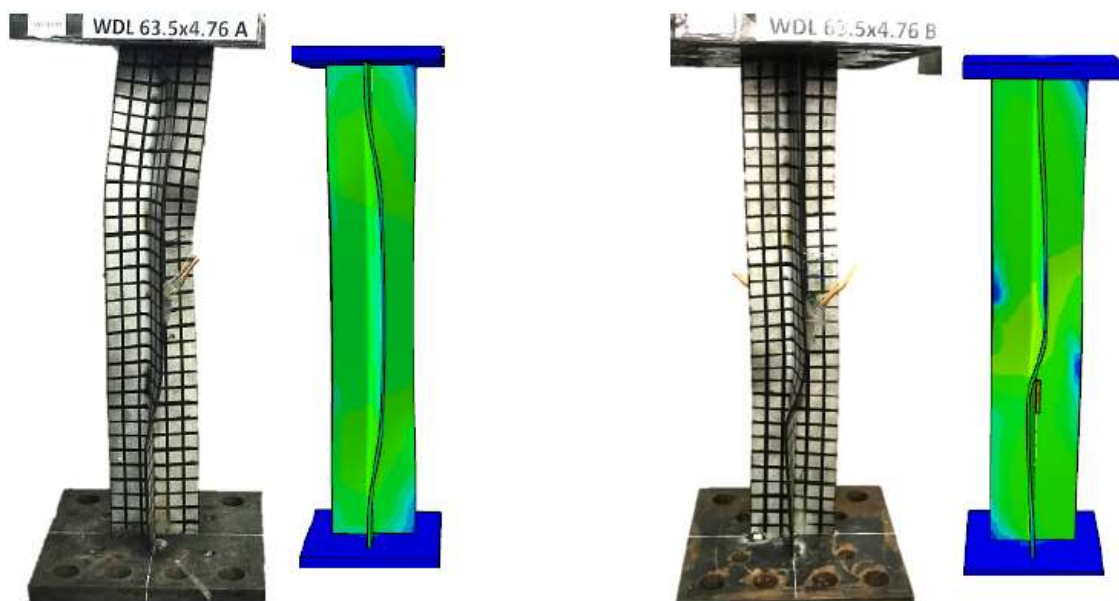


Figura 12 – Deformada dos modelos experimentais e numéricos - Botelho [30].

Com os resultados obtidos nos ensaios experimentais, o autor os comparou com os valores teóricos previstos pelo EC3 1-4 [13], pelo Método da Resistência Contínua (*Continuous Strenght Method* - CSM) [30] e, também, com os valores fornecidos pelas análises numéricas. A Tabela 7 mostra um quadro comparativo dos valores de carga obtidos na dissertação de Botelho [30].

Tabela 7 – Resultados numéricos, teóricos e experimentais - Botelho [30].

Modelo	Cargas (kN)				Comparações		
	Experimental (N_{exp})	Numérico (N_{abqs})	Eurocode (N_{EC3})	CSM (N_{csm})	$N_{exp}/$ N_{abqs}	$N_{exp}/$ N_{EC3}	$N_{exp}/$ N_{csm}
SL 63,5x4,76-A	323,50	325,80	188,88	274,57	0,993	1,713	1,178
SL 63,5x4,76-B	346,32	325,80	188,88	274,57	1,063	1,834	1,261
FDL 63,5x4,76-A	613,95	641,73	330,20	549,14	0,956	1,859	1,118
FDL 63,5x4,76-B	625,47	636,48	330,20	549,14	0,983	1,894	1,139
WDL 63,5x4,76-A	640,40	656,43	354,61	549,14	0,976	1,806	1,166
WDL 63,5x4,76-B	652,44	657,27	354,61	549,14	0,993	1,840	1,188
BDL 63,5x4,76-A	608,26	660,36	330,20	549,14	0,921	1,842	1,108
BDL 63,5x4,76-B	680,00	671,83	330,20	549,14	1,012	2,059	1,238
Média					0,987	1,856	1,175
Desvio padrão					0,039	0,091	0,051

Com base nos resultados calculados pelas recomendações do EC3 1-4 [13], Botelho [30] demonstrou que os valores de carga são extremamente conservadores quando comparados aos valores de carga obtidos nos ensaios experimentais. Entretanto, os resultados teóricos obtidos através das formulações do CSM [23] mostraram-se aceitáveis.

No que tange os resultados numéricos, os valores obtidos pelo autor foram satisfatórios quando comparados com os resultados experimentais, demonstrando que as análises computacionais são poderosas ferramentas na avaliação do comportamento de colunas.

No ano de 2021, Botelho *et al.* [31] com base em Botelho [30] e Sarquis [25] avaliou a utilização de dois métodos analíticos para o dimensionamento de colunas em aço inoxidável austenítico A304, formadas por cantoneiras duplas opostas pelo vértice (seção cruciforme). Os métodos, chamados de α (Alfa) e λ (Lambda), apresentaram melhores resultados, para as colunas com seção cruciforme no qual o

modo de falha é controlado por meio da torção, em comparação com o EC3 1-4 [13]. Botelho *et al.* [31] concluiu que o método alfa apresentou melhores resultados em relação ao EC3 1-4 [13] e que o método lambda foi ainda mais eficaz no que diz respeito ao dimensionamento de colunas cruciformes sujeitas a flambagem por torção. Os métodos citados acima sugerem modificações em relação à classificação da seção transversal, no limite de esbeltez, no fator de imperfeição e nas cargas críticas de flambagem por torção e flexo-torção. Cabe destacar que os métodos α e λ foram desenvolvidos com base no comportamento de colunas com seção transversal formada por cantoneira, entretanto, o autor mostrou que os métodos também podem ser utilizados para colunas duplas cruciformes sujeitas a flambagem por torção. A Tabela 8 mostra um comparativo entre os métodos α , λ e o EC3 1-4 [13], tanto para colunas com seção formada por cantoneiras simples quanto seção formada por cantoneira dupla cruciforme.

Tabela 8 – Comparação entre os métodos de dimensionamento - Botelho *et al.* [31].

	Class	λ_0	Equal-leg angle sections		Starred angle sections	
			α	λ	α	λ
EC3	3 and 4	0.20	0.34	$\sqrt{\frac{A \sigma_{0,2\%}}{N_{cr,ft}}}$	0.34	$\sqrt{\frac{A \sigma_{0,2\%}}{N_{cr,T}}}$
EC3 – α	–	0.25	$2.24 \left(\frac{L}{L_{T,F}} \right) - 1.34$	$\sqrt{\frac{A \sigma_{0,2\%}}{N_{cr,ft}}}$	$2.24 \left(\frac{L}{L_{T,FC}} \right) - 1.34$	$\sqrt{\frac{A \sigma_{0,2\%}}{N_{cr,T}}}$
EC3 – λ	–	0.25	0.90	$\sqrt{\frac{A \sigma_{0,2\%}}{N_{cr,M}}}$	0.90	$\sqrt{\frac{A \sigma_{0,2\%}}{N_{cr,MT}}}$

Na Tabela 8, os termos possuem os seguintes significados:

- $L_{T,F}$ e $L_{T,FC}$ - comprimentos das colunas onde ocorre a transição entre os modos de flambagem;
- $N_{cr,ft}$ - carga crítica de flambagem por flexo-torção;
- $N_{cr,T}$ - carga crítica de flambagem por torção;
- $N_{cr,M}$ - carga crítica de flambagem por flexo-torção modificada;
- $N_{cr,MT}$ - carga crítica de flambagem por torção modificada;
- A - área bruta da seção transversal;
- $\sigma_{0,2\%}$ - tensão em 0,2% de deformação.

2 DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS FORMADOS POR CANTONEIRAS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO AXIAL

2.1 Introdução

Quando um elemento estrutural está submetido a esforços de compressão axial, duas situações relativas à ruína do elemento podem se manifestar: escoamento da seção transversal ou ocorrência do fenômeno da flambagem.

A flambagem é o nome dado ao fenômeno relativo à perda de estabilidade de colunas comprimidas axialmente. Em seções transversais, formadas tanto por cantoneiras simples quanto cantoneira dupla (cruciforme com ou sem interconexões), a flambagem pode ocorrer, de forma global, pelos modos de flexão, torção ou flexo-torção.

Os diferentes modos de flambagem e suas respectivas cargas críticas manifestam-se em função de algumas variáveis, sendo elas: as características geométricas e as propriedades da seção transversal, as condições de contorno e o comprimento da coluna.

As características geométricas das seções transversais e suas propriedades interferem no modo de flambagem das colunas. As posições relativas do centroide e do centro de cisalhamento da seção influenciam diretamente no modo em que o fenômeno da flambagem pode se manifestar.

As condições de contorno também influenciam no dimensionamento das colunas submetidas a compressão no que tange o fenômeno da flambagem. O conceito de comprimento efetivo de flambagem, descrito neste capítulo, assume um papel de vital importância no que se refere a correta previsão do comportamento estrutural da coluna comprimida.

Outra variável de grande importância no dimensionamento de colunas submetidas a cargas axiais de compressão é o seu comprimento. A capacidade resistente da coluna tende a diminuir à medida que o seu comprimento aumenta. Além disso, o modo de flambagem da coluna também sofre alteração à medida que o comprimento da mesma varia.

Em relação ao dimensionamento de cantoneiras submetidas a compressão, o EC3 1-1 [6] estabelece uma classificação da seção transversal dos elementos e aplica coeficientes de redução com o objetivo de diminuir a capacidade resistente dos mesmos por conta dos fenômenos da flambagem aos quais são suscetíveis.

Outro ponto importante no que se refere a utilização de cantoneira dupla cruciforme é a garantia do trabalho em conjunto dos elementos que constituem a coluna. Este fato é determinante para estabelecer o correto modo de flambagem e a capacidade resistente da coluna. Para tanto, as normas de dimensionamento determinam uma distância máxima entre interconexões, cujo objetivo é manter o trabalho em conjunto do arranjo cruciforme durante todo o regime de carregamento a que estiver submetido.

Todavia, tanto o EC3 1-1 [6] quanto o AISC [7] apresentam diferentes critérios para o cálculo dos valores máximos de espaçamento entre interconexões. Além disso, na determinação dos espaçamentos entre interconexões, observa-se que as normas mencionadas não consideram os diversos modos de flambagem que são possíveis de se manifestarem nos elementos comprimidos.

2.2 Flambagem - seção transversal formada por cantoneiras

2.2.1 Flambagem global por flexão

Na flambagem global por flexão, o elemento estrutural apresenta uma flexão em torno do eixo de menor inércia (ocorre um movimento de translação na direção do eixo de maior inércia), assumindo uma configuração curva após a ocorrência do fenômeno. Neste modo de flambagem, a seção transversal do elemento estrutural não sofre alteração em sua geometria. A carga crítica de flambagem global por flexão, para um elemento comprimido, pode ser obtida considerando o comportamento de uma coluna ideal sob ação de uma carga centrada [32].

A Figura 13 mostra a configuração antes e após a ocorrência do fenômeno da flambagem global por flexão em uma coluna com seção transversal formada por cantoneira simples de abas iguais biapoiadas sob ação de uma carga axial P [15]. O eixo u representa o eixo de maior inércia, enquanto o eixo v , o de menor inércia.

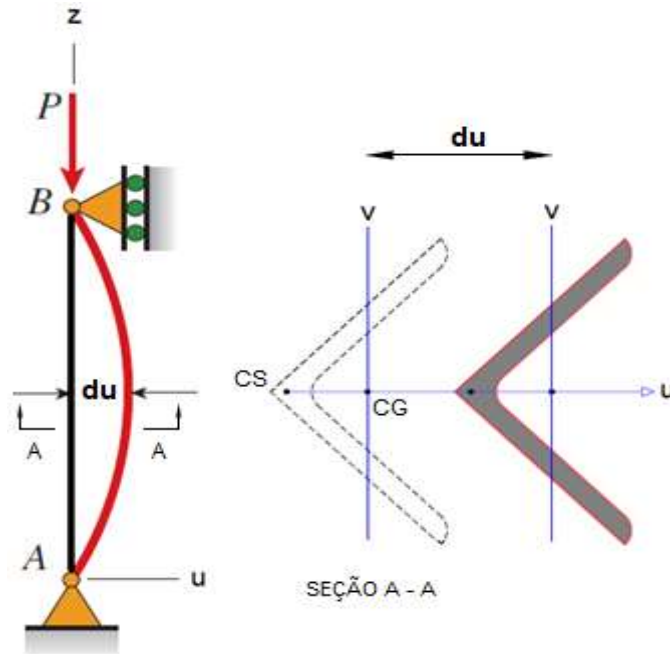


Figura 13 – Flambagem global por flexão [15] (adaptado).

Considerando uma análise elástica, a carga crítica de flambagem global por flexão é calculada por meio das equações (1) e (2).

$$N_{cr,Fu} = \frac{\pi^2 E I_u}{(k_u L)^2} \quad (1)$$

$$N_{cr,Fv} = \frac{\pi^2 E I_v}{(k_v L)^2} \quad (2)$$

Onde:

$N_{cr,Fu}$ - carga crítica de flambagem por flexão em torno do eixo u;

$N_{cr,Fv}$ - carga crítica de flambagem por flexão em torno do eixo v;

E - módulo de elasticidade do material;

I_u - momento de inércia da seção em relação ao eixo u;

I_v - momento de inércia da seção em relação ao eixo v;

$k_u L$ - comprimento efetivo de flambagem do elemento em relação ao eixo u;

$k_v L$ - comprimento efetivo de flambagem do elemento em relação ao eixo v.

As equações descritas acima são uma generalização da expressão da carga crítica de Euler. Com a introdução do coeficiente de comprimento efetivo de

flambagem k , é possível calcular a carga crítica para elementos com diferentes condições de contorno. A Figura 14 mostra os valores adotados para o coeficiente de flambagem em função das diferentes condições de contorno [15].

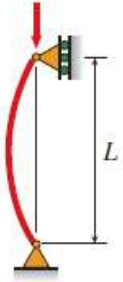
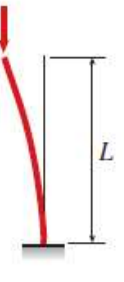
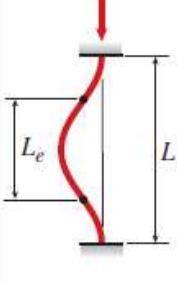
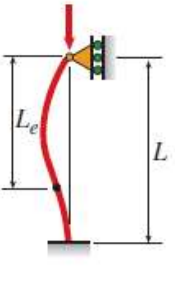
Apoiado - Apoiado	Engastado - Livre	Engastado Engastado	Engastado Apoiado
$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{L^2}$	$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{(2 L)^2}$	$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{(0,5 L)^2}$	$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{(0,7 L)^2}$
			
$L_e = L$	$L_e = 2 L$	$L_e = 0,5 L$	$L_e = 0,7 L$
$K = 1$	$K = 2$	$K = 0,5$	$K = 0,7$

Figura 14 – Valores adotados para o coeficiente de flambagem k [15] (adaptado).

O comprimento efetivo de flambagem de um elemento estrutural sob compressão é caracterizado pela distância entre os pontos de momento fletor nulo. Conforme demonstrado na Figura 14, a distância entre os pontos de momento fletor nulo variam de acordo com as condições de contorno adotadas.

Uma outra maneira de se trabalhar com as equações (1) e (2) é por intermédio do índice de esbeltez. Este índice relaciona o comprimento do elemento estrutural com sua seção transversal, permitindo com isso, estimar em torno de qual eixo ocorrerá a flambagem. Utilizando o conceito do comprimento efetivo de flambagem, o índice de esbeltez é dado pela equação (3) a seguir.

$$\lambda = \frac{k L}{r} \quad (3)$$

Onde:

kL - comprimento efetivo de flambagem da coluna;

r - raio de giração da seção transversal.

Sabendo que a relação entre o momento de inércia e o raio de giração da seção transversal é dada pela equação (4), pode-se escrever as equações (1) e (2), que governam a flambagem global por flexão em torno dos eixos principais de inércia da seção (eixos u e v), de acordo com as equações (5) e (6).

$$I = A r^2 \quad (4)$$

$$N_{cr,Fu} = \frac{\pi^2 E A}{(\lambda_u)^2} \quad (5)$$

$$N_{cr,Fv} = \frac{\pi^2 E A}{(\lambda_v)^2} \quad (6)$$

Onde:

$N_{cr,Fu}$ - carga crítica de flambagem por flexão em torno do eixo u;

$N_{cr,Fv}$ - carga crítica de flambagem por flexão em torno do eixo v;

I - momento de inércia da seção transversal;

r - raio de giração da seção transversal;

A - área bruta da seção transversal;

E - módulo de elasticidade do material;

λ_u - índice de esbeltez da coluna em relação ao eixo u;

λ_v - índice de esbeltez da coluna em relação ao eixo v.

Dividindo ambos os lados das equações (5) e (6) pela área da seção transversal, obtêm-se a tensão crítica de flambagem elástica por flexão (σ_{cr}) do elemento submetido a compressão axial, conforme as equações (7) e (8).

$$\sigma_{cr,Fu} = \frac{\pi^2 E}{(\lambda_u)^2} \quad (7)$$

$$\sigma_{cr,Fv} = \frac{\pi^2 E}{(\lambda_v)^2} \quad (8)$$

Onde:

$\sigma_{cr,Fu}$ - tensão crítica de flambagem por flexão em torno do eixo u;

$\sigma_{cr,Fv}$ - tensão crítica de flambagem por flexão em torno do eixo v.

2.2.2 Flambagem global por torção

A flambagem global por torção, ou flambagem torsional, ocorre em elementos sob compressão com seção transversal aberta de paredes finas (baixa rigidez a torção). Neste modo de flambagem, a seção transversal do elemento sofre uma torção em torno do seu centro de cisalhamento (CS) enquanto o eixo longitudinal permanece retilíneo [32]. Vale frisar que, para que ocorra a flambagem pelo modo de torção, o centro de cisalhamento (CS) deve ocupar a mesma posição do centroide (CG) da seção transversal.

Assim como no caso da flambagem global por flexão, a carga crítica da flambagem global por torção também depende das condições de contorno do elemento. O coeficiente de flambagem k é utilizado da mesma forma para representar as diferentes condições de contorno do elemento.

A Figura 15 mostra a configuração antes (seção tracejada) e após a ocorrência do fenômeno da flambagem global por torção em uma coluna com seção transversal formada por cantoneira dupla cruciforme bi apoiada [15].

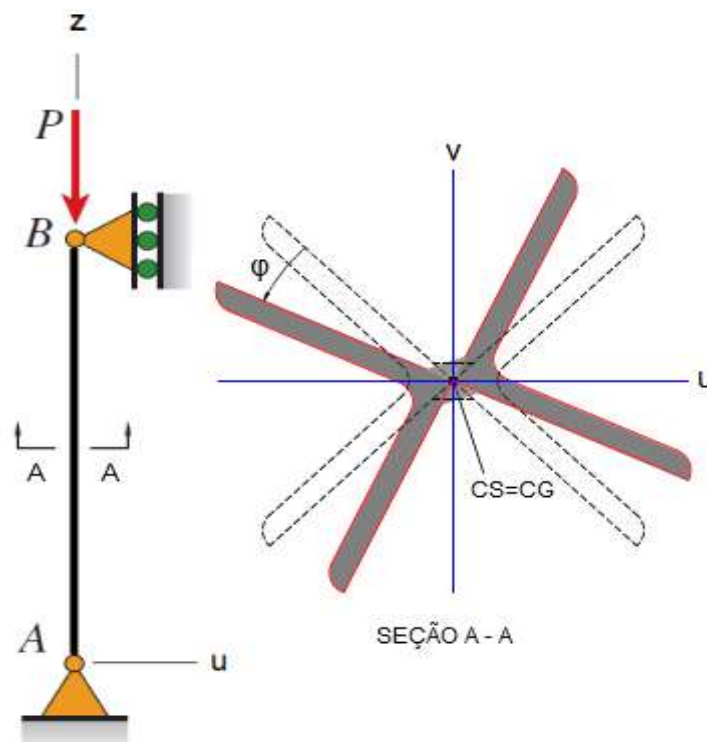


Figura 15 – Flambagem global por torção em coluna com seção cruciforme [15] (adaptado).

Considerando uma análise elástica, a carga crítica da flambagem global por torção é calculada por meio da equação (9) a seguir:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{r_0^2} \left[G J + \frac{\pi^2 E C_w}{(k_z L)^2} \right] \quad (9)$$

Onde:

$N_{cr,T}$ - carga crítica de flambagem por torção;

G - módulo de elasticidade transversal do material;

J - constante de torção da seção transversal;

C_w - constante de empenamento da seção transversal;

r_0 - raio de giração polar da seção em relação ao CS;

$k_z L$ - comprimento efetivo de flambagem da coluna em relação ao eixo z .

2.2.3 Flambagem global por flexo-torção

A análise de elementos suscetíveis a flambagem global por flexo-torção é mais complexa quando comparada com os outros modos de flambagem global (flexão e torção). Em seções formadas por cantoneiras, tal complexidade é ocasionada em virtude da seção transversal do elemento sofrer, simultaneamente, translação e rotação durante a ocorrência do fenômeno da flambagem.

A ocorrência da flambagem global por flexo-torção manifesta-se em elementos cuja seção transversal apresenta algumas das características listadas abaixo [32]:

- Seção transversal aberta e monossimétrica;
- Posição do centroide da seção transversal não coincidente com a posição do centro de cisalhamento da mesma.

O fato da posição do CG não coincidir com a posição CS da seção transversal está diretamente atrelada com o fenômeno da flambagem global por flexo-torção em colunas comprimidas, cuja seção, ao ser submetida a uma carga axial de compressão centrada, sofre flexão em torno do eixo de maior inércia u (ocorre um movimento de translação na direção do eixo de menor inércia v) e, simultaneamente, uma rotação ϕ em torno do centro de cisalhamento [32]. A Figura 16 mostra a configuração da coluna, formada por cantoneira simples, antes e após sofrer flambagem global por flexo-

torção. O eixo u é o eixo de maior inércia enquanto o eixo v representa o eixo de menor inércia.

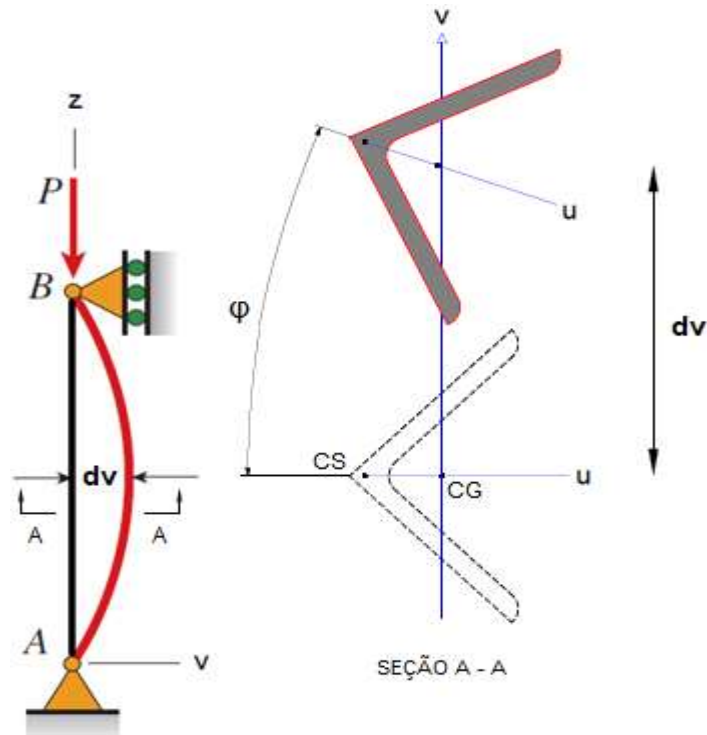


Figura 16 – Flambagem global por flexo-torção [15] (adaptado).

Para seções monossimétricas (como no caso de cantoneiras de abas iguais) e considerando uma análise elástica, a carga crítica de flambagem global por flexo-torção pode ser calculada pela equação (10):

$$N_{cr,FT} = \frac{1}{2\beta} \left[N_{cr,T} + N_{cr,Fu} - \sqrt{(N_{cr,T} + N_{cr,Fu})^2 - 4\beta N_{cr,T} N_{cr,Fu}} \right] \quad (10)$$

Onde:

$N_{cr,FT}$ - carga crítica de flambagem por flexo-torção;

$N_{cr,T}$ - carga crítica de flambagem por torção;

$N_{cr,Fu}$ - carga crítica de flambagem por flexão em torno do eixo u ;

u_{G0} - distância entre o centroide (CG) e o centro de cisalhamento (CS) da seção;

r_0 - raio de giração polar da seção em relação ao CS;

β - coeficiente dado por : $\beta = 1 - \left(\frac{u_{G0}}{r_0} \right)^2$, onde β relaciona a distância entre o CG e o CS da seção transversal.

2.3 Características da flambagem em seções formadas por cantoneiras

2.3.1 Seção cantoneira simples de abas iguais

Na Figura 17 tem-se a seção transversal de um elemento formado por cantoneira simples de abas iguais e suas características geométricas, sendo elas: o comprimento das abas (b), a espessura das abas (t), os eixos principais de maior e menor inércia (u e v , respectivamente), o centroide (CG), o centro de cisalhamento (CS) e a distância entre o centroide e o centro de cisalhamento (u_0).

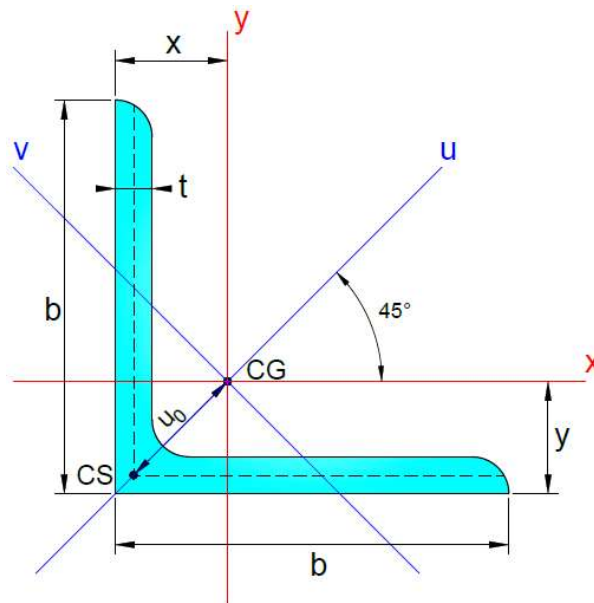


Figura 17 – Seção transversal cantoneira simples de abas iguais.

Quando solicitadas por uma carga axial de compressão, as colunas formadas por cantoneira simples de abas iguais podem manifestar o fenômeno da flambagem por meio de dois modos diferentes: flambagem global por flexão ou flambagem global por flexo-torção. Cabe salientar que, para uma mesma seção transversal, o comprimento da coluna é o fator que irá determinar qual modo de flambagem ocorrerá.

A coluna com seção transversal formada por cantoneira simples tende a fletir em torno de um de seus eixos principais de inércia (eixos que contém o centroide da seção). Caso o eixo principal de inércia não contenha o centro de cisalhamento (eixo de menor inércia – v) a flambagem ocorrerá por meio da flexão em torno deste eixo, caracterizando a flambagem global por flexão. A Figura 18 mostra uma seção

transversal formada por cantoneira simples cuja flambagem ocorreu por meio do modo de flexão em torno do eixo de menor inércia.

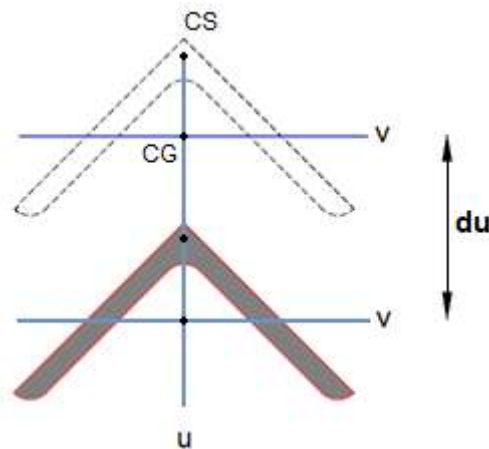


Figura 18 – Seção cantoneira simples: flambagem por flexão em torno do eixo de menor inércia.

Entretanto, caso o eixo principal de inércia contenha o centro de cisalhamento (eixo de maior inércia – u) ocorrerá uma flexão em torno desse eixo e, simultaneamente, uma rotação em torno do eixo vertical da coluna (eixo – z), manifestando assim a flambagem global por flexo-torção. A Figura 19 mostra uma seção transversal formada por cantoneira simples cuja flambagem ocorreu por meio do modo de flexo-torção.

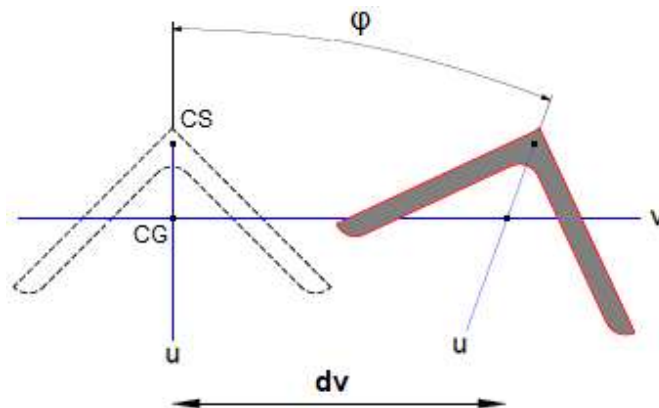


Figura 19 – Seção cantoneira simples: flambagem por flexo-torção.

Por ser uma seção monossimétrica e com o centro de cisalhamento localizado na junção das linhas médias da seção transversal as cantoneiras de abas iguais

possuem uma baixa rigidez a torção e constante de empenamento com valor muito próximo de zero ($C_w \approx 0$) [33].

Cabe ressaltar que, o modo de flambagem que irá se manifestar dependerá do comprimento da coluna comprimida axialmente. Até um determinado comprimento, a coluna sofre flambagem por meio da flexo-torção, para comprimentos maiores, o modo de flambagem ocorre pela flexão em torno do eixo de menor inércia.

2.3.2 Seção cruciforme - cantoneira dupla de abas iguais

Ao utilizar elementos com seção transversal formada por dupla cantoneira de abas iguais opostas pelo vértice (cantoneira dupla cruciforme), sem interconexões, conforme mostrado na Figura 20, obtém-se um comportamento semelhante ao observado em elementos formados por cantoneira simples de abas iguais.

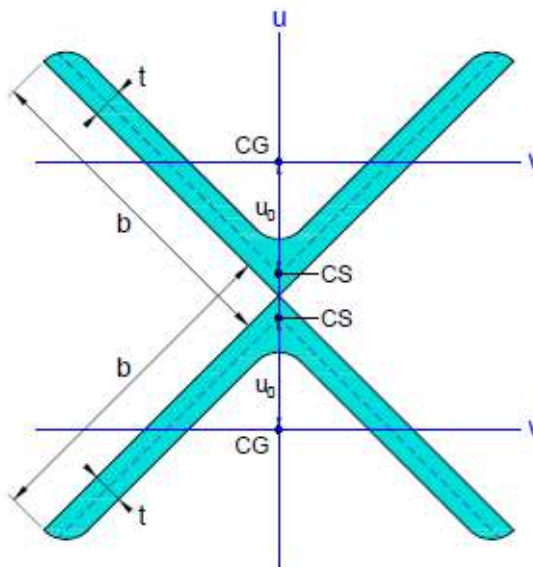


Figura 20 – Seção cantoneira dupla cruciforme.

O fenômeno de instabilidade da coluna manifesta-se por meio da flambagem global por flexão ou flambagem global por flexo-torção em relação as cantoneiras trabalhando de forma individual. A Figura 21(a) mostra a seção transversal de uma coluna formada por cantoneira dupla cruciforme sofrendo flambagem por meio da flexão global em torno do eixo de menor inércia. Já a Figura 21(b) mostra a seção transversal de uma coluna formada por cantoneira dupla cruciforme na qual a flambagem ocorre por meio da flexo-torção. Cabe observar que, nas duas situações,

as cantoneiras comportam-se de forma independente uma da outra, ou seja, trabalham de forma individual.

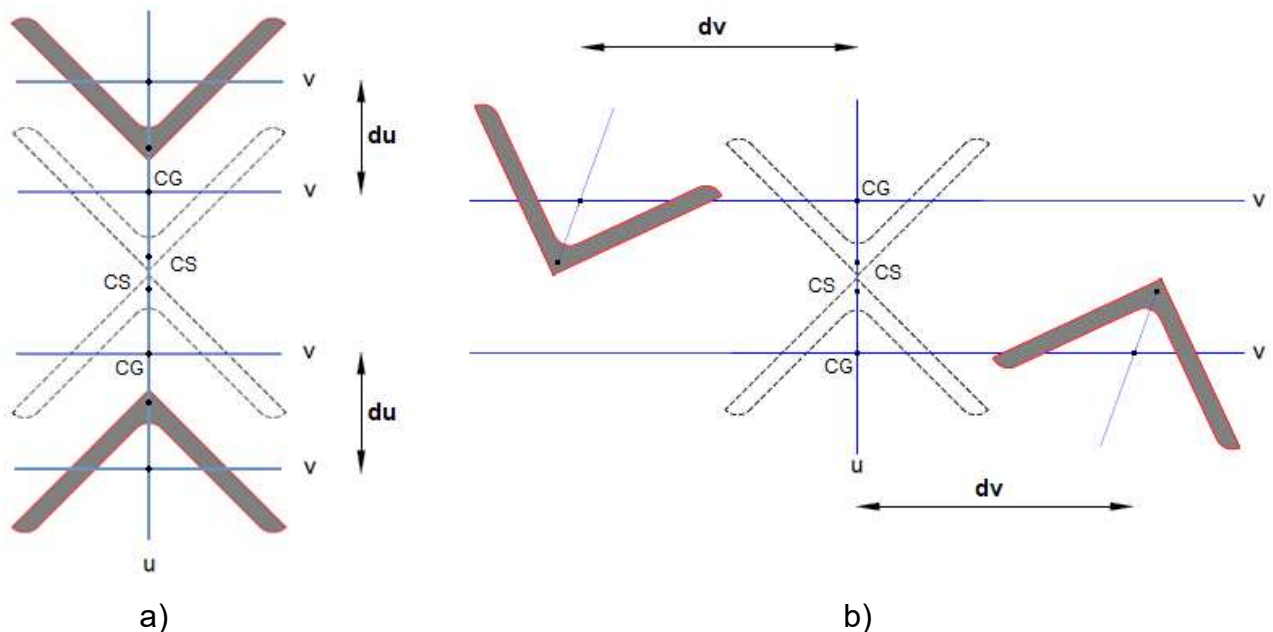


Figura 21 – Seção cantoneira dupla cruciforme: a) flambagem global por flexão em torno do eixo de menor inércia e b) flambagem global por flexo-torção.

Com relação a carga a crítica de flambagem da seção formada por cantoneira dupla cruciforme, seu valor é o dobro daquele apresentado pela coluna com seção transversal formada por cantoneira simples.

Para o modo de flambagem, este pode se manifestar tanto pela flexo-torção quanto pela flexão, sendo tal modo definido pelo comprimento da coluna comprimida axialmente.

2.3.3 Seção cruciforme - cantoneira dupla de abas iguais com interconexões

Ainda em relação a elementos com seção transversal formada por cantoneira dupla de abas iguais opostas pelo vértice (cantoneira dupla cruciforme), um fato interessante ocorre quando as duas seções são interconectadas. Na Figura 22 apresenta-se uma seção transversal formada por cantoneira dupla cruciforme com interconexões soldadas.

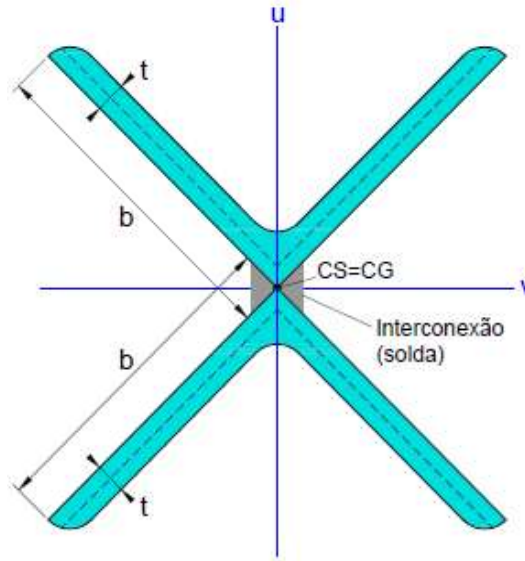


Figura 22 – Seção cantoneira dupla cruciforme interconectada.

Ao inserir um determinado número de interconexões (ligações soldadas, por exemplo) entre as duas cantoneiras é possível garantir que ambas trabalhem em conjunto. Com isso, quando submetidas a uma carga de compressão axial, tanto o modo de flambagem quanto a capacidade resistente dos elementos sofrem alterações.

Nos trechos de uma coluna cruciforme, onde são realizadas as interconexões entre os vértices das cantoneiras, a distância entre o CS e o CG da seção transversal tende a zero. Esta coincidência entre a posição do centro de cisalhamento e o centroide da seção é responsável pela manifestação do modo de flambagem por torção nas seções cruciformes.

Ao inserir interconexões entre as cantoneiras de uma coluna, diminui-se o comprimento onde as seções transversais trabalham de forma individual. Sendo assim, para uma coluna com determinado comprimento, com seção transversal formada por cantoneira dupla cruciforme axialmente comprimida, à medida em que o número de interconexões aumenta, o modo de flambagem da coluna sofre alteração. Esta passa de um comportamento característico de cantoneira simples (modo de flambagem por flexo-torção ou por flexão em torno do eixo de menor inércia da cantoneira individual) para um comportamento em conjunto característico de uma seção cruciforme (modo de flambagem por torção ou flexão em torno do eixo de menor inércia do conjunto). As seções apresentadas na Figura 23 mostram a seção transversal de uma coluna, formada por cantoneira dupla cruciforme, com

interconexões em número suficiente para garantir o trabalho em conjunto. A Figura 23(a) mostra a ocorrência da flambagem por meio da torção do conjunto, enquanto na Figura 23(b) a flambagem é caracterizada pela flexão em torno do eixo de menor inércia do conjunto. O modo de flambagem que irá se manifestar dependerá do comprimento da coluna comprimida axialmente.

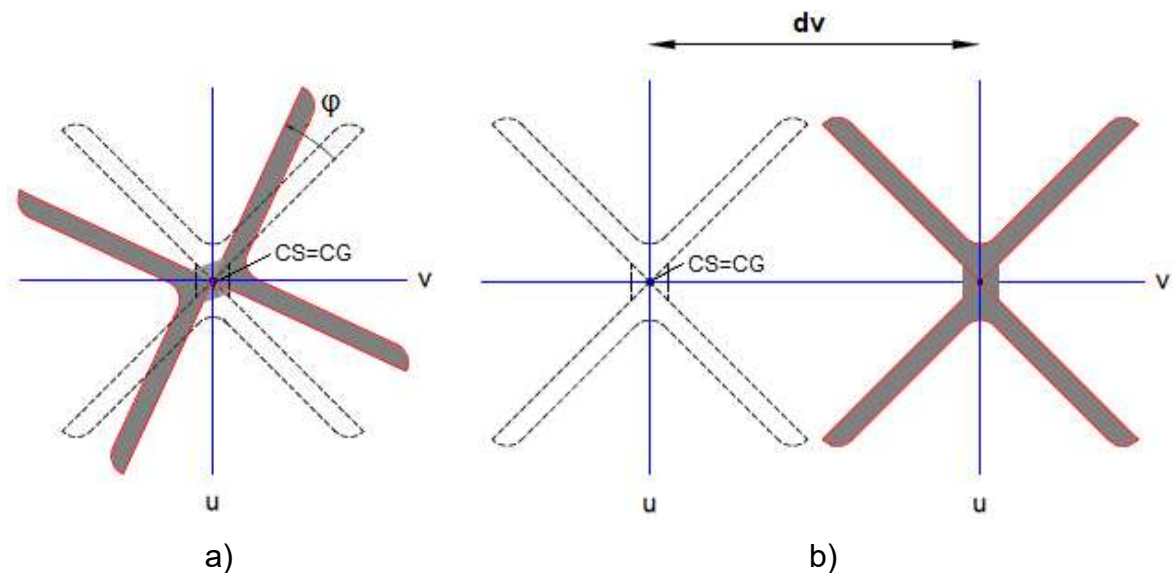


Figura 23 – Seção cantoneira dupla cruciforme interconectada: a) flambagem global por torção e b) flambagem global por flexão em torno do eixo de menor inércia do conjunto.

Tanto o modo de flambagem por torção quanto o modo de flambagem por flexão em torno do eixo de menor inércia acusam o trabalho em conjunto da seção formada por cantoneira dupla cruciforme interconectada.

2.3.4 Modos de flambagem *versus* curva de assinatura

O modo de flambagem de colunas sob compressão manifesta-se por meio da combinação de diversos modos de deformação. Entretanto, um dos modos destaca-se em relação aos outros, sendo este o modo representativo do fenômeno de instabilidade para a coluna.

Com isso, para uma determinada coluna, com seção transversal constante e submetida a compressão axial, ao variar o seu comprimento, o modo de flambagem permanece o mesmo até um determinado comprimento da coluna, a partir de tal comprimento, o modo de flambagem sofre alteração. Como exemplo, para colunas

com seção transversal formada por cantoneira simples, o modo de flambagem predominante é a flexo-torção, até um determinado comprimento. A partir de tal comprimento, o modo de flambagem representativo passa a ser a flexão em torno do eixo de menor inércia. Este comportamento, relativo à mudança no modo de flambagem, também ocorre para as seções formadas por cantoneira dupla cruciforme, com e sem interconexão.

Ao correlacionar os comprimentos com as cargas críticas de flambagem, obtém-se a curva de assinatura para a seção em questão. Com esta curva é possível avaliar as cargas críticas de flambagem elástica e os seus respectivos modos de flambagem de acordo com o comprimento da coluna. Além disso, a curva de assinatura permite determinar em qual comprimento da coluna ocorre a transição entre os modos de flambagem.

Para exemplificar o que foi descrito no parágrafo acima, a Figura 24 mostra a curva de assinatura para uma seção transversal formada por cantoneira simples de abas iguais. A cantoneira possui abas com 50,8mm de comprimento e 6,35mm de espessura. No eixo das abscissas encontram-se os comprimentos das colunas (L) e no eixo das ordenadas estão as cargas críticas de flambagem elástica (N_{cr}). Neste exemplo é possível observar que a transição entre os modos de flexo-torção e flexão ocorre em colunas com, aproximadamente, 800mm de comprimento.

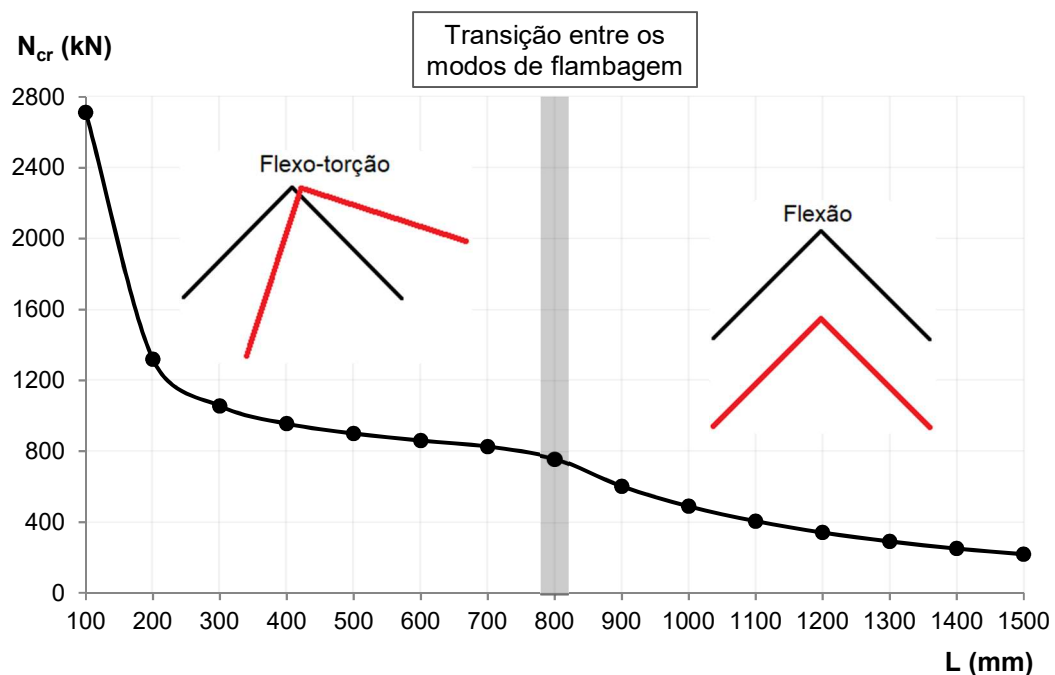


Figura 24 – Curva de assinatura - cantoneira simples de abas iguais L50,8x6,35mm.

No capítulo cinco é feita uma descrição detalhada das informações obtidas com as curvas de assinatura.

2.4 Cantoneiras submetidas à compressão axial - Eurocode 3

2.4.1 Classificação da seção transversal

As relações entre a largura e a espessura (b/t) de elementos, cuja seção transversal esteja submetida a esforços de compressão ou flexão, determinam se os mesmos estão sujeitos a flambagem local.

A Tabela 9 mostra, de acordo com EC3 1-1 [6], a classificação da seção transversal das cantoneiras em função da relação largura e espessura (b/t) e do parâmetro de deformação (ϵ). Cabe salientar que, caso a seção transversal da cantoneira não satisfaça os critérios para se enquadrar na Classe 3, ela será classificada como Classe 4.

Tabela 9 – Classificação da seção transversal de cantoneiras - EC3 1-1 [6].

<u>Cantoneiras</u> Refere-se também a abas externas Não se aplica a cantoneiras em contato contínuo com outros elementos.				
Classe	Seção em compressão			
3	$\frac{h}{t} \leq 15,0\epsilon ; \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$			
$\epsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Classe	1.4301	1.4401	1.4462
	f_y (N/mm ²)	210	220	460
	ϵ	1,03	1,01	0,698

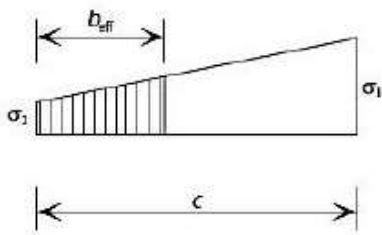
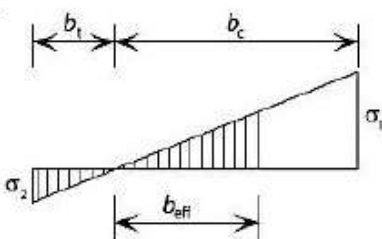
Conforme descrito no parágrafo anterior, caso a seção transversal da cantoneira seja classificada como Classe 4, a área da seção transversal da mesma deverá ser reduzida. Para isso, utiliza-se o método da largura efetiva, cuja largura da

seção transversal, que não atinge a tensão de escoamento, é subtraída da largura total do elemento. Com essa diminuição, obtém-se a largura efetiva (b_{eff}) e, multiplicando pela espessura da seção, obtém-se a área efetiva (A_{eff}) [4]. Para que seja possível calcular a largura efetiva das abas das cantoneiras, deve-se utilizar os parâmetros descritos a seguir:

- Ψ - relação de distribuição normal de tensões na seção transversal;
- k_σ - coeficiente de flambagem da placa;
- $\bar{\lambda}_p$ - coeficiente de esbeltez normalizado do elemento da seção;
- ρ - fator de redução.

Os parâmetros Ψ e k_σ estão descritos na Tabela 10 a seguir.

Tabela 10 – Parâmetros de distribuição de tensões (Ψ) e coeficiente de flambagem (k_σ) [4].

Distribuição de tensão (compressão positiva)		Largura efetiva b_{eff}		
		$1 > \psi > 0$ $b_{eff} = \rho c$		
		$\psi < 0$ $b_{eff} = \rho b = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$+1 \geq \psi \geq -3$
Coeficiente de flambagem k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$

De posse dos valores relativos a razão de distribuição normal de tensões na seção transversal (Ψ) e do coeficiente de flambagem da placa (k_σ), é possível calcular tanto o coeficiente de esbeltez normalizado ($\bar{\lambda}_p$) do elemento da seção quanto o fator de redução (ρ) com base nas equações (11) e (12), respectivamente.

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

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \quad (12)$$

2.4.2 Dimensionamento de cantoneiras submetidas à compressão axial

A segurança de elementos estruturais é garantida pela inequação de conformidade (13) baseada no método dos estados limites últimos (ELU).

O dimensionamento de elementos estruturais tem como base o ELU. Este método, que é válido tanto para o aço carbono quanto para o aço inoxidável, garante que, para cada seção do elemento, os esforços solicitantes de projeto (provenientes das combinações de ações, cada qual majorada pelo seu adequado coeficiente) sejam menores que os esforços resistentes (cujos valores são minorados pelo coeficiente de segurança conveniente para cada caso).

A inequação de conformidade (13) traduz este método para o caso de elementos submetidos à compressão axial.

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (13)$$

Onde:

$N_{c,Sd}$ - esforço axial solicitante de projeto;

$N_{c,Rd}$ - esforço axial resistente de projeto.

O cálculo do esforço axial resistente de projeto é feito por meio da aplicação de um fator, que tem como objetivo reduzir a carga de plastificação da seção frente ao fenômeno de flambagem global a qual o elemento está sujeito. Este fator de redução associado à flambagem global (χ) tem como base as curvas de flambagem descritas no EC3 1-1 [6], cujo valor é calculado pela equação (14).

$$\chi = \frac{1}{\Phi + [\Phi - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1 \quad (14)$$

A relação entre os parâmetros (Φ) é dada pela seguinte equação (15).

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (15)$$

Onde:

$\bar{\lambda}$ - esbeltez normalizada do elemento estrutural submetido à compressão;

α - fator de imperfeição;

$\bar{\lambda}_0$ - limite de esbeltez normalizada.

Os valores relativos aos parâmetros (α) e ($\bar{\lambda}_0$) estão descritos na Tabela 11 [13].

Tabela 11 – Fator de imperfeição (α) e limite de esbeltez normalizada ($\bar{\lambda}_0$)[13].

Modo de flambagem	Tipo de elemento	α	$\bar{\lambda}_0$
Flexão	Seções abertas enformadas à frio	0,49	0,40
	Seções vazadas (soldadas e sem costura)	0,49	0,40
	Seções abertas soldadas (maior eixo)	0,49	0,20
	Seções abertas soldadas (menor eixo)	0,76	0,20
Torção	Todos os membros	0,34	0,20
Flexo-torção			

A esbeltez normalizada do elemento estrutural submetido à compressão deve ser calculada, dependendo da classe da seção, por meio da equação (16) ou (17).

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \sigma_{0,2\%}}{N_{cr}}} \rightarrow \text{classe 3} \quad (16)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \sigma_{0,2\%}}{N_{cr}}} \rightarrow \text{classe 4} \quad (17)$$

Onde:

A - área bruta da seção transversal;

A_{eff} - área efetiva da seção transversal;

$\sigma_{0,2\%}$ - tensão do aço inoxidável para uma deformação de 0,2%;

N_{cr} - carga crítica de flambagem elástica.

A carga crítica de flambagem elástica (N_{cr}) deverá ser calculada pelas equações (1) a (4), cuja escolha dependerá do modo de flambagem associado ao elemento comprimido axialmente.

Após determinar o fator de redução associado à flambagem global (χ), calcula-se a resistência do elemento comprimido com base nas equações (18) e (19), dependendo da classe da seção.

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A \sigma_{0,2\%}}{\gamma_{M1}} \rightarrow \text{classe 3} \quad (18)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} \sigma_{0,2\%}}{\gamma_{M1}} \rightarrow \text{classe 4} \quad (19)$$

Onde:

$N_{b,Rd}$ - carga resistente de projeto do elemento comprimido;

χ - fator de redução associado à flambagem global;

A - área bruta da seção transversal;

A_{eff} - área efetiva da seção transversal;

γ_{M1} - coeficiente de segurança parcial.

2.5 Interconexões entre cantoneiras duplas cruciformes

Conforme já citado anteriormente, a utilização de cantoneiras como elementos estruturais não se restringe apenas ao uso desta seção de forma simples. Os diferentes arranjos entre as seções de cantoneiras e as vantagens, tanto do ponto de vista estrutural quanto do ponto de vista econômico, tornam as cantoneiras fortes candidatas a serem utilizadas como elementos estruturais. Entretanto, a escolha de determinado arranjo deve ser feita de forma criteriosa pelo projetista estrutural, tendo como base a finalidade da estrutura, a facilidade em relação a execução dos elementos e ligações, a economia de materiais e os custos de manutenção.

As colunas, com seção transversal formada por cantoneira dupla cruciforme interconectada e sob compressão axial, apresentam elevado desempenho do ponto de vista estrutural e econômico quando comparados com outras seções. No entanto, para que a coluna cruciforme possa ser utilizada da forma mais eficiente possível, deve-se respeitar a distância máxima entre as interconexões das cantoneiras que compõe a seção. Tal distância entre interconexões tem como objetivo garantir o trabalho em conjunto da coluna cruciforme.

Com relação às formas de se interconectar as cantoneiras, estas podem ser executadas de diversos modos, sendo que as ligações feitas por meio de soldas ou chapas metálicas aparafusadas, igualmente espaçadas ao longo do comprimento da coluna, são as mais comuns.

A Figura 25(a) mostra interconexões entre cantoneiras feitas com chapa aparafusada. Já a Figura 25(b) mostra interconexões realizadas por meio de solda - Botelho [30].

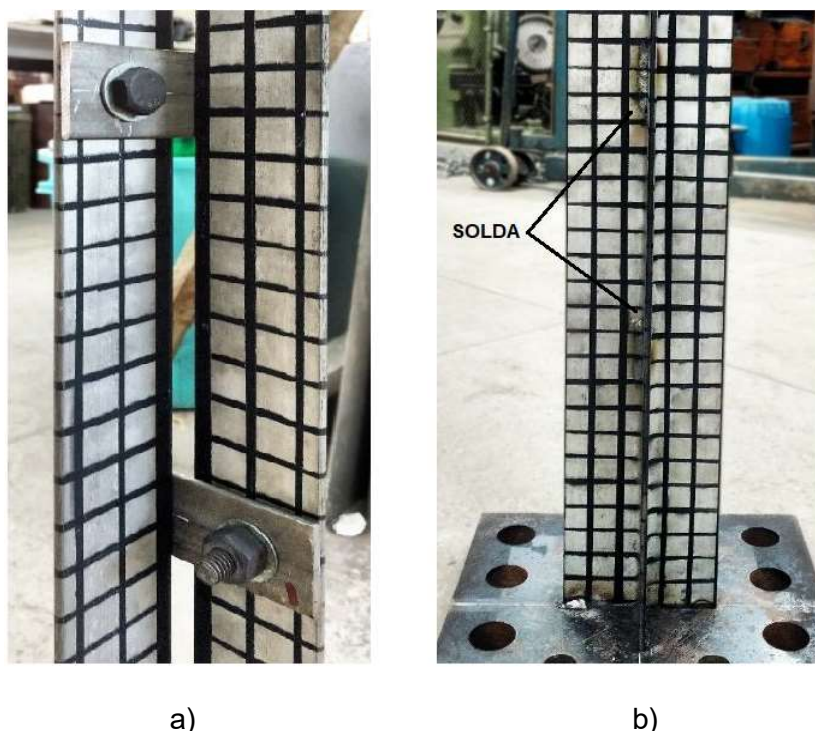


Figura 25 – Interconexões: a) com chapa aparafusada e b) por meio de solda - Botelho [30].

Desta forma, tanto o EC3 1-1 [6] quanto o AISC [7], determinam distâncias máximas entre as interconexões para que o elemento projetado atue como uma unidade.

2.5.1 Distância máxima entre interconexões - AISC

A prescrição normativa constante no AISC [7] determina que, em interconexões de cantoneiras duplas, o coeficiente de esbeltez entre duas interconexões de uma cantoneira individual não deve exceder 75% do coeficiente de esbeltez do conjunto. A inequação (20) demonstra a prescrição do referido manual.

$$\frac{k a}{r_z} \leq \frac{3}{4} \left(\frac{k L}{r} \right)_{\text{máx}} \quad (20)$$

Onde:

k - coeficiente de flambagem;

a - distância entre interconexões (de centro a centro);

r_z - raio de giração principal da cantoneira individual;

$\left(\frac{k L}{r} \right)_{\text{máx}}$ - maior coeficiente de esbeltez do conjunto.

2.5.2 Distância máxima entre interconexões - EC3 1-1

O EC3 1-1 [6] estabelece que, elementos comprimidos com abas em contato ou pouco espaçadas e interconectadas por chapas ou soldas, conforme a Figura 26, deverão ser verificados à flambagem como um único elemento, desconsiderando a rigidez ao esforço cortante, desde que sejam satisfeitas as condições da Tabela 12 a seguir.

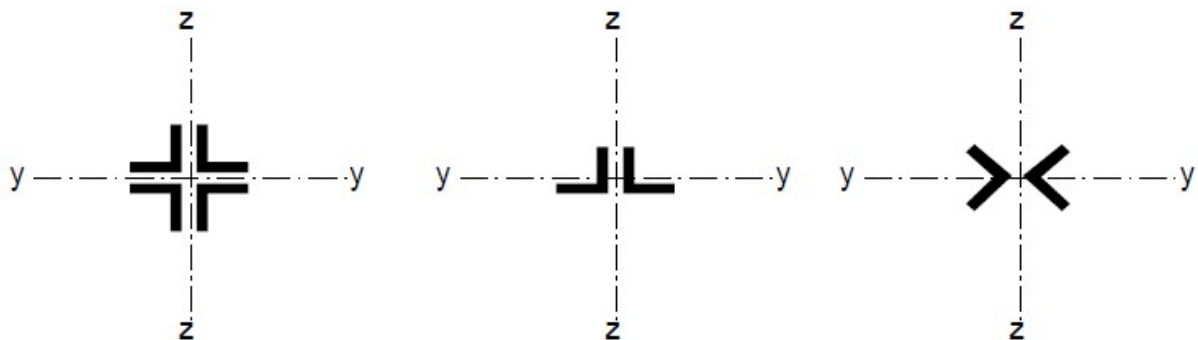


Figura 26 – Arranjo de cantoneiras com abas em contato ou com pequeno afastamento.

Tabela 12 – Distância máxima entre interconexões: cantoneiras compostas [6].

Tipo de elemento composto	Distância máxima entre interconexões*
Elemento de acordo com a Figura 26, conectados entre si por parafusos ou solda	15 $i_{\min}$
Elemento de acordo com a Figura 26, conectados entre si por pares de chapa	70 $i_{\min}$

* Distância medida entre os centros das interconexões
 $i_{\min}$ - Raio de giração mínimo de uma cantoneira

3 PROPRIEDADES DO MATERIAL, DIMENSÕES E NOMENCLATURA

3.1 Introdução

No presente trabalho foram analisadas colunas com seção transversal formadas tanto por cantoneiras simples de abas iguais quanto por cantoneiras duplas cruciformes constituídas de aço inoxidável austenítico 304. No caso das cantoneiras duplas cruciformes, foram analisadas colunas sem interconexões e com interconexões igualmente espaçadas entre si.

Tanto o comprimento das colunas quanto as dimensões da seção transversal foram escolhidas com base nas curvas de assinatura. Tais curvas foram obtidas com o auxílio do *software* GBTul [34].

Visto que as colunas analisadas possuem dimensões e características distintas, foi criada uma nomenclatura com o objetivo de organizar e identificar o tipo de seção transversal, as dimensões dos elementos, o número de interconexões, a distância entre as interconexões e os modos de flambagem associados ao fenômeno da flambagem.

3.2 Propriedades do material

O material escolhido para realização do presente trabalho foi o aço inoxidável austenítico 304, em virtude da grande aplicabilidade e pela fácil execução dos componentes estruturais formados por esse material.

Cabe ressaltar que, o planejamento inicial deste trabalho previa ensaios laboratoriais de caracterização. Tais ensaios tinham como objetivo principal extrair informações relativas às propriedades do aço e utilizá-las nos modelos numéricos, cuja finalidade era retratar os ensaios experimentais e extrapolar os resultados para uma gama maior de seções transversais e comprimentos de colunas.

Entretanto, em virtude da crise sanitária (COVID-19), iniciada no fim do ano de 2019, e que perdura até os dias atuais, não foi possível realizar os ensaios de caracterização do aço inoxidável austenítico 304.

Com isso, as informações relativas às propriedades e características do aço, utilizadas neste trabalho, foram retiradas do trabalho de Sarquis [35]. A Tabela 13 mostra os valores relativos ao módulo de elasticidade (E), a tensão com deformação em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) e o coeficiente de Poisson (ν) utilizados nesta dissertação.

Tabela 13 – Propriedades do aço inoxidável austenítico 304 - Sarquis [35].

Material	Módulo de Elasticidade	Tensão de Deformação em 0,2%	Coeficiente de Poisson
	E - (MPa)	$\sigma_{0,2\%}$ - (MPa)	ν
Aço Inoxidável Austenítico 304	208000	305	0,3

3.3 Dimensões dos elementos

O comprimento das colunas e as dimensões da seção transversal das cantoneiras foram escolhidos, por meio de análises de flambagem elástica, com auxílio do GBTul [34], cujo desenvolvimento foi feito pelo Instituto Técnico Superior (IST) de Lisboa – Portugal, efetua análises de estabilidade elástica com base na Teoria Generalizada de Vigas (GBT). A operação deste *software* é relativamente simples e os resultados são apresentados de forma clara e objetiva. As análises de estabilidade elástica podem ser feitas para diversos tipos de seção transversal. Entretanto, para seções compostas (por exemplo, cantoneiras duplas em arranjo cruciforme), o *software* apresenta limitação em relação a sua utilização.

O GBTul [34] possibilitou a modelagem e análise de colunas com seção formada por cantoneira simples e seção cruciforme (neste caso não se trata de seção formada por cantoneira dupla com arranjo cruciforme). Com o auxílio deste *software* foi possível avaliar, com base no comprimento de transição e modos de flambagem, o comportamento das seções transversais. As avaliações realizadas orientaram a escolha dos comprimentos das colunas e das seções transversais de interesse para o desenvolvimento do presente trabalho.

A introdução dos dados relativos ao material, a escolha da seção transversal, o tipo de análise a ser realizada, a definição das condições de contorno, o modo de aplicação da carga e os comprimentos dos elementos a serem analisados são

inseridos no referido *software*, pelo usuário, de forma intuitiva e simples. Os resultados obtidos são visualizados tanto de forma gráfica quanto numérica.

Além da carga crítica, o software supracitado também fornece a parcela de participação de cada modo de deformação associado ao comprimento da coluna analisada.

Sendo assim, na presente dissertação, as análises no GBTul [34] foram realizadas a partir da introdução dos seguintes dados:

- propriedades do material (conforme valores descritos na Tabela 13);
- dimensões da seção transversal;
- quantidade de nós intermediários da seção transversal;
- escolha do tipo de análise a ser efetuada - numérica;
- discretização da malha - uniforme com 10 elementos.
- condições de apoio das colunas - biengastadas;
- aplicação da carga - carga axial centrada com valor unitário;
- comprimentos de colunas analisados - até 4000mm.

Na Figura 27 são apresentadas: a) seção transversal da cantoneira com a posição do centroide (CG) e do centro de cisalhamento (SC), b) discretização dos elementos de viga e aplicação da carga axial centrada com valor unitário e c) a condição de apoio biengastada da coluna visualizadas no GBTul [34].

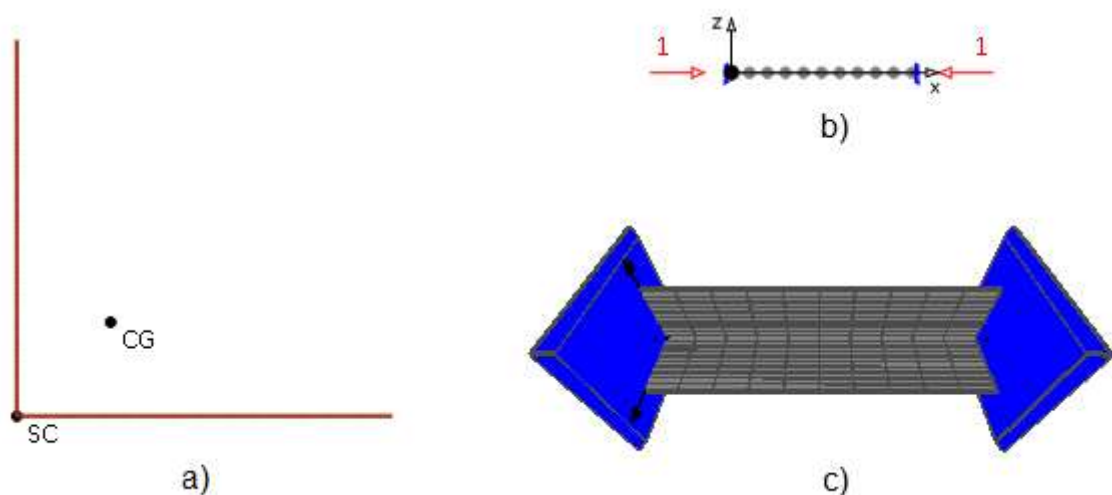


Figura 27 – GBTul [34]: a) seção transversal da cantoneira, b) discretização dos elementos de viga e aplicação da carga e c) condição de apoio biengastada.

Após a inserção dos dados, foram realizadas análises variando as dimensões da seção transversal das cantoneiras. Com base nos resultados obtidos nas análises numéricas, foram escolhidas as dimensões dos elementos a serem utilizados no presente trabalho.

Na Tabela 14 estão indicados os valores nominais escolhidos para o comprimento da aba da cantoneira (b), a espessura da cantoneira (t), a área da seção transversal (A) bem como a relação entre o comprimento da aba da cantoneira e sua espessura (relação b/t). Tal relação é um importante parâmetro utilizado na análise de seções transversais suscetíveis ao fenômeno da flambagem sob compressão axial.

Tabela 14 – Dimensões nominais das cantoneiras de abas iguais.

Cantoneira de abas iguais			
Comprimento da aba cantoneira	Espessura da aba cantoneira	Área bruta da seção transversal	Relação (b/t)
b - (mm)	t - (mm)	A - (mm ²)	
50,8	4,76	4,58	10,67
	6,35	6,06	8,00
	7,93	7,42	6,41

De posse das dimensões da seção transversal das cantoneiras e com base em suas curvas de assinatura, foram escolhidos três comprimentos para as colunas, sendo eles: 900mm, 1400mm e 2200mm. A Tabela 15 mostra o resumo das informações relativas ao comprimento das colunas analisadas bem como as dimensões tanto da aba das cantoneiras quanto a espessura das mesmas.

Tabela 15 – Dimensões das colunas analisadas.

Colunas analisadas				
Comprimento da coluna	Comprimento da aba da cantoneira	Espessura da aba da cantoneira		
L - (mm)	b - (mm)	t - (mm)		
900	50,8	4,76	6,35	7,93
1400	50,8	4,76	6,35	7,93
2200	50,8	4,76	6,35	7,93

A Tabela 16 apresenta, conforme informações obtidas junto ao AISC [7], um resumo das propriedades geométricas das seções transversais estudadas no presente trabalho. Os eixos estão referenciados conforme descrito na Figura 17.

Tabela 16 – Propriedades geométricas das seções transversais [7].

Propriedades geométricas das seções transversais das cantoneiras										
Seção transversal (mm)	b (mm)	t (mm)	A (mm ²)	eixos - x e y		eixo - v		r ₀ (mm)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)
				I (mm ⁴)	r (mm)	I _v (mm ⁴)	r _v (mm)			
50,8x4,76	50,8	4,76	465,81	112798,7	15,54	45369,2	9,88	27,69	0,383349	0,68208110
50,8x6,35	50,8	6,35	605,16	144016,1	15,37	58688,6	9,83	27,43	0,869923	1,53602516
50,8x7,93	50,8	7,93	741,93	172319,8	15,19	72008	9,80	26,92	1,635789	2,84648019

b - comprimento da aba da cantoneira

t - espessura da aba da cantoneira

A - área bruta da seção transversal

I - momento de inércia da seção transversal em relação aos eixos x e y

r - raio de giração da seção em torno dos eixos x e y

I_v - momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo v

r_v - raio de giração da seção em torno do eixo v

r₀ - raio de giração polar da seção em relação ao CS

J - constante de torção da seção transversal

C_w - constante de empenamento da seção transversal

3.4 Nomenclatura

Na presente dissertação foram analisadas colunas sob compressão axial, com seções transversais formadas tanto por cantoneiras simples quanto pelo arranjo de cantoneiras (cantoneira dupla cruciforme), conforme mostrado na Figura 28 a seguir.

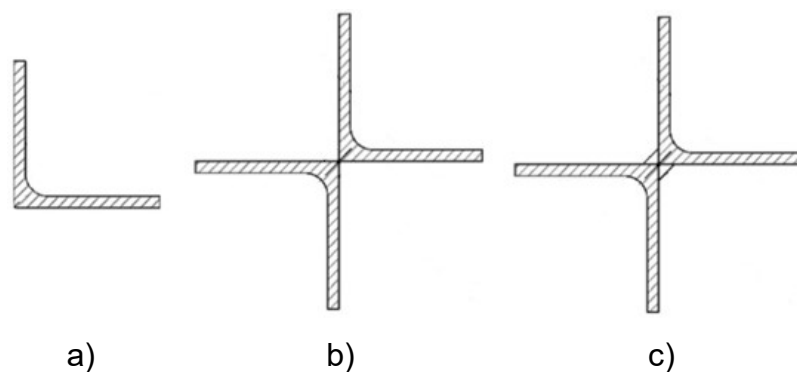


Figura 28 – Seções transversais utilizadas neste trabalho.

Na Figura 28 tem-se as seguintes seções:

- a) seção formada por uma cantoneira de abas iguais (cantoneira simples);
- b) seção formada por duas cantoneiras de abas iguais opostas pelo vértice (cantoneira dupla cruciforme) sem interconexão;
- c) seção formada por duas cantoneiras de abas iguais opostas pelo vértice (cantoneira dupla cruciforme) com interconexão realizada por meio de solda.

Após serem escolhidas as seções transversais e as dimensões dos elementos, uma nomenclatura foi criada com o objetivo de identificar e organizar as análises realizadas neste trabalho. A Figura 29 apresenta a nomenclatura e detalha cada termo utilizado para identificar os elementos.

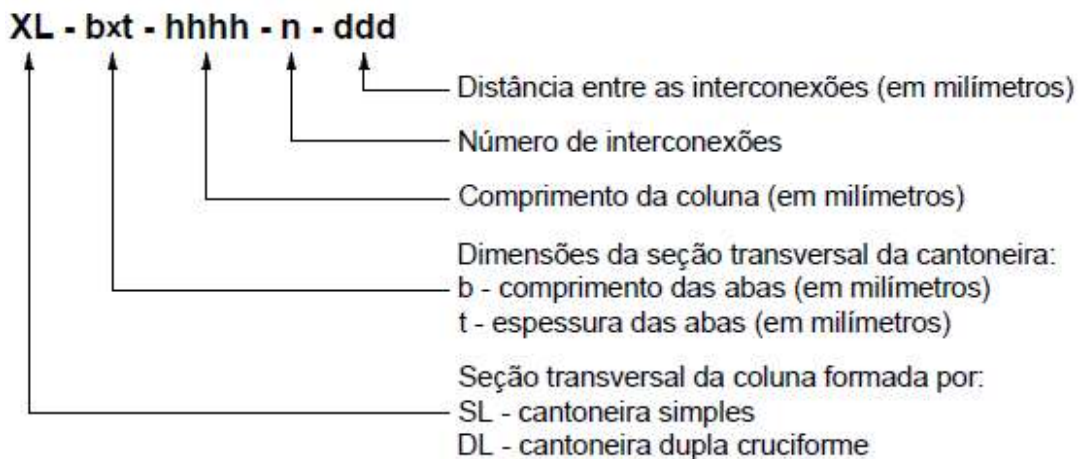


Figura 29 – Nomenclatura utilizada na identificação dos elementos.

Com o intuito de esclarecer melhor a nomenclatura utilizada, segue um exemplo de coluna a ser identificada: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 2 - 467. Neste caso, tem-se:

- DL - cantoneira dupla cruciforme;
- 50,8x4,76 - aba com 50,8mm de comprimento e 4,76mm de espessura;
- 1400 - coluna medindo 1400mm de comprimento;
- 2 - duas interconexões;
- 467 - distância entre os centros das interconexões igual a 467mm.

A Figura 30 mostra um exemplo de coluna com seção transversal formada por cantoneiras duplas cruciformes com duas interconexões (feitas por meio de solda, e igualmente espaçadas).

Para facilitar o entendimento e diminuir a repetição de termos, será utilizada a seguinte nomenclatura para os casos específicos listados a seguir:

- DL - LT: colunas com seção transversal formada por cantoneira dupla cruciforme com interconexão em todo seu comprimento;
- DL - 0L: colunas com seção transversal formada por cantoneira dupla cruciforme sem interconexão;
- SL: colunas com seção transversal formada por cantoneira simples.

Cabe salientar que, tanto a distância entre as interconexões e as extremidades quanto a distância entre interconexões são iguais. Sendo assim, com base na Figura 30, o comprimento da coluna, com duas interconexões, fica dividido em três partes igualmente espaçadas entre si. No caso geral, para uma coluna com um número n de interconexões, o comprimento da mesma ficará dividido em $n+1$ partes igualmente espaçadas.

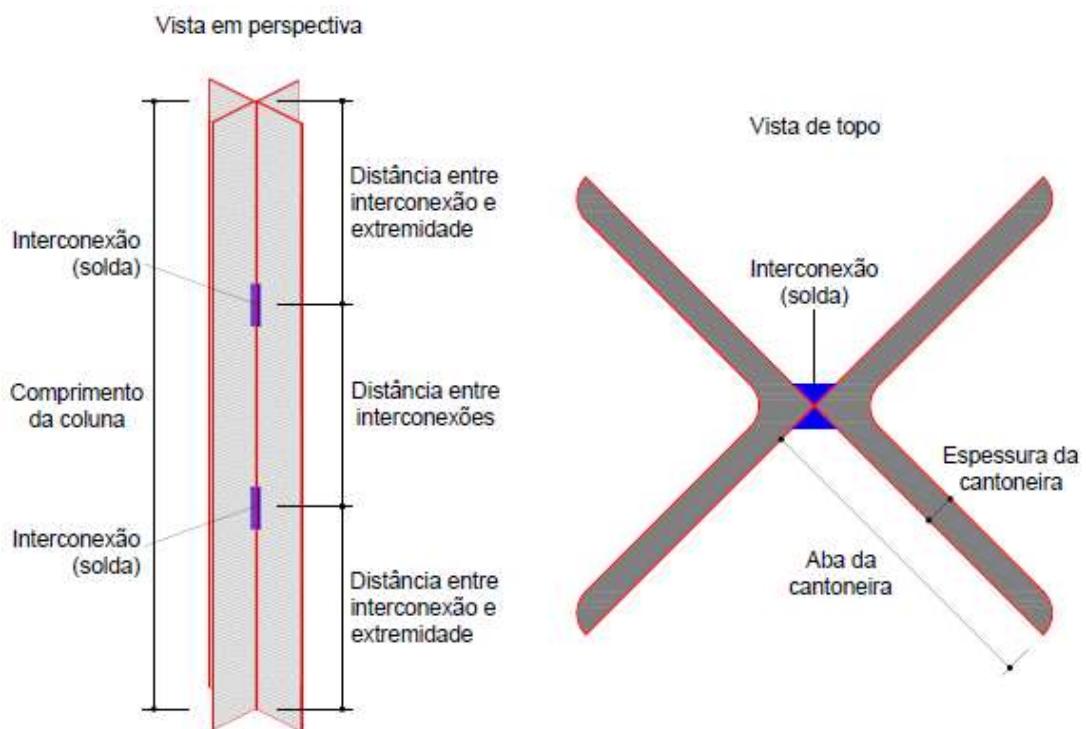


Figura 30 – Coluna formada por cantoneira dupla cruciforme com duas interconexões.

Outra nomenclatura utilizada neste trabalho está relacionada com o modo de flambagem da coluna associado à sua carga crítica. Para identificar os modos de flambagem das colunas analisadas, utilizou-se a nomenclatura conforme descrito na Tabela 17.

Tabela 17 – Identificação dos modos de flambagem.

Representação	Modo de flambagem
F	flambagem global por flexão
T	flambagem global por torção (ou torsional)
FT	flambagem global por flexo-torção

4 MODELAGEM E ANÁLISE NUMÉRICA

4.1 Introdução

A análise numérica foi planejada para representar os modelos experimentais, que seriam ensaiados em laboratório, e assim, expandir os resultados para colunas com diferentes dimensões.

Entretanto, a crise sanitária (COVID-19) impossibilitou a realização tanto dos ensaios de caracterização do material, conforme descrito no item 3.1, quanto dos ensaios experimentais das colunas.

Posto isso, o objetivo deste capítulo visa abordar a metodologia utilizada nas análises numéricas de estabilidade das colunas, formadas por cantoneiras simples e cruciformes, de aço inoxidável austenítico 304.

Sendo assim, tanto a concepção dos modelos numéricos quanto as análises foram realizadas com o auxílio do *software* ANSYS 2019 R3 [36], cuja base teórica é o método dos elementos finitos.

A concepção e análise das colunas, por meio do *software* supracitado, consiste na realização de três etapas, sendo elas: o pré-processamento, a análise de flambagem elástica e a análise não linear completa.

4.2 Pré-processamento

Esta etapa consiste na definição das propriedades dos materiais e na curva tensão *versus* deformação dos mesmos, na concepção geométrica das colunas, na definição do tipo de elemento e na malha em elementos finitos a serem utilizados e nas condições de contorno das colunas.

4.2.1 Propriedades dos materiais e curva tensão *versus* deformação

Devido a impossibilidade de realização dos ensaios, conforme descrito no item 4.1 acima, as informações relativas as propriedades mecânicas do aço inoxidável

austenítico 304 foram retiradas do trabalho de Sarquis [35]. As propriedades do material, utilizadas na realização das análises das colunas, estão descritas no item 3.2 do capítulo anterior. A Figura 31(a) mostra a curva tensão *versus* deformação para o aço inoxidável austenítico 304, cujos valores foram utilizados na modelagem numérica das colunas.

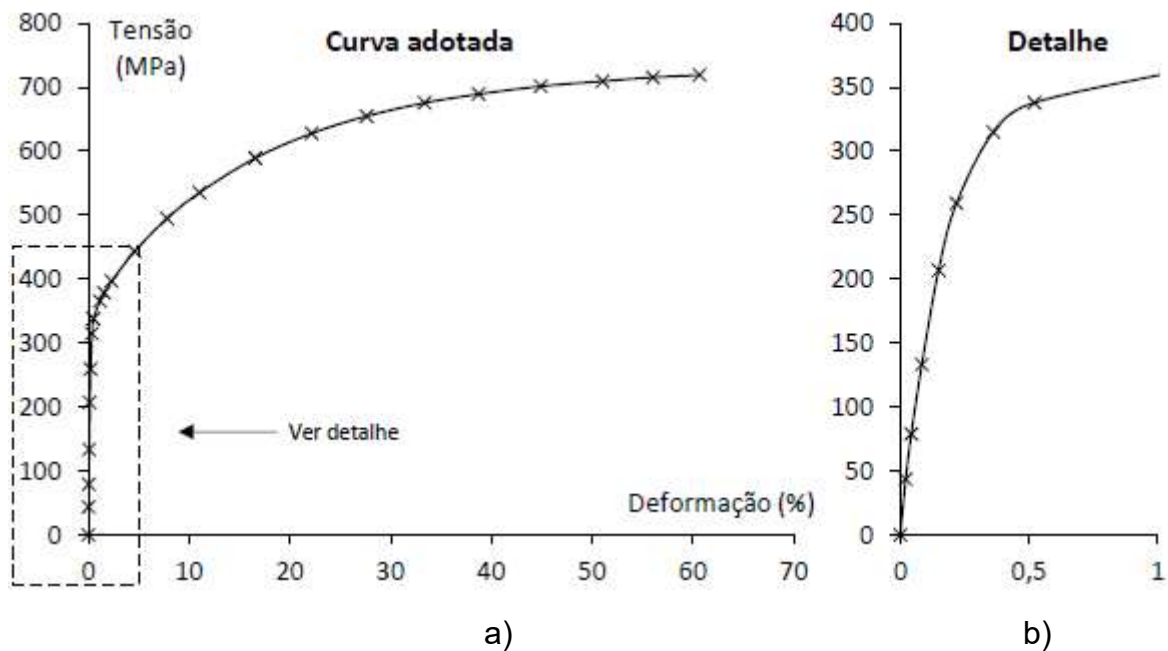


Figura 31 – Aço inoxidável austenítico: a) curva tensão *versus* deformação adotada nos modelos numéricos e b) detalhe dos pontos iniciais da curva - Sarquis [35].

Uma das características observadas é a não linearidade física do aço inoxidável austenítico 304. A Figura 31(b) mostra tal característica, cuja manifestação ocorre desde os primeiros pontos da curva (próximo a origem dos eixos).

As interconexões entre as cantoneiras duplas cruciformes foram modeladas considerando-as formadas por soldas. Com base no trabalho de Botelho [30], para representar as propriedades da solda foram utilizados: módulo de elasticidade de 210000MPa e coeficiente de Poisson de 0,3.

4.2.2 Concepção geométrica das colunas

4.2.2.1 Seção transversal e comprimento da coluna

No presente trabalho a concepção geométrica das colunas foi realizada com o recurso de script APDL (*ANSYS Parametric Design Language*) do ANSYS [36]. Tanto as seções transversais quanto o comprimento das colunas foram modelados por meio de parâmetros variáveis. A partir destes parâmetros, a geometria de cada elemento poderia ser alterada de forma simples, conforme a necessidade da análise a ser efetuada. Tanto o comprimento (L) das colunas quanto a espessura das abas das cantoneiras foram introduzidos no código APDL de forma direta, sendo os seus valores alterados conforme a necessidade das análises. No entanto, o comprimento das abas das cantoneiras foi introduzido no código APDL, tomando como medida a linha média da seção transversal (comprimento efetivo), conforme descrito na equação (21) a seguir.

$$b_{\text{eff}} = b - \frac{t}{2} \quad (21)$$

Onde:

b_{eff} - comprimento efetivo da aba da cantoneira;

b - comprimento da aba da cantoneira;

t - espessura da aba da cantoneira;

4.2.2.2 Interconexões

Com relação às interconexões, na Figura 32(a) até a Figura 32(d) tem-se as vistas frontais de algumas das colunas formadas por cantoneiras duplas cruciformes com e sem interconexões modeladas e analisadas na presente dissertação, sendo:

- a) coluna com duas interconexões;
- b) coluna com cinco interconexões;
- c) coluna com sete interconexões;
- d) coluna interconectada em todo seu comprimento.

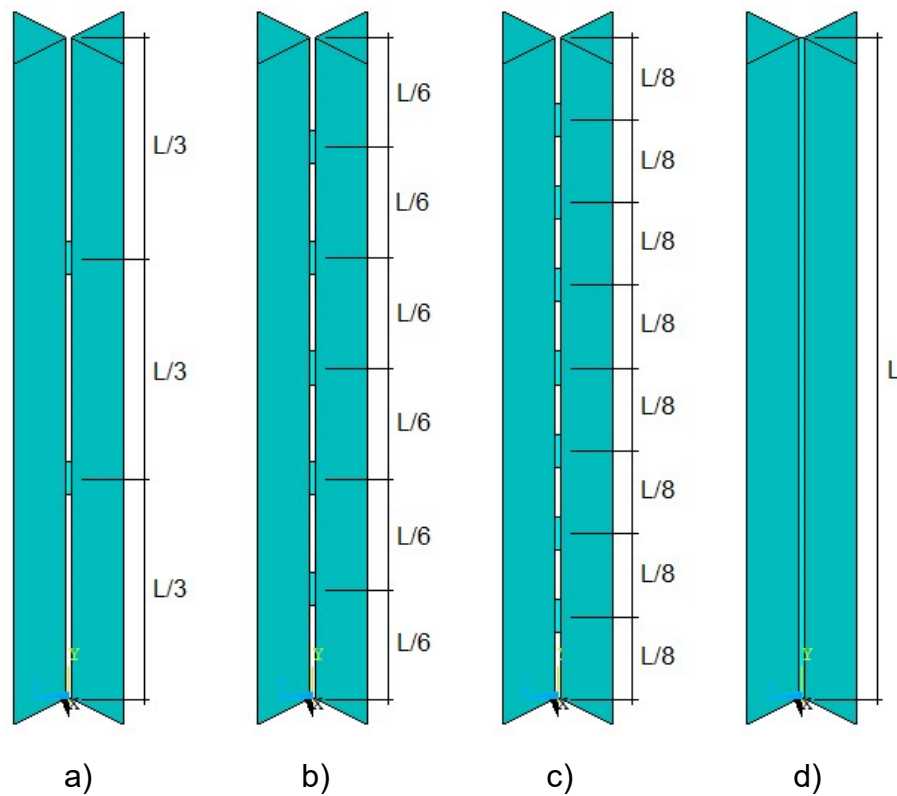


Figura 32 – Vista frontal: colunas formadas por cantoneiras duplas cruciformes.

A distância entre interconexões foi calculada de acordo com a equação (22).

$$a = \frac{L}{n+1} \quad (22)$$

Onde:

a - distância entre interconexões (de centro a centro e de extremidade a centro);

L - comprimento da coluna;

n - número de interconexões.

A quantidade de interconexões introduzidas nas colunas variou desde uma até sete interconexões. O comprimento das interconexões, ou seja, o comprimento da solda utilizado na modelagem foi de 50mm (mesma ordem de grandeza do comprimento da aba da cantoneira). As distâncias entre interconexões foram medidas de centro a centro das mesmas e igualmente espaçadas entre si. O mesmo vale para a distância entre a extremidade da coluna e o centro da interconexão.

4.2.2.3 Eixos de referência

Na Figura 33 são apresentadas as vistas (em perspectiva e superior) das colunas formadas por cantoneira simples e dupla cruciforme, respectivamente. Também é possível observar a localização das colunas em relação aos eixos ortogonais de referência do referido *software*. Os eixos X e Z são paralelos a seção transversal das colunas e o eixo Y, perpendicular a seção transversal das mesmas.

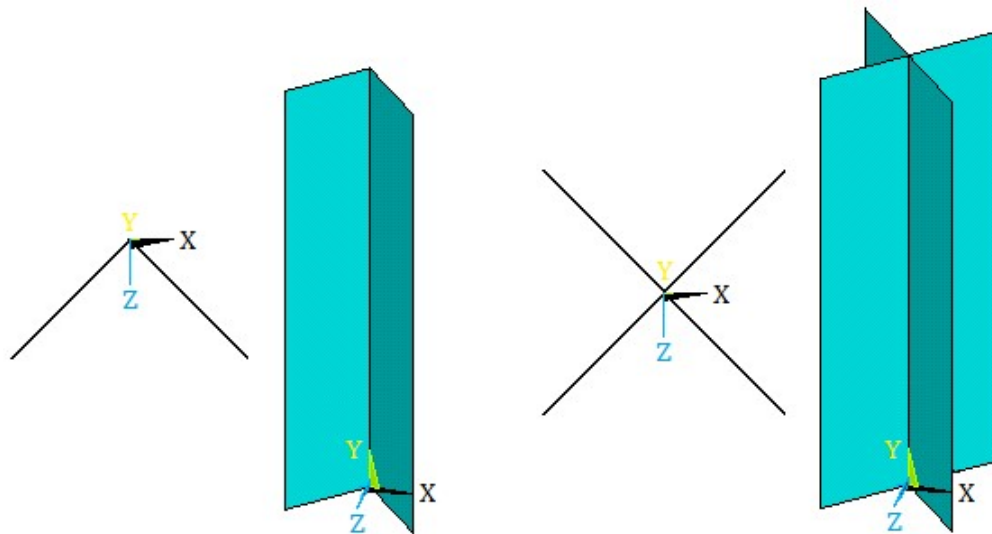


Figura 33 – Geometria das colunas e eixos de referência do *software* ANSYS [36].

4.2.3 Tipo de elemento e malha em elementos finitos

Tanto as colunas formadas por cantoneira simples quanto as formadas por cantoneira dupla cruciforme foram modeladas por meio do elemento do tipo casca (*SHELL181*- [36]), cuja escolha foi baseada no trabalho descrito por Sarquis [35].

O autor avaliou as cargas máximas resistentes por meio de análises efetuadas com modelos numéricos, utilizando tanto o elemento *SOLID185* quanto o elemento *SHELL181*. Os resultados das análises mostraram que as diferenças entre os valores de carga foram inferiores a 2,0%. Com base neste valor, o uso do elemento *SHELL181* mostrou-se mais vantajoso do ponto de vista computacional.

Foram avaliadas malhas com elementos de 5,0mm x 5,0mm e 8,0mm x 8,0mm. A diferença entre os valores de carga fornecidas pelas duas malhas foram da ordem de 1,0%. Dessa forma, com base na economia de tempo e esforço computacional, optou-se por utilizar elementos do tipo casca – *SHELL181* e malha com elementos

8,0mm x 8,0mm. O elemento *SHELL181* possui quatro nós com seis graus de liberdade por nó (translação e rotação relativas aos eixos X, Y e Z) com integração total.

Na Figura 34(a) é mostrada uma coluna com seção transversal formada por cantoneira simples. Na Figura 34(b) é apresentada uma coluna com seção transversal formada por cantoneira dupla cruciforme. Ambas possuem malha com dimensões 8,0mm x 8,0mm.

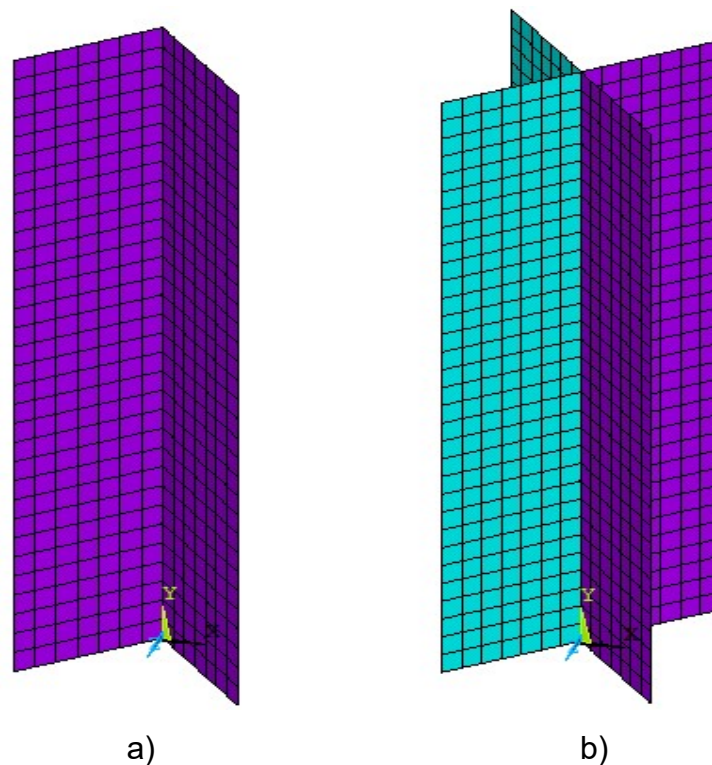


Figura 34 – Malha 8,0mm x 8,0mm utilizada nas colunas com seção transversal formada por: a) Cantoneira simples e b) Cantoneira dupla cruciforme.

4.2.4 Condições de contorno

Em relação às condições de contorno, todas as análises foram realizadas considerando tanto a base quanto o topo das colunas engastadas. Sendo assim, todos os nós localizados nas arestas que formam a seção transversal, tanto da base quanto do topo das colunas, tiveram seus deslocamentos e rotações impedidos, garantindo assim uma vinculação rígida. Os centroides das seções transversais, tanto da base quanto do topo das colunas, foram modelados por meio do elemento de massa unitário *MASS21*, disponível no ANSYS [36].

Na sequência, os nós localizados nas arestas, que formam a seção transversal da base e do topo das colunas, foram ligados aos seus respectivos centroides. Entretanto, para que as análises relativas ao fenômeno da flambagem pudessem ser efetuadas, os nós localizados nas arestas que formam a seção transversal do topo da coluna, tiveram seus deslocamentos liberados na direção do eixo vertical das colunas (eixo Y do ANSYS [36]). A Tabela 18 apresenta um resumo dos deslocamentos e rotações adotados nos modelos numéricos das colunas. Os deslocamentos são representados pela letra “U” enquanto as rotações são representadas pela letra “R”.

Tabela 18 – Deslocamentos “U” e rotações “R” impostos aos modelos numéricos.

Localização	Deslocamentos e Rotações					
	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
Topo	Impedido	Livre	Impedido	Impedido	Impedido	Impedido
Base	Impedido	Impedido	Impedido	Impedido	Impedido	Impedido

Na Figura 35 é possível observar as condições de contorno da coluna formada por cantoneira simples. Os nós, localizados nas arestas que formam a seção transversal da base e do topo da coluna, apresentam-se com seus vínculos rígidos e interligados aos centroides das respectivas seções transversais.

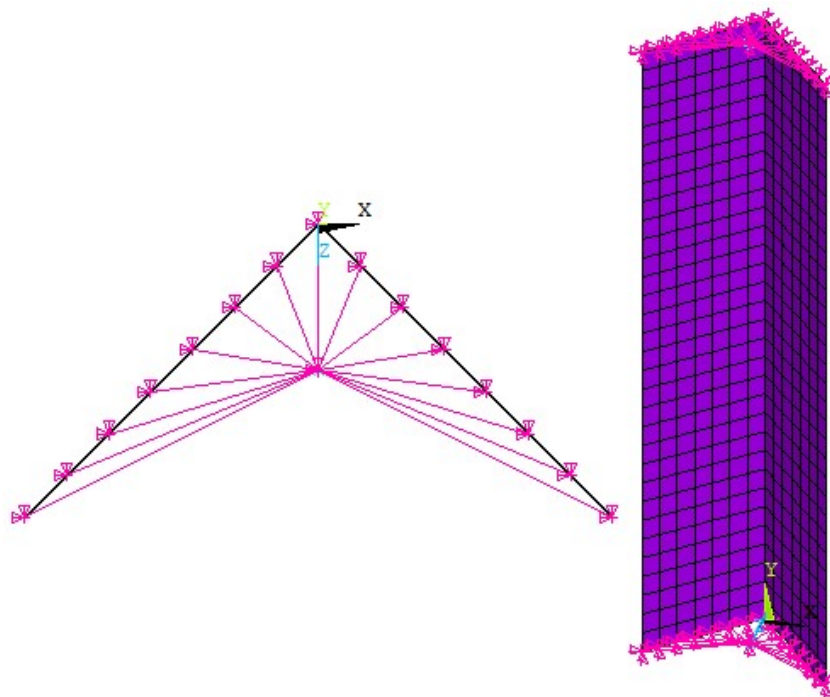


Figura 35 – Condições de contorno da coluna formada por cantoneira simples.

Cabe salientar que, para as colunas formadas por cantoneira dupla cruciforme, foi adotado o mesmo procedimento descrito nos parágrafos acima no que tange as condições de contorno.

4.3 Análise de flambagem elástica

Após concluída a fase de pré-processamento foram realizadas as análises de flambagem elástica (autovalor e autovetor). Tal análise visa obter as configurações deformadas (autovetor) relativas aos modos de flambagem e suas respectivas cargas críticas (autovalor).

As análises elásticas foram realizadas com o objetivo de se obter os dez primeiros modos de flambagem das colunas. Em seguida, cada modo de flambagem era analisado, sendo que os modos que apresentavam configurações deformadas espúrias eram descartados.

De posse das configurações deformadas das colunas, as imperfeições geométricas iniciais foram aplicadas nas mesmas e a etapa referente à análise não linear era iniciada.

4.4 Imperfeição geométrica inicial e análise não linear

Esta etapa é composta pela aplicação da imperfeição geométrica inicial, com base na configuração deformada obtida na análise de flambagem elástica, seguida pela análise não linear das colunas.

As imperfeições geométricas iniciais representam deslocamentos causados por flexões em tornos dos eixos principais de inércia e rotações das seções transversais de elementos estruturais. São ocasionadas por diversos fatores, dentre os quais pode-se citar: processo de fabricação, transporte, armazenagem, montagem, dentre outros. Muitos dos fatores que contribuem com o surgimento de tais imperfeições são praticamente inevitáveis, tornando imperativo sua consideração nas análises estruturais, com o propósito de se obter um dimensionamento mais próximo da realidade. Para as imperfeições geométricas iniciais, utilizadas nas análises não lineares, foram adotados os valores conforme descrito na Tabela 19.

Tabela 19 – Valores adotados para imperfeição geométrica inicial.

Análise de Flambagem Elástica (modo de flambagem)	Valor da Imperfeição Geométrica Inicial
Flexão	$L / 1000$
Torção	$t / 10$
Flexo-Torção	$t / 10$

Na Tabela 19, L representa o comprimento da coluna enquanto t é a espessura da aba da cantoneira utilizada na seção transversal da coluna.

O valor de $L/1000$, relativo à imperfeição geométrica inicial para o modo de flexão, foi baseado nas prescrições normativas do EC3 1-1 [6] e EN 1090-2 [37]. Já valor de $t/10$, relativo à imperfeição geométrica inicial para os modos de torção e flexo-torção, foi baseado nos trabalhos de Sarquis [35] e Botelho [30].

Após a aplicação da imperfeição geométrica inicial, dava-se início a análise não linear. Para isso, um deslocamento prescrito foi aplicado na direção vertical da coluna - eixo Y (perpendicular a seção transversal da coluna) do ANSYS [36], com o objetivo de avaliar a carga máxima resistente (N_u) resistida pela coluna.

5 CURVAS DE ASSINATURA

5.1 Introdução

Neste capítulo foram abordados os conceitos que envolvem as curvas de assinatura das colunas e as importantes informações fornecidas a partir destas.

É chamada de curva de assinatura o gráfico que, para determinada seção transversal, relaciona a carga crítica de flambagem elástica (N_{cr}) com o comprimento da coluna (L). Além de fornecer a carga crítica de flambagem global da coluna, esta curva permite analisar o modo de flambagem, associado à sua carga crítica, bem como a variação do modo em função do comprimento da coluna.

As curvas de assinatura das colunas analisadas na presente dissertação foram construídas com o auxílio de dois *softwares*, sendo eles: o GBTul [34] e o ANSYS [36].

O GBTul [34] permite a construção de curvas de assinatura para elementos formados por seções transversais simples, como no caso da cantoneira simples de abas iguais.

Para as curvas de assinatura de elementos formados por seções combinadas, como no caso das seções formadas por cantoneiras duplas cruciformes, foi utilizado o ANSYS [36]. Este permite a modelagem tanto das seções compostas quanto de suas interconexões, abrangendo uma gama de elementos superior ao proporcionado pelo GBTul [34].

Por fim, são apresentadas as curvas de assinatura das colunas de aço inoxidável austenítico 304, analisadas neste trabalho.

5.2 Curvas de assinatura – GBTul versus ANSYS

5.2.1 Curvas de assinatura - GBTul

Baseado na Teoria Generalizada de Vigas, o GBTul [34] (versão 2.0.4.4) apresenta grande vantagem na sua utilização, visto que sua operação é relativamente simples e a apresentação dos resultados é feita de forma clara e organizada. Porém,

sua limitação ocorre quando há necessidade de análises de colunas com seções mais complexas, por exemplo as colunas com seção formada por cantoneira dupla cruciforme. Tais seções ainda não são possíveis de serem modeladas e analisadas com este *software*.

A Figura 36 mostra uma curva de assinatura referente a colunas de aço com seção transversal formada por cantoneira simples de abas iguais (SL-50,8x4,76) com condições de contorno biengastada, construída com o auxílio do GBTul [34]. O comprimento da coluna foi alterado, em intervalos de 100mm, desde 100mm até 1500mm.

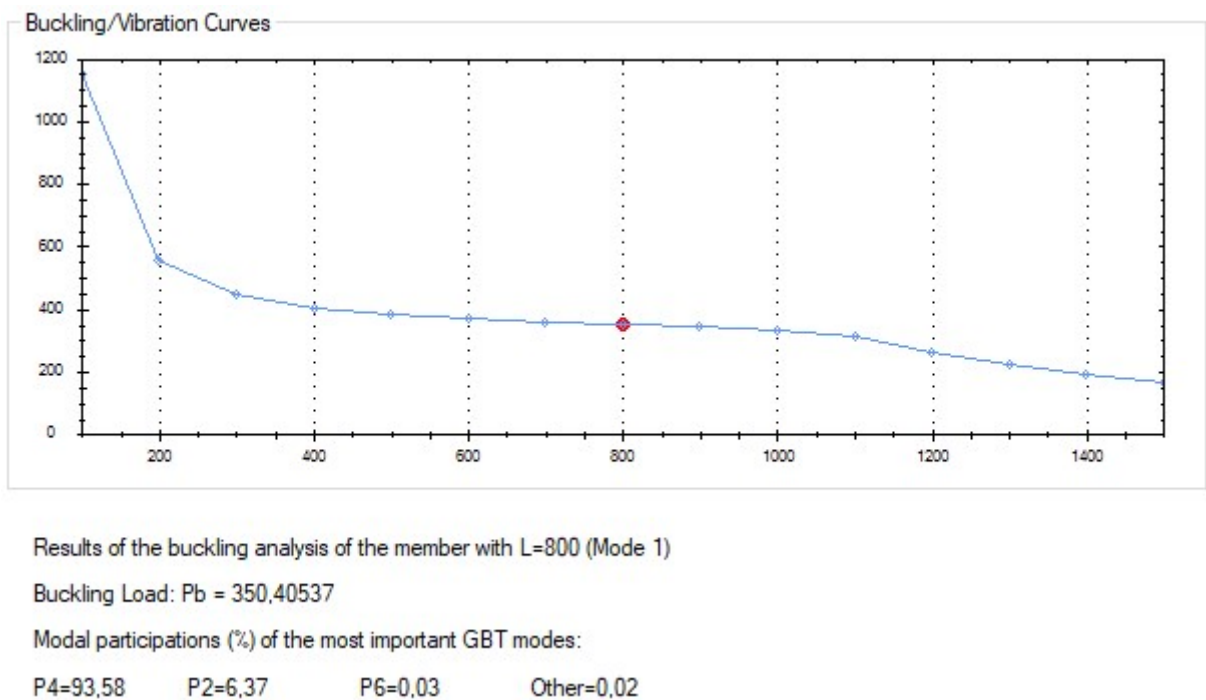


Figura 36 – Curva de assinatura GBTul [34]: SL-50,8x4,76.

Na Figura 36, os valores referentes à carga crítica de flambagem (kN) estão representados no eixo vertical, enquanto no eixo horizontal estão os valores referentes ao comprimento da coluna (mm).

Além da carga crítica de flambagem associada ao comprimento da coluna, o GBTul [34] fornece as porcentagens relativas à participação de cada modo de deformação. No exemplo exposto na Figura 36, tem-se uma carga crítica de flambagem de 350,41kN para uma coluna com 800,0mm de comprimento, cujo modo de flambagem da coluna ocorre por meio da combinação de diversos modos de

deformação. A nomenclatura utilizada na representação de cada modo de deformação, utilizada por este programa, possui o seguinte significado:

- P1 - deformação axial;
- P2 - flexão em torno do eixo de maior inércia;
- P3 - flexão em torno do eixo de menor inércia;
- P4 - torção;
- P5, P6, P9 e P10 - flambagem local de placa;
- Outros - modos de deformação com valores desprezíveis.

A Figura 37 mostra, de forma mais intuitiva, a participação de cada modo de deformação associado a carga crítica de flambagem elástica para a coluna com comprimento (L) de 800mm. De fato, é possível observar a participação dos modos de deformação P4 (torção), de forma dominante, e P2 (flexão em torno do eixo de maior inércia), caracterizando, por meio desta combinação, o modo de flexo-torção, cuja ocorrência é prevista para este tipo de seção transversal.

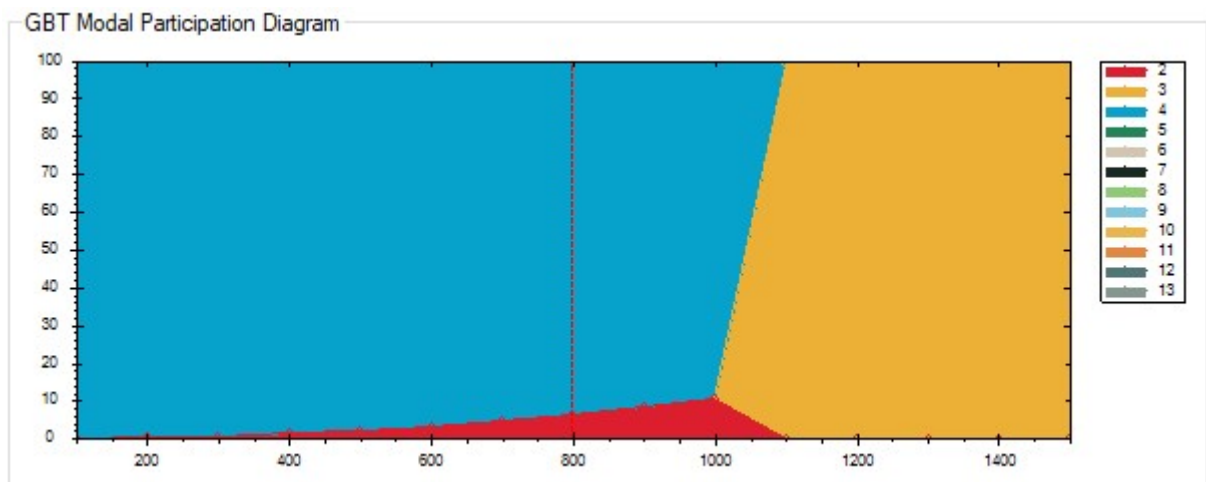


Figura 37 – Participação dos modos de deformação - coluna com L = 800mm.

A Tabela 20 mostra os valores relativos à carga crítica de flambagem elástica e a participação dos modos de deformação para cada comprimento de coluna, conforme representado na curva de assinatura da Figura 36. É possível observar as parcelas, expressas em porcentagem, representativas de cada modo de deformação. Nota-se que um dos modos possui uma participação maior em relação aos outros.

Tabela 20 – Valores referentes à curva de assinatura representada na Figura 36.

Curva de Assinatura – SL-50,8x4,76									
Comprimento da coluna	Carga Crítica de Flambagem	Participação dos Modos de Deformação (%)							
L (mm)	N _{cr} (kN)	P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	Outros
100	1146,83	—	—	99,43	—	0,28	—	0,12	0,17
200	554,52	0,23	—	99,35	—	0,23	—	—	0,19
300	443,78	0,66	—	99,06	—	0,16	—	—	0,11
400	403,37	1,32	—	98,50	—	0,11	—	—	0,07
500	382,77	2,19	—	97,68	—	0,07	—	—	0,05
600	369,52	3,31	—	96,60	—	0,05	—	—	0,04
700	359,34	4,70	—	95,24	—	0,04	—	—	0,03
800	350,41	6,37	—	93,58	—	0,03	—	—	0,02
900	341,96	8,35	—	91,61	—	0,02	—	—	0,02
1000	333,45	10,66	—	89,31	—	0,01	—	—	0,02
1100	308,98	—	99,03	—	0,95	—	0,01	—	0,01
1200	260,16	—	99,25	—	0,73	—	0,01	—	0,01
1300	221,98	—	99,40	—	0,58	—	0,01	—	0,01
1400	191,59	—	99,51	—	0,47	—	0,01	—	0,01
1500	167,02	—	99,58	—	0,40	—	0,01	—	0,01

Outra informação de elevada importância, obtida com as curvas de assinatura, está relacionada ao comprimento da coluna referente a transição entre os modos de flambagem. Com base na Tabela 20, é possível observar que, para colunas com comprimento entre 1000mm e 1100mm ocorre uma mudança no modo de flambagem, bem como uma maior variação nos valores referentes as respectivas cargas críticas de flambagem associadas. Para a coluna com comprimento de 1000,0mm o modo de flambagem é formado pela participação dos modos P4 (89,31%) e P2 (10,66%) que representam, respectivamente, os modos de torção e flexão em torno do eixo de maior inércia, ou seja, o modo de flexo-torção em colunas formadas por cantoneira simples.

Cabe destacar que, o modo de flexo-torção é dado pela atuação simultânea dos modos de torção e flexão em torno do eixo de maior inércia. Sendo assim, as observações feitas tanto na Figura 36 quanto na Figura 37 estão de acordo com o previsto para uma coluna com seção formada por cantoneira simples de abas iguais,

conforme já descrito no item 2.3. Entretanto, para a coluna com 1100mm de comprimento, o modo de flambagem é formado, praticamente, apenas pelo modo P3 (99,09%) representativo do modo de flexão em torno do eixo de menor inércia.

5.2.2 Curvas de assinatura - ANSYS

Visto que o GBTul [34] não permite a construção de curvas de assinatura para seções transversais compostas (seção formada por cantoneira dupla cruciforme, por exemplo), foi utilizado, para este fim, o ANSYS [36].

Para tanto, foram feitas análises de flambagem elástica para colunas com diferentes comprimentos, seções transversais e distâncias entre as interconexões. A Figura 38 mostra a curva de assinatura referente aos mesmos comprimentos de coluna analisados no item 5, com a mesma seção transversal (SL-50,8x4,76) e idênticas condições de contorno (biengastada), porém, obtida por meio do ANSYS [36].

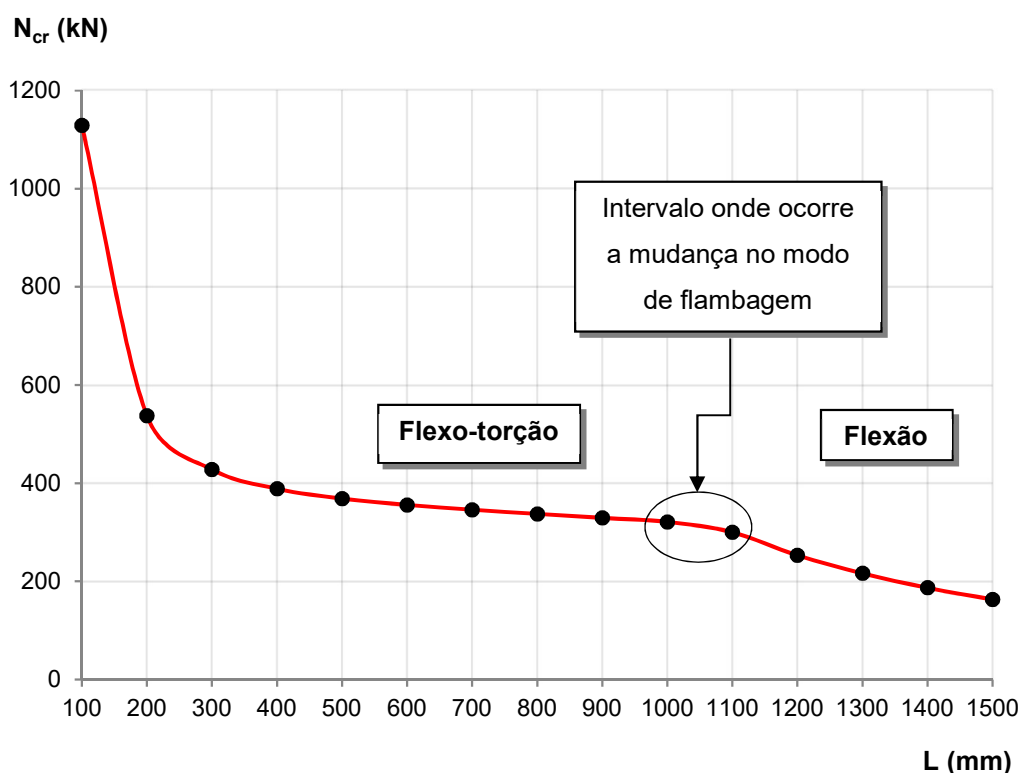


Figura 38 – Curva de assinatura ANSYS [36]: SL-50,8x4,76.

Na Tabela 21 são apresentados os valores relativos ao comprimento da coluna, o valor da carga crítica de flambagem elástica e o modo de flambagem associado, referentes à curva de assinatura mostrada na Figura 38.

Tabela 21 – Valores referentes à curva de assinatura representada na Figura 38.

Curva de Assinatura – SL-50,8x4,76		
Comprimento da coluna	Carga Crítica de Flambagem	Modo de Flambagem
L (mm)	N _{cr} (kN)	
100	1129,11	Flexo-Torção
200	537,28	Flexo-Torção
300	428,22	Flexo-Torção
400	388,70	Flexo-Torção
500	368,63	Flexo-Torção
600	355,78	Flexo-Torção
700	345,96	Flexo-Torção
800	337,43	Flexo-Torção
900	329,33	Flexo-Torção
1000	321,24	Flexo-Torção
1100	299,97	Flexão
1200	253,08	Flexão
1300	216,28	Flexão
1400	186,91	Flexão
1500	163,10	Flexão

Tanto na Figura 38 quanto na Tabela 20 e na Tabela 21 é possível observar que, entre os comprimentos de 1000mm e 1100mm, ocorre uma mudança no modo de flambagem, bem como uma redução nos valores relativos à carga crítica.

A Figura 39(a) ilustra o modo de flambagem por flexo-torção para a coluna com comprimento de 1000mm, já a Figura 39(b) mostra a mudança para o modo de flambagem por flexão na coluna com comprimento de 1100mm. As colunas são formadas por cantoneiras simples com seção transversal 50,8x4,76mm.

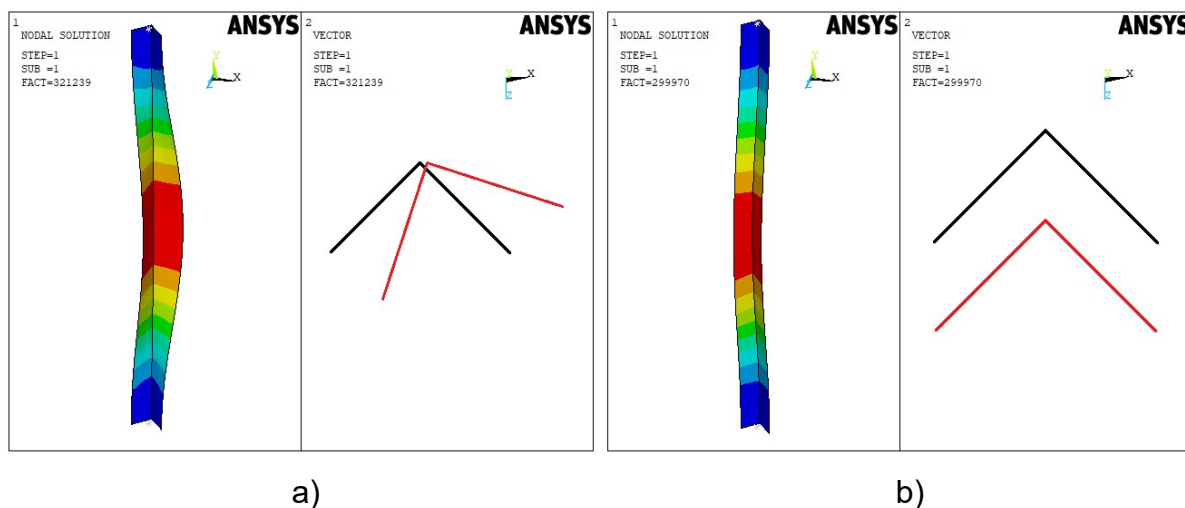


Figura 39 – Seção 50,8x4,76: (a) coluna com $L=1000\text{mm}$ e modo de flambagem por flexo-torção e (b) coluna com $L=1100\text{mm}$ e modo de flambagem por flexão.

5.2.3 Comparação das curvas de assinatura - GBTul *versus* ANSYS

A Figura 40 mostra um comparativo entre as curvas de assinatura para colunas com seção transversal SL-50,8x4,76 e comprimentos (L) variando de 100mm até 1500mm, construídas com o GBTul [34] e o ANSYS [36].

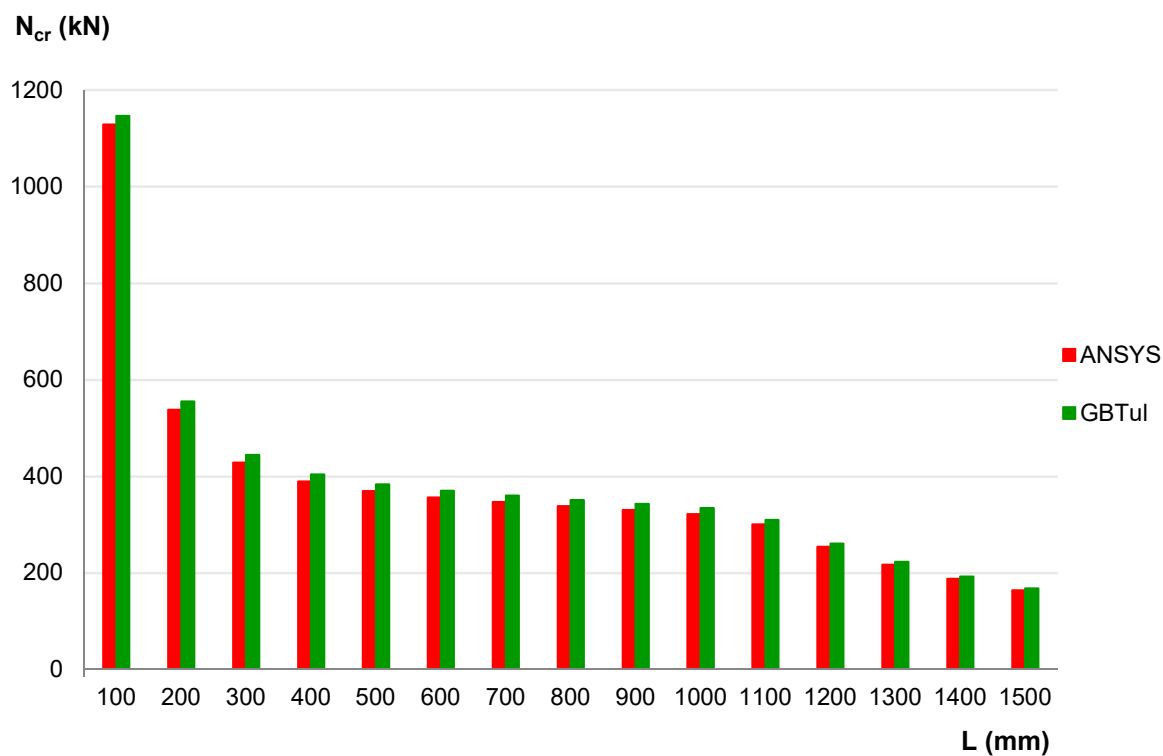


Figura 40 – Curvas de Assinatura ANSYS *versus* GBTul: SL-50,8x4,76.

5.3 Curvas de assinatura

Neste item são apresentadas as curvas de assinatura que serviram como base para o presente trabalho. Com relação a nomenclatura utilizada, cabe lembrar que: SL representa cantoneira simples, DL-X representa cantoneira dupla cruciforme com um número “X” de interconexões e DL representa cantoneira dupla cruciforme totalmente interconectada (comprimento da interconexão igual ao comprimento da coluna).

Todas as curvas de assinatura foram construídas por meio do ANSYS [36]. Foram utilizadas cores para diferenciar e facilitar a identificação das curvas em relação ao número de interconexões utilizadas.

Da Figura 41 a Figura 43 tem-se as curvas de assinatura para colunas com seção transversal formada por cantoneiras (simples e dupla) com dimensões 50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm e 50,8x7,93mm, respectivamente, e comprimento variando de 500 a 2500mm.

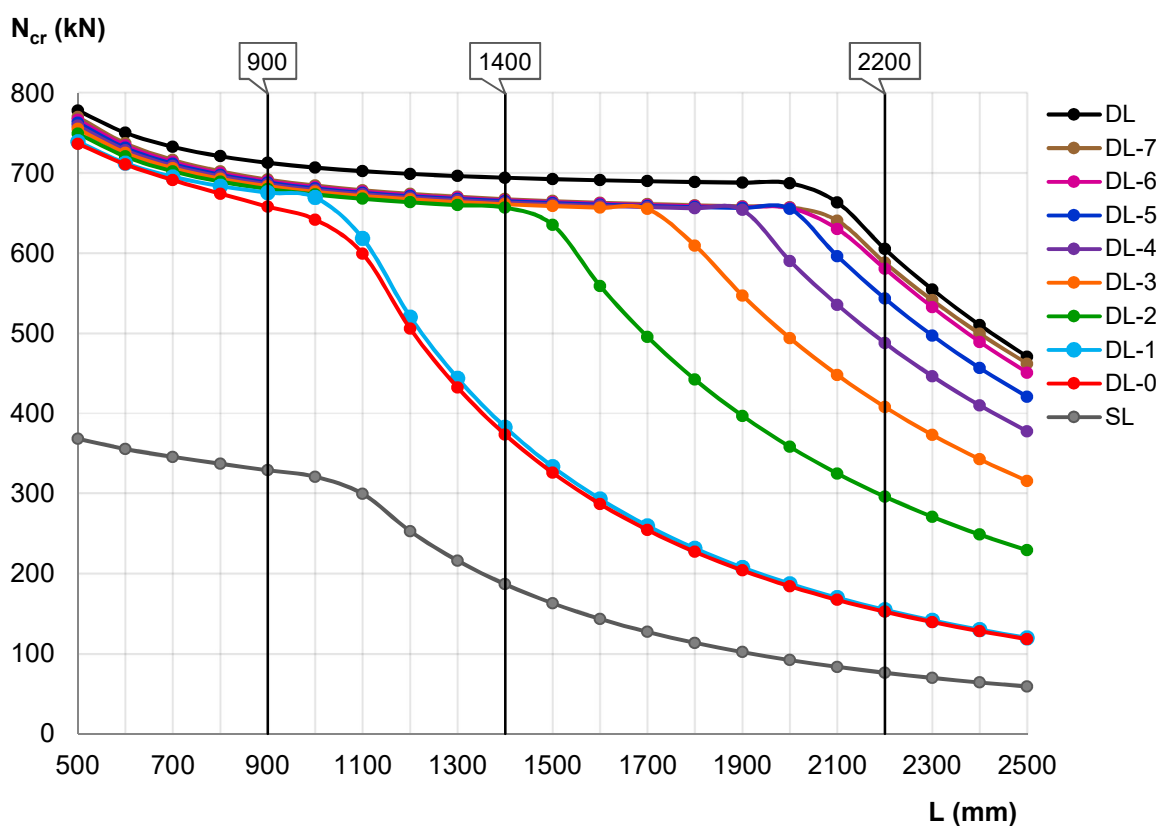


Figura 41 – Curvas de assinatura - seção 50,8x4,76mm.

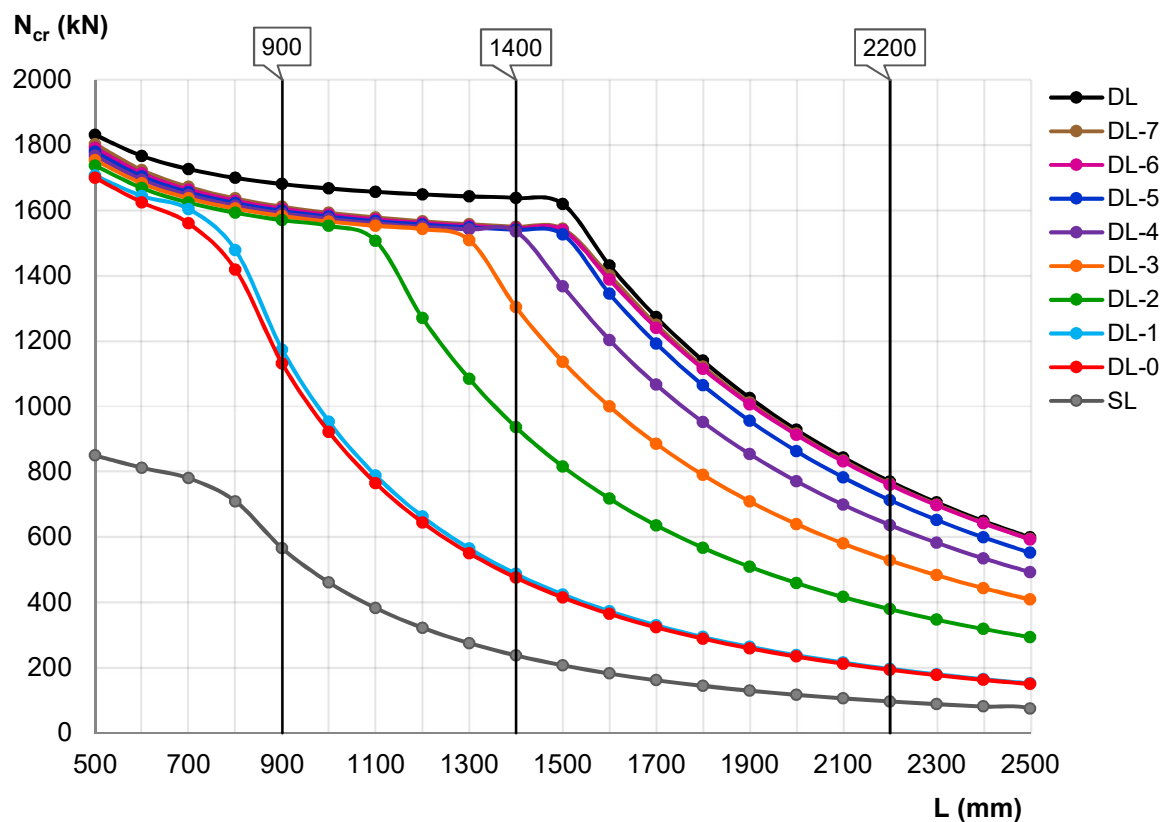


Figura 42 – Curvas de assinatura - seção 50,8x6,35mm.

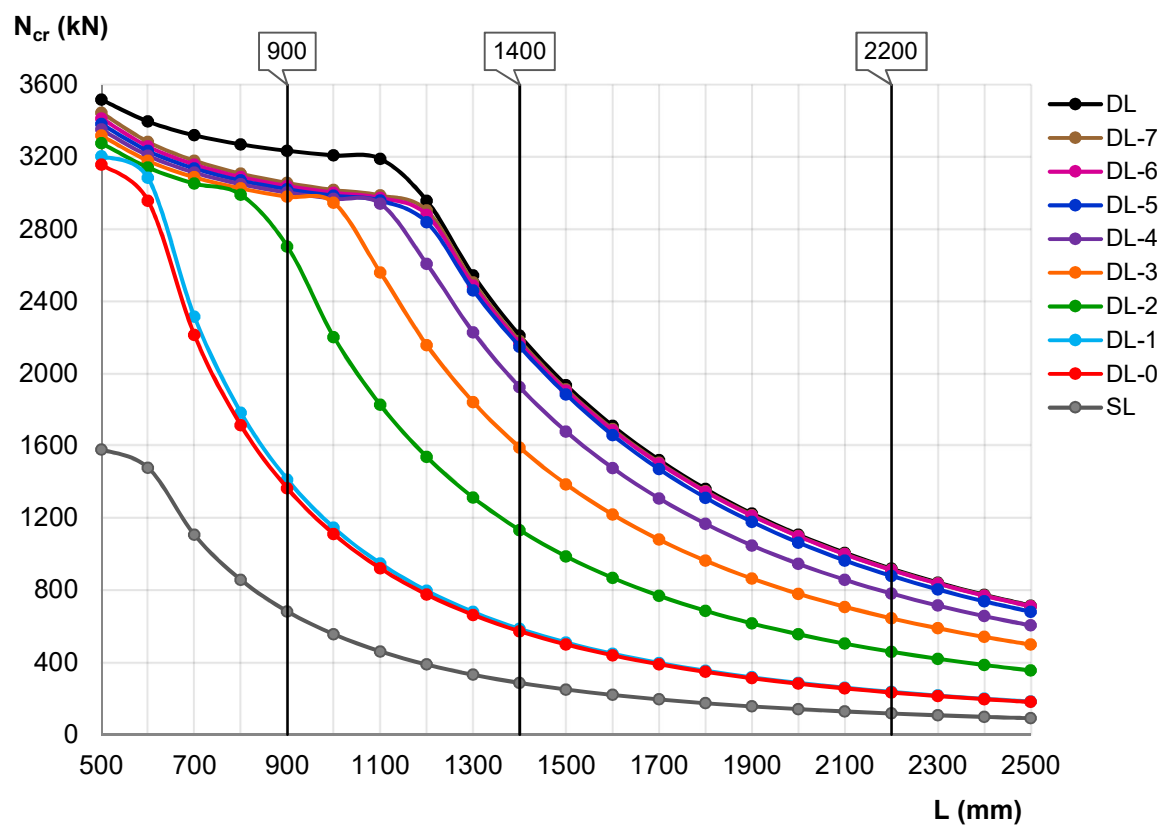


Figura 43 – Curvas de assinatura - seção 50,8x7,93mm.

6 RESULTADOS NUMÉRICOS

6.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e abordados os resultados das análises numéricas realizadas para as colunas de aço inoxidável austenítico, formadas por cantoneiras com seção transversal simples e dupla cruciforme, sob compressão axial.

Os eixos ortogonais utilizados foram baseados nos eixos de referência do ANSYS [36], conforme descrito no item 4.2.2. Na Figura 44(a) são mostrados os eixos de maior inércia ($u - z$ ANSYS) e de menor inércia ($v - x$ ANSYS) para colunas formadas por cantoneira simples. Na Figura 44(b) são apresentados os eixos de maior inércia ($v - x$ ANSYS) e de menor inércia ($u - z$ ANSYS) para as colunas formadas por cantoneira dupla cruciforme interconectada.

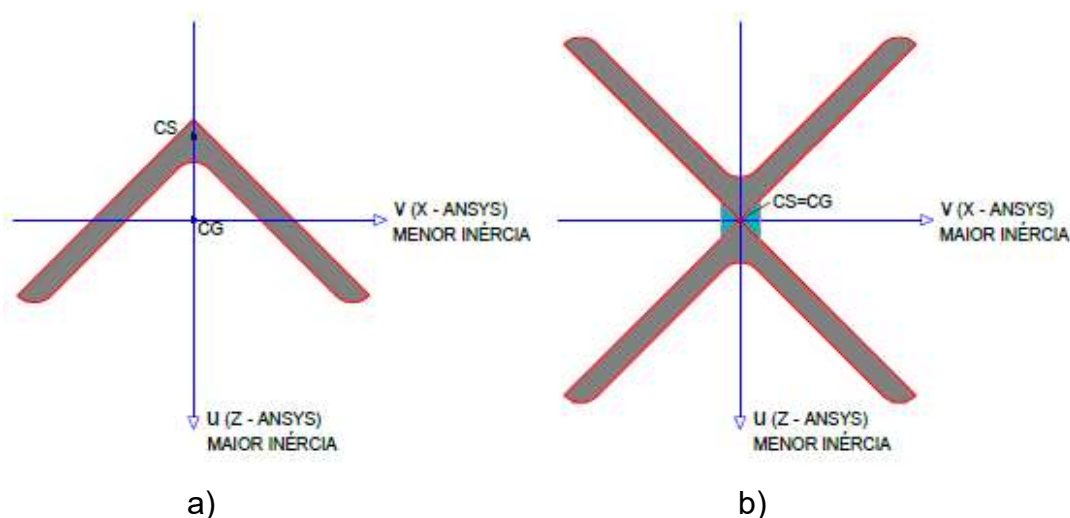


Figura 44 – Eixos de maior e menor inércia para as colunas com seção formada por: a) cantoneira simples e b) cantoneira dupla cruciforme interconectada.

Cabe lembrar que, colunas formadas por cantoneira simples apresentam dois modos de flambagem: flexo-torção e flexão em torno do eixo de menor inércia ($v - X$ ANSYS). Entretanto, as colunas formadas por cantoneira dupla cruciforme, interconectadas em todo seu comprimento, podem manifestar o fenômeno da flambagem por meio de dois modos: torção ou flexão em torno do eixo de menor

inércia do conjunto (u – Z ANSYS). Nas análises realizadas, este fato torna-se importante à medida que são introduzidas interconexões entre as cantoneiras.

Em relação aos resultados, estes são apresentados por meio de tabelas, gráficos e figuras. As tabelas foram construídas para cada comprimento de coluna e seção transversal, analisadas neste trabalho, com o objetivo de mostrar a variação, tanto das tensões críticas (σ_{cr}) quanto das tensões máximas resistentes (σ_u), em relação ao número de interconexões e a distância entre as mesmas. Os modos de flambagem descritos são referentes ao primeiro modo, sendo que as representações são: flexo-torção (FT), torção (T) e flexão (F). Nas tabelas, as marcações em negrito mostram a quantidade mínima de interconexões, introduzidas entre as cantoneiras, necessárias para ocasionar alteração no comportamento das colunas.

Por meio dos gráficos é possível observar a mudança de comportamento das colunas em função do número de interconexões introduzidas. Os gráficos apresentados mostram a relação entre tensão crítica (σ_{cr}) / tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) e a distância entre interconexões (a) / comprimento da coluna (L), bem como a relação entre tensão máxima resistente (σ_u) / tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) e a distância entre interconexões (a) / comprimento da coluna (L). Nos referidos gráficos, para um melhor entendimento, foram traçadas linhas verticais, na cor preta, para auxiliar na identificação do número de interconexões das colunas. O número de interconexões está descrito na parte superior das linhas verticais. A linha horizontal na cor amarela representa o valor onde a tensão crítica (σ_{cr}) e a tensão máxima resistente (σ_u) possuem o mesmo valor da tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$), referente ao aço austenítico 304 utilizado neste trabalho. As linhas cheias representam as tensões críticas (σ_{cr}) enquanto as linhas tracejadas representam as tensões máximas resistentes (σ_u).

No que se refere as figuras, estas mostram as deformadas das colunas trabalhando tanto de forma individual quanto em conjunto bem como a quantidade de interconexões necessárias para ocasionar a mudança no comportamento das colunas. Em cada figura, tem-se as seções transversais localizadas na metade do comprimento das colunas, sendo assim, as interconexões entre as cantoneiras somente são vistas nas figuras onde as colunas possuem um número ímpar de interconexões (localizadas na metade do comprimento das colunas).

Por fim, tem-se os gráficos cargas *versus* deslocamento axial para as colunas com comprimentos de 900mm, 1400mm e 2200mm e seções 50,8x4,76mm,

50,8x6,35mm e 50,8x7,93mm. Os gráficos citados foram construídos para colunas trabalhando tanto de forma individual quanto de forma conjunta.

6.2 Colunas com comprimento de 900mm

A Tabela 22 apresenta os resultados para as colunas com comprimento de 900mm e seções transversais formadas por cantoneiras duplas cruciformes de 50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm e 50,8x7,93mm.

Tabela 22 – Resultados para colunas com comprimento de 900mm.

Cantoneira dupla cruciforme 50,8x4,76mm - Relação b/t = 10,67 - Área da seção = 1832,0mm ²									
N° interconexões	0	1	2	3	4	5	6	7	LT
Dist. interconexões a (mm)	900	450	300	225	180	150	129	113	0
Modo Flambagem	FT	T	T	T	T	T	T	T	T
N _{cr} (kN)	658,66	676,20	680,83	684,23	686,70	688,74	690,68	692,60	713,51
σ _{cr} (MPa)	359,53	369,10	371,63	373,49	374,84	375,95	377,01	378,06	389,47
Imp. geométrica	t/10	t/10	t/10	t/10	t/10	t/10	t/10	t/10	t/10
N _u (kN)	258,02	269,72	270,37	272,12	271,15	271,50	272,26	272,75	276,14
σ _u (MPa)	140,84	147,23	147,58	148,54	148,01	148,20	148,61	148,88	150,73
Cantoneira dupla cruciforme 50,8x6,35mm - Relação b/t = 8,00 - Área da seção = 2424,0mm ²									
N° interconexões	0	1	2	3	4	5	6	7	LT
Dist. interconexões a (mm)	900	450	300	225	180	150	129	113	0
Modo Flambagem	F	F	T	T	T	T	T	T	T
N _{cr} (kN)	1131,50	1173,58	1570,71	1583,39	1591,87	1598,92	1605,51	1611,98	1681,36
σ _{cr} (MPa)	466,79	484,15	647,98	653,21	656,71	659,62	662,34	665,01	693,63
Imp. geométrica	L/1000	L/1000	t/10	t/10	t/10	t/10	t/10	t/10	t/10
N _u (kN)	279,06	283,03	376,10	383,26	383,69	384,30	385,51	386,54	393,00
σ _u (MPa)	115,12	116,76	155,16	158,11	158,29	158,54	159,04	159,46	162,13
Cantoneira dupla cruciforme 50,8x7,93mm - Relação b/t = 6,41 - Área da seção = 2968,0mm ²									
N° interconexões	0	1	2	3	4	5	6	7	LT
Dist. interconexões a (mm)	900	450	300	225	180	150	129	113	0
Modo Flambagem	F	F	F	T	T	T	T	T	T
N _{cr} (kN)	1363,79	1412,73	2703,54	2980,27	3003,20	3021,95	3039,27	3056,13	3234,61
σ _{cr} (MPa)	459,50	475,99	910,90	1004,13	1011,86	1018,18	1024,01	1029,69	1089,83
Imp. geométrica	L/1000	L/1000	L/1000	t/10	t/10	t/10	t/10	t/10	t/10
N _u (kN)	341,14	345,74	393,14	475,91	482,84	490,98	501,96	505,53	513,88
σ _u (MPa)	114,94	116,49	132,46	160,35	162,68	165,42	169,12	170,33	173,14

A Figura 45 mostra a relação entre a tensão crítica (σ_{cr}) / tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) com a distância entre interconexões (a) / comprimento da coluna (L).

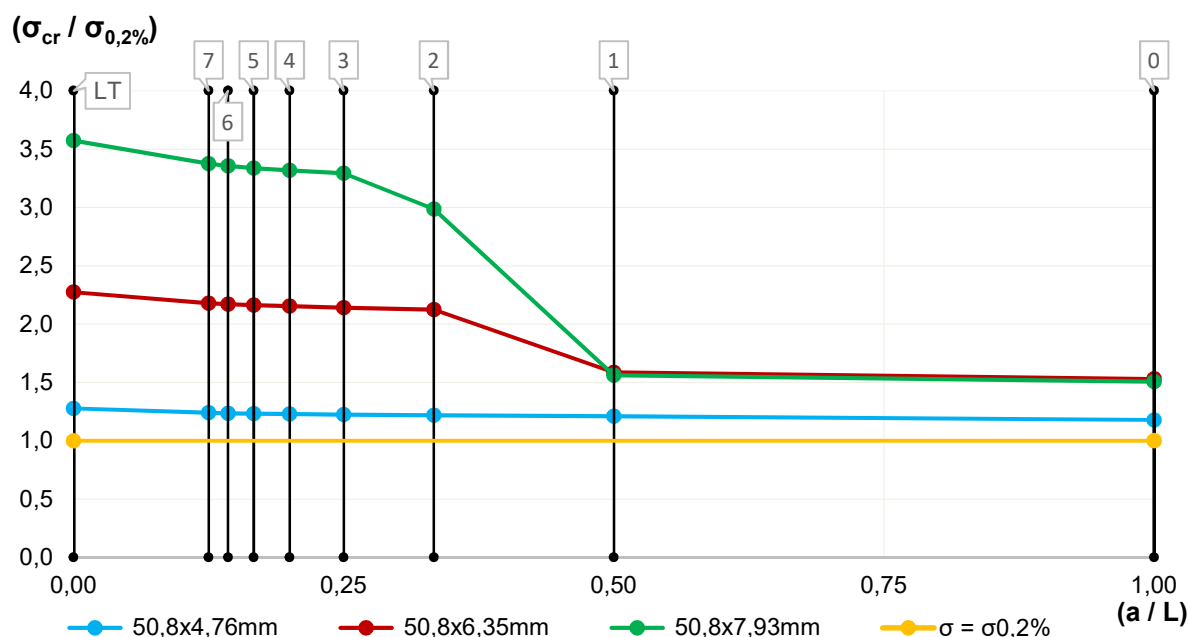


Figura 45 – Gráfico Tensão crítica (σ_{cr}) / Tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) versus Distância entre interconexões (a) / Comprimento da coluna (L) para L = 900mm.

A Figura 46 mostram a relação entre a tensão máxima resistente (σ_u) / tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) com a distância entre interconexões (a) / comprimento da coluna (L).

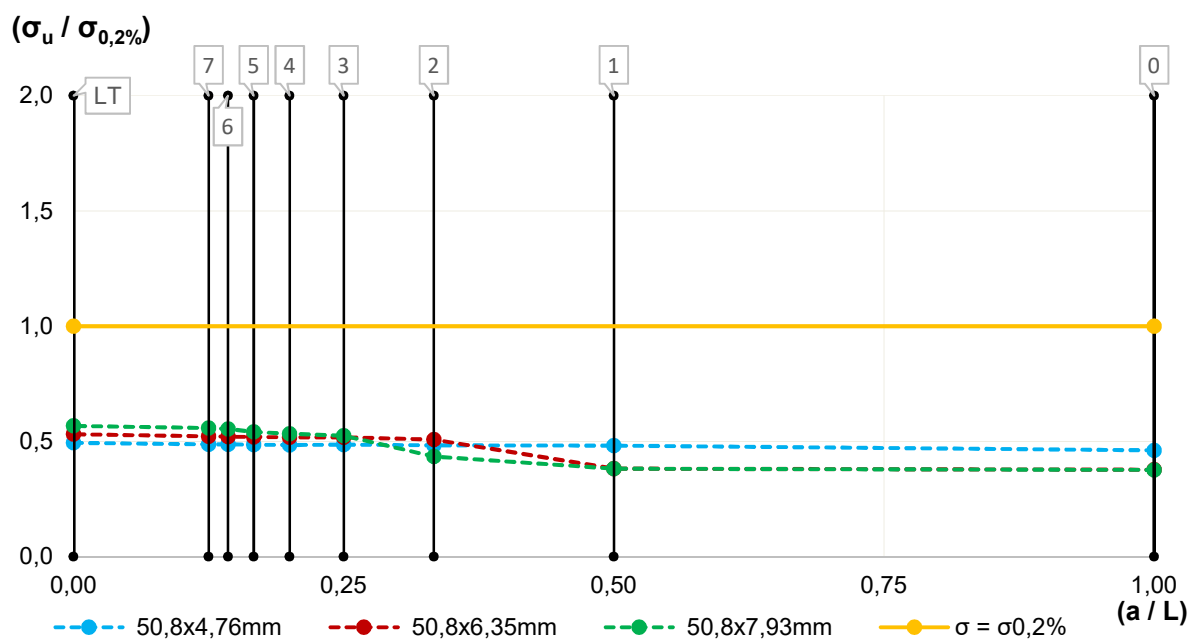


Figura 46 – Gráfico Tensão máxima resistente (σ_u) / Tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) versus Distância entre interconexões (a) / Comprimento da coluna (L) para L = 900mm.

As figuras a seguir mostram as configurações deformadas para as colunas com comprimento de 900mm e seções transversais formadas por cantoneiras duplas cruciformes com: 50,8x4,76mm (Figura 47 e Figura 48), 50,8x6,35mm (Figura 49 e Figura 50) e 50,8x7,93mm (Figura 51 e Figura 52).

- DL – 50,8x4,76 – 900 – 0

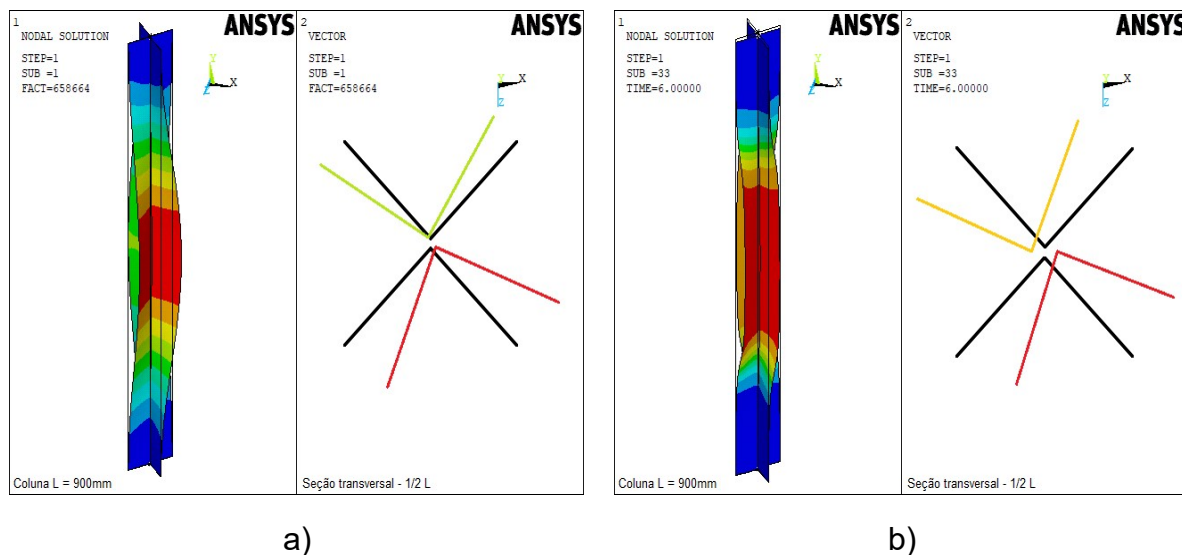


Figura 47 – Coluna trabalhando de forma individual sem interconexão e modo de flambagem por flexo-torção: a) $N_{cr} = 658,66\text{kN}$ e b) $N_u = 258,02\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 900 – 1 – 450

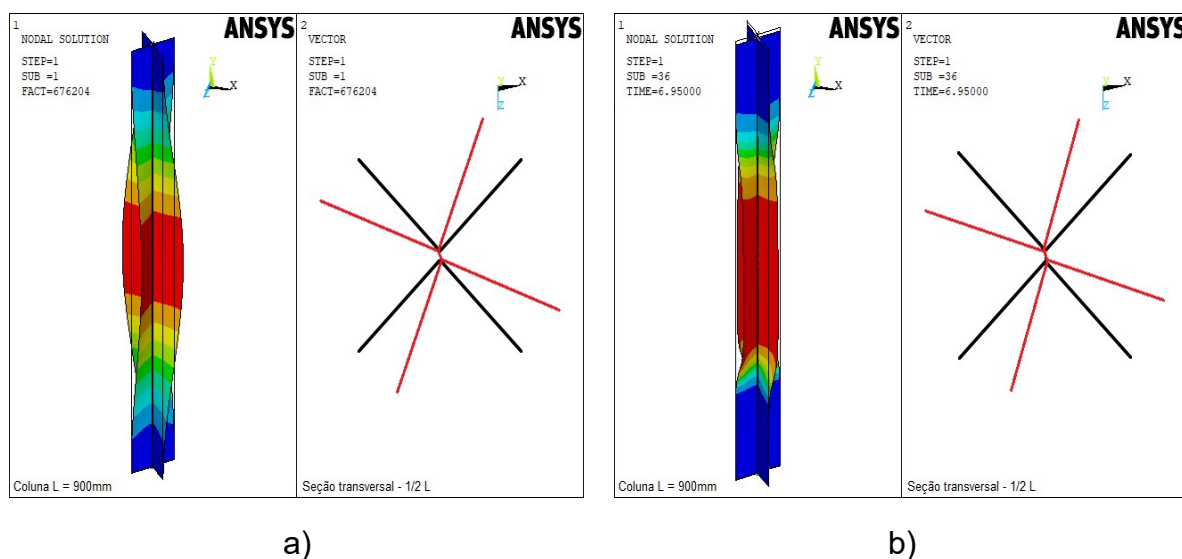
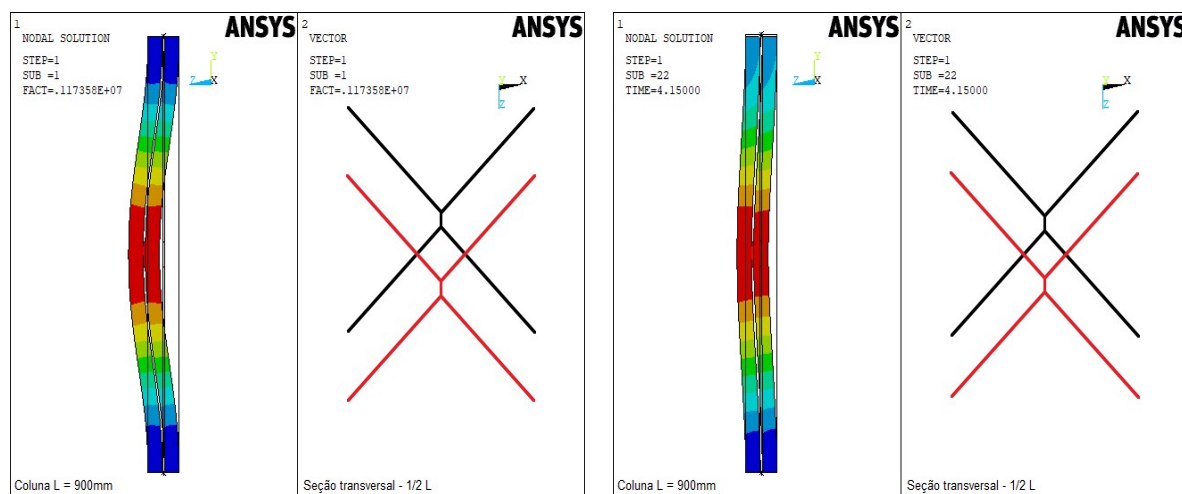


Figura 48 – Coluna trabalhando de forma conjunta com uma interconexão e modo de flambagem por torção: a) $N_{cr} = 676,20\text{kN}$ e b) $N_u = 269,72\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 900 – 1 – 450

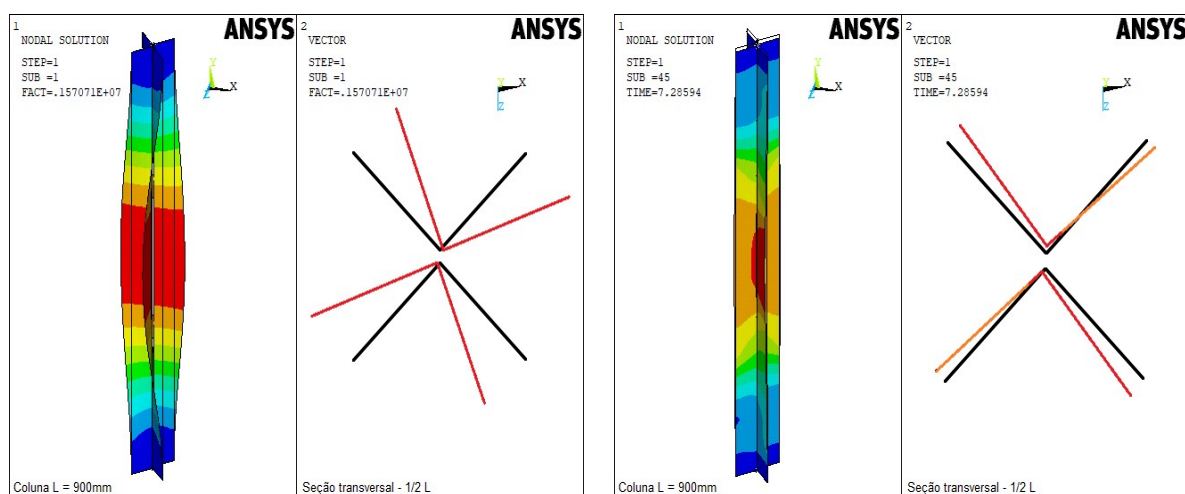


a)

b)

Figura 49 – Coluna trabalhando de forma individual com uma interconexão e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 1173,58\text{kN}$ e b) $N_u = 283,03\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 900 – 2 – 300



a)

b)

Figura 50 – Coluna trabalhando de forma conjunta com duas interconexões e modo de flambagem por torção do conjunto: a) $N_{cr} = 1570,71\text{kN}$ e b) $N_u = 376,10\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 900 – 2 – 300

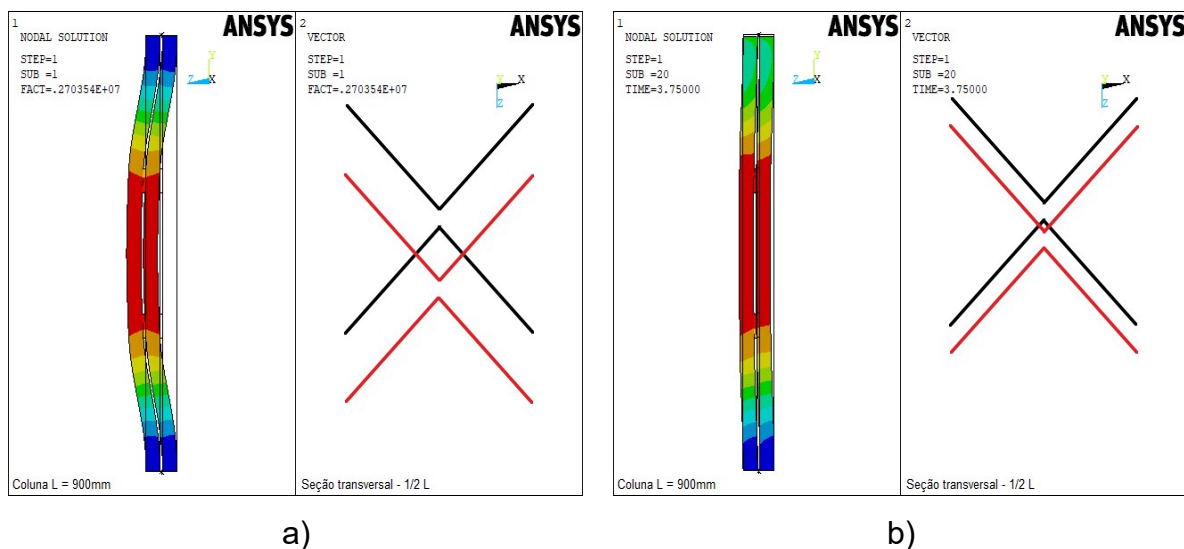


Figura 51 – Coluna trabalhando de forma individual com duas interconexões e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 2703,54\text{kN}$ e b) $N_u = 393,14\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 900 – 3 – 225

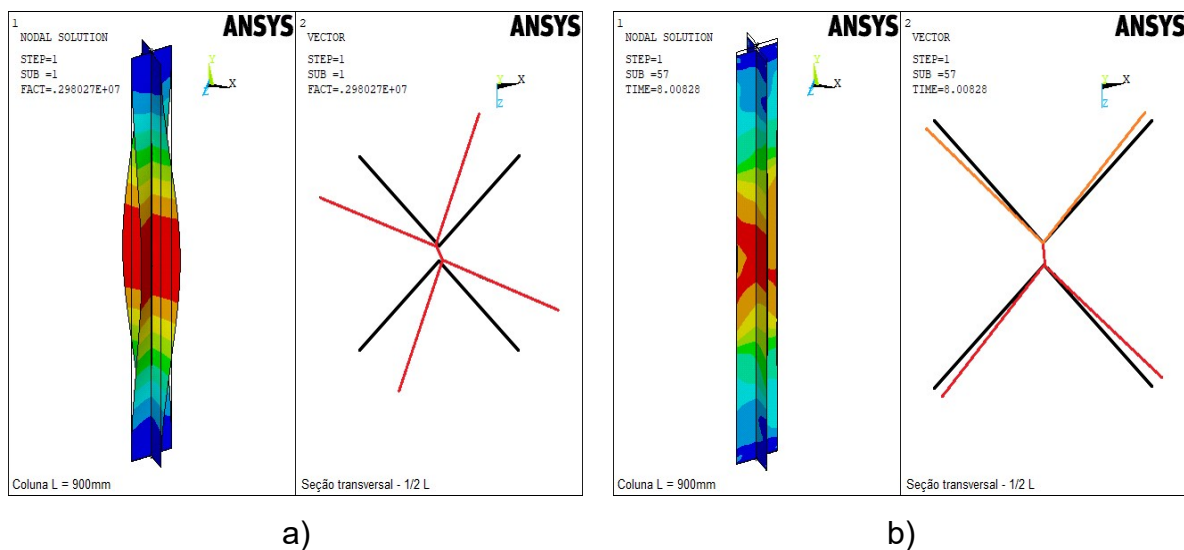


Figura 52 – Coluna trabalhando de forma conjunta com três interconexões e modo de flambagem por torção do conjunto: a) $N_{cr} = 2980,27\text{kN}$ e b) $N_u = 475,91\text{kN}$.

A Figura 53 e a Figura 54 mostram os gráficos carga *versus* deslocamento axial para colunas com 900mm, e seções transversais 50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm e 50,8x7,93mm, trabalhando de forma individual e conjunta, respectivamente.

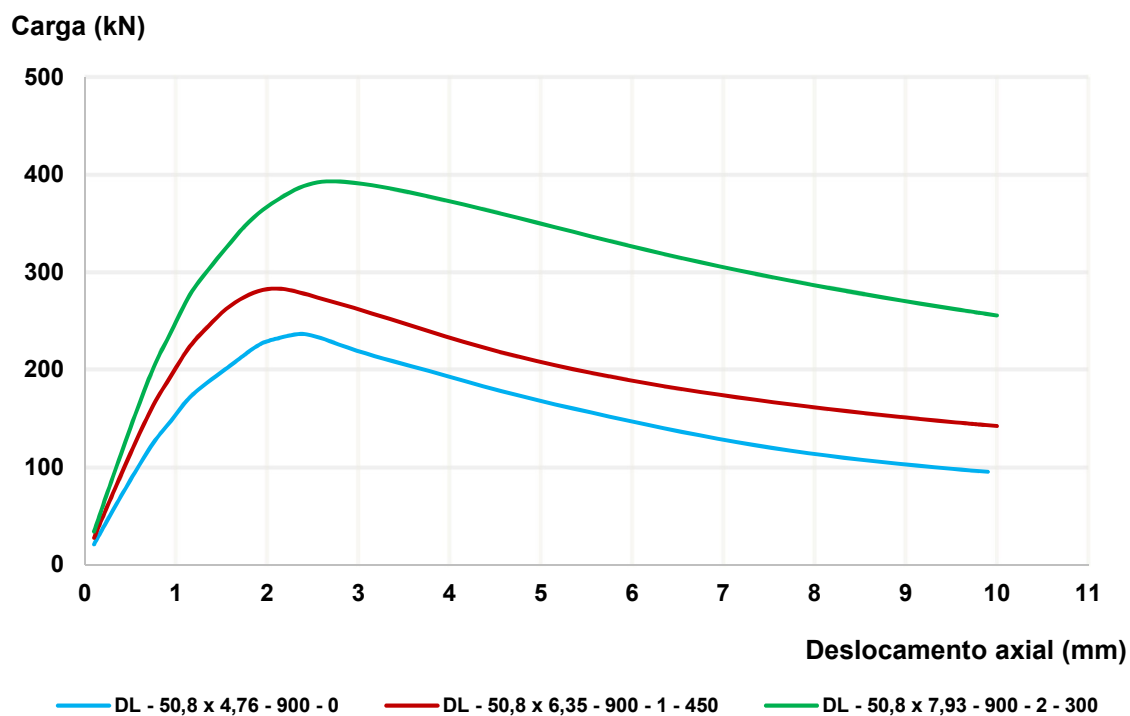


Figura 53 – Gráfico carga máxima resistente *versus* deslocamento axial: colunas com 900mm de comprimento e seções transversais trabalhando de forma individual.

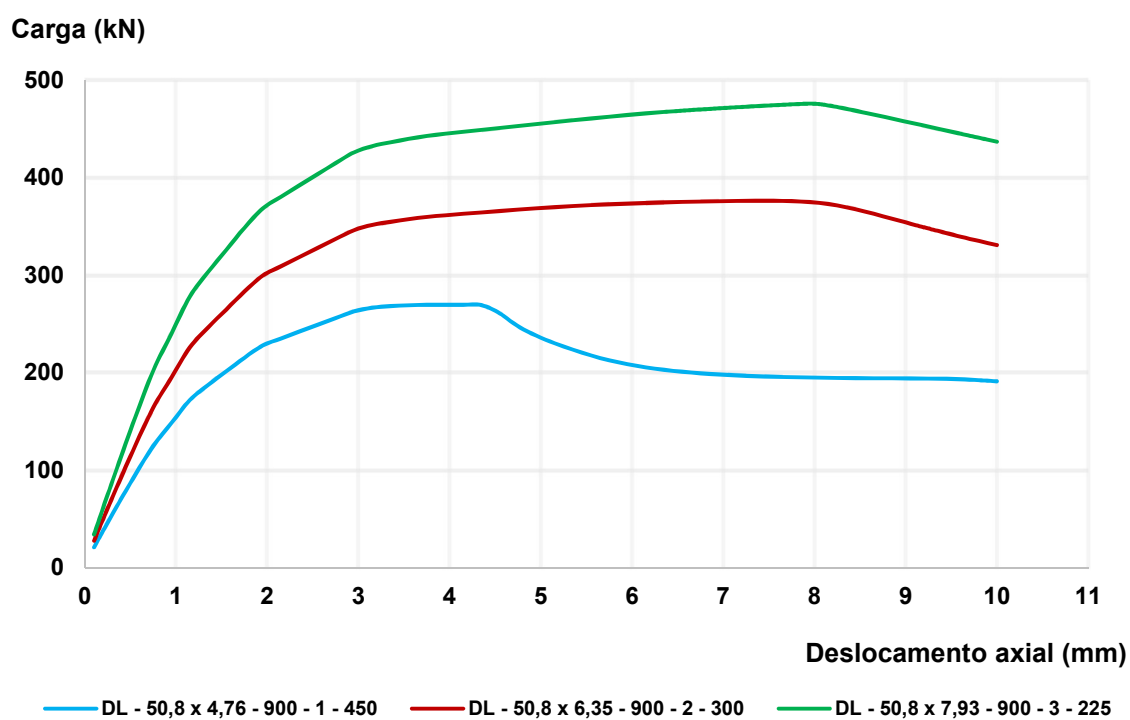


Figura 54 – Gráfico carga máxima resistente *versus* deslocamento axial: colunas com 900mm de comprimento e seções transversais trabalhando em conjunto.

6.3 Colunas com comprimento de 1400mm

A Tabela 23 apresenta os resultados para as colunas com comprimento de 1400mm e seções transversais formadas por cantoneiras duplas cruciformes de 50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm e 50,8x7,93mm.

Tabela 23 – Resultados para colunas com comprimento de 1400mm.

Cantoneira dupla cruciforme 50,8x4,76mm - Relação b/t = 10,67 - Área da seção = 1832,0mm ²									
N° interconexões	0	1	2	3	4	5	6	7	LT
Dist. interconexões a (mm)	1400	700	467	350	280	233	200	175	0
1° Modo Flambagem	F	F	T	T	T	T	T	T	T
N _{cr} (kN)	373,82	383,13	657,49	661,74	663,88	665,46	666,85	668,15	694,86
σ _{cr} (MPa)	204,05	209,13	358,89	361,21	362,38	363,24	364,00	364,71	379,29
Imp. geométrica	L/1000	L/1000	t/10	t/10	t/10	t/10	t/10	t/10	t/10
N _u (kN)	158,09	159,83	265,89	273,82	273,93	274,59	274,96	275,94	280,24
σ _u (MPa)	84,41	85,41	108,27	120,95	143,25	159,17	160,31	155,14	164,69
Cantoneira dupla cruciforme 50,8x6,35mm - Relação b/t = 8,00 - Área da seção = 2424,0mm ²									
N° interconexões	0	1	2	3	4	5	6	7	LT
Dist. interconexões a (mm)	1400	700	467	350	280	233	200	175	0
1° Modo Flambagem	F	F	F	F	T	T	T	T	T
N _{cr} (kN)	475,83	487,25	936,51	1303,93	1535,77	1541,40	1546,18	1550,62	1638,69
σ _{cr} (MPa)	196,30	201,01	386,35	537,92	633,57	635,89	637,86	639,69	676,03
Imp. geométrica	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	t/10	t/10	t/10	t/10	t/10
N _u (kN)	204,62	207,03	262,45	293,18	347,25	385,84	388,58	376,07	399,22
σ _u (MPa)	115,12	116,76	155,16	158,11	158,29	158,54	159,04	159,46	162,13
Cantoneira dupla cruciforme 50,8x7,93mm - Relação b/t = 6,41 - Área da seção = 2968,0mm ²									
N° interconexões	0	1	2	3	4	5	6	7	LT
Dist. interconexões a (mm)	1400	700	467	350	280	233	200	175	0
1° Modo Flambagem	F	F	F	F	F	F	F	F	F
N _{cr} (kN)	571,94	585,16	1132,62	1590,19	1924,74	2148,97	2168,18	2179,80	2209,79
σ _{cr} (MPa)	192,70	197,16	381,61	535,78	648,50	724,05	730,52	734,43	744,54
Imp. geométrica	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000
N _u (kN)	248,91	251,89	321,09	359,83	374,55	379,40	380,27	380,33	389,83
σ _u (MPa)	83,86	84,87	108,18	121,24	126,20	127,83	128,12	128,14	131,34

A Figura 55 mostra a relação entre a tensão crítica (σ_{cr}) / tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) com a distância entre interconexões (a) / comprimento da coluna (L).

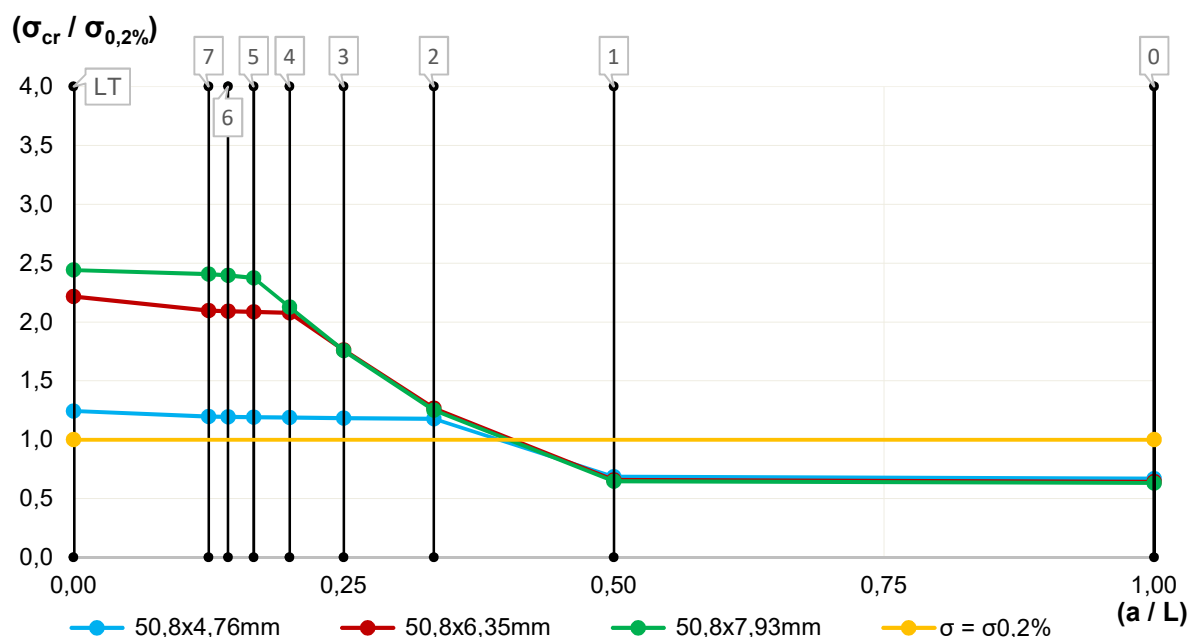


Figura 55 – Gráfico Tensão crítica (σ_{cr}) / Tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) versus Distância entre interconexões (a) / Comprimento da coluna (L) para L = 1400mm.

A Figura 56 mostra a relação entre a tensão máxima resistente (σ_u) / tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) com a distância entre interconexões (a) / comprimento da coluna (L).

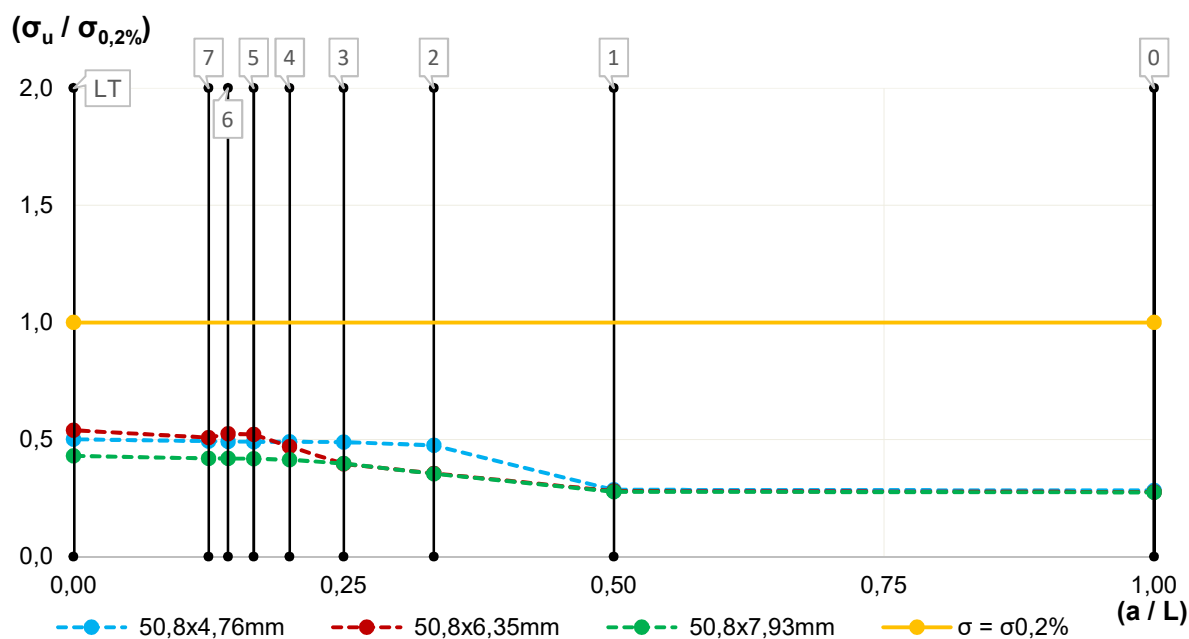


Figura 56 – Gráfico Tensão máxima resistente (σ_u) / Tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) versus Distância entre interconexões (a) / Comprimento da coluna (L) para L = 1400mm.

As figuras a seguir mostram as configurações deformadas para as colunas com comprimento de 1400mm e seções transversais formadas por cantoneiras duplas cruciformes com: 50,8x4,76mm (Figura 57 e Figura 58), 50,8x6,35mm (Figura 59 e Figura 60) e 50,8x7,93mm (Figura 61 e Figura 62).

- DL – 50,8x4,76 – 1400 – 1 – 700

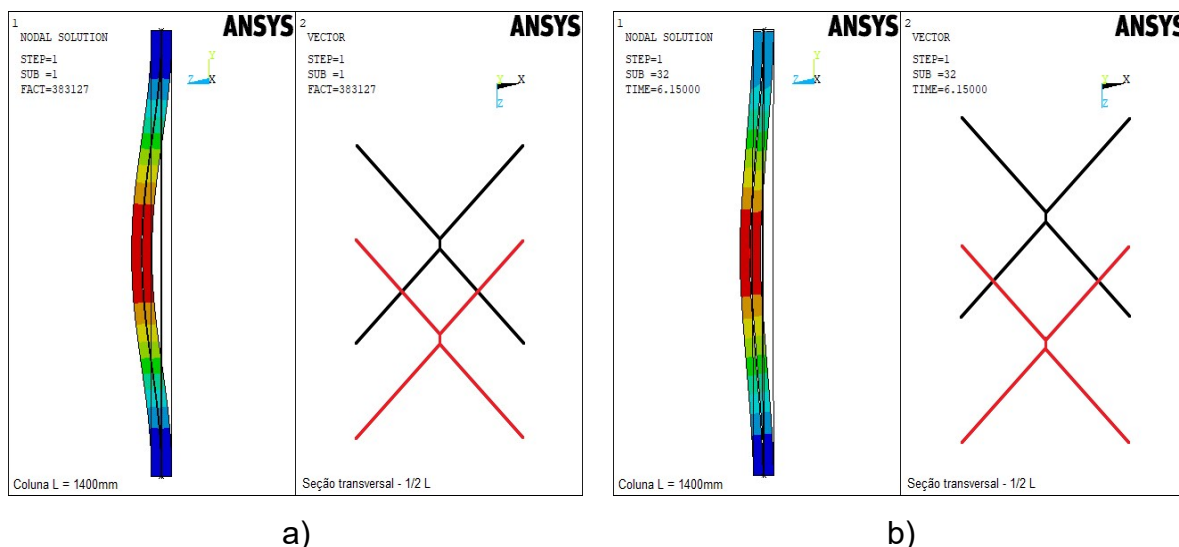


Figura 57 – Coluna trabalhando de forma individual com uma interconexão e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 383,13\text{kN}$ e b) $N_u = 159,83\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 1400 – 2 – 467

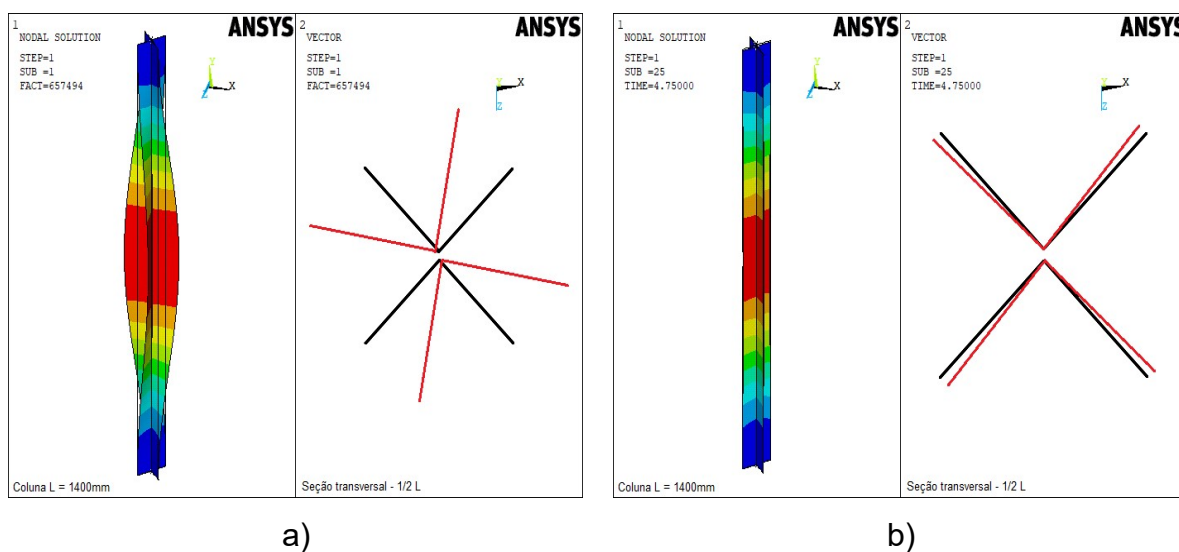


Figura 58 – Coluna trabalhando de forma conjunta com duas interconexões e modo de flambagem por torção do conjunto: a) $N_{cr} = 657,49\text{kN}$ e b) $N_u = 265,89\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 1400 – 3 – 350

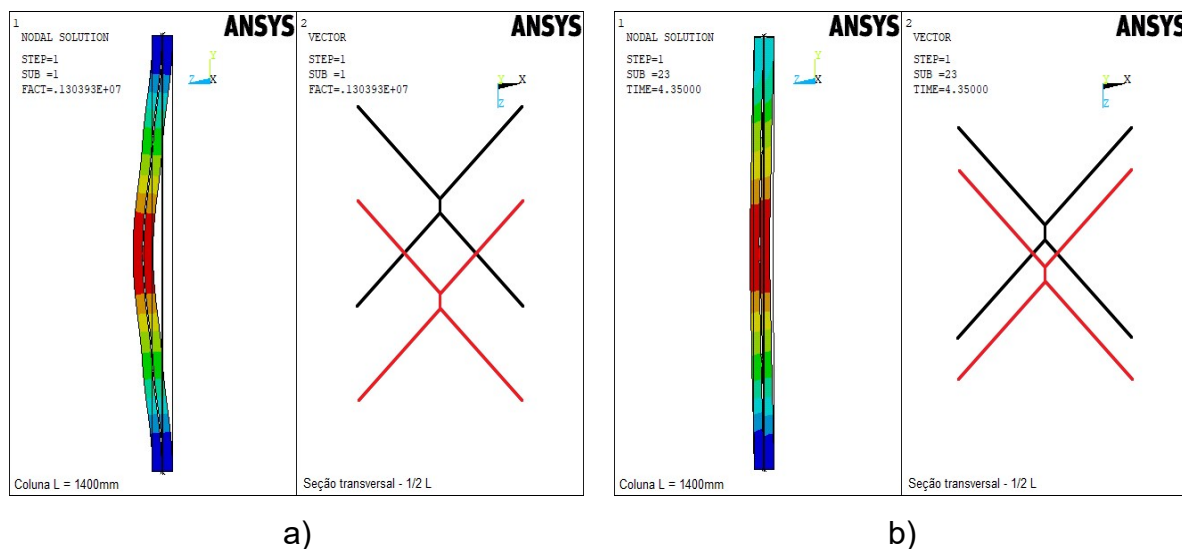


Figura 59 – Coluna trabalhando de forma individual com três interconexões e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 1303,93\text{kN}$ e b) $N_u = 293,18\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 1400 – 4 – 280

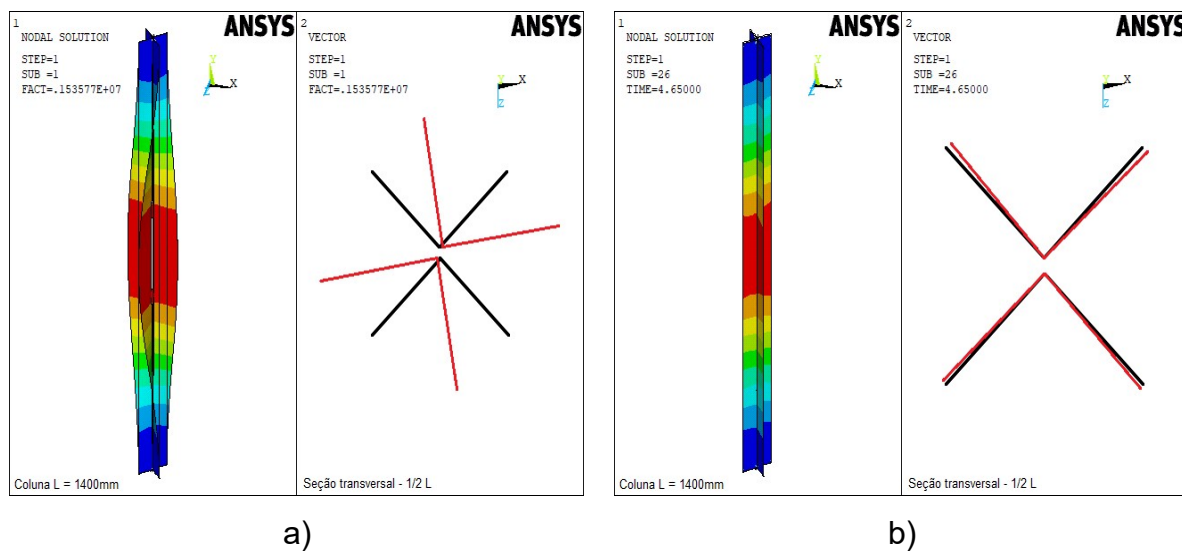


Figura 60 – Coluna trabalhando de forma conjunta com quatro interconexões e modo de flambagem por torção do conjunto: a) $N_{cr} = 1535,77\text{kN}$ e b) $N_u = 347,25\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 1400 – 4 – 280

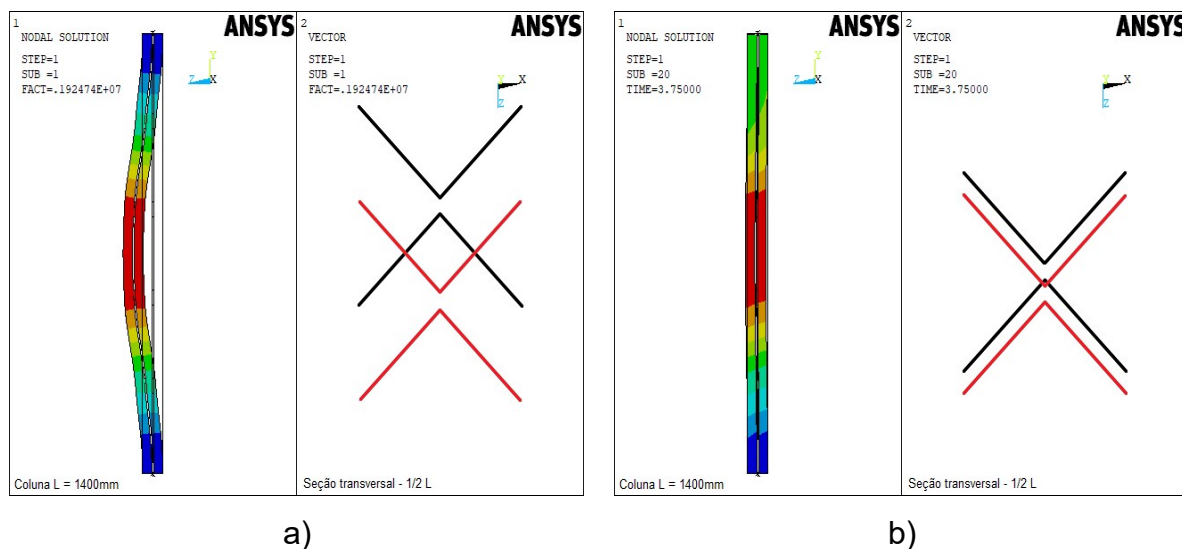


Figura 61 – Coluna trabalhando de forma individual com quatro interconexões e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 1924,74\text{kN}$ e b) $N_u = 374,55\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 1400 – 5 – 233

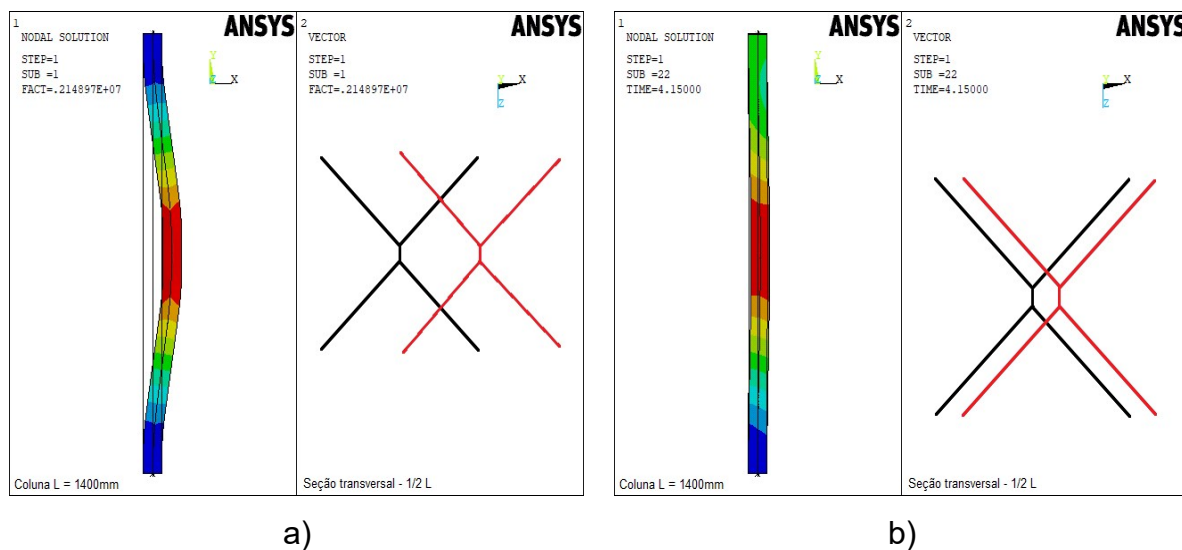


Figura 62 – Coluna trabalhando de forma conjunta com cinco interconexões e modo de flambagem por flexão do conjunto: a) $N_{cr} = 2148,97\text{kN}$ e b) $N_u = 379,40\text{kN}$.

A Figura 63 e a Figura 64 mostram os gráficos carga *versus* deslocamento axial para colunas com 1400mm, e seções transversais 50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm e 50,8x7,93mm, trabalhando de forma individual e conjunta, respectivamente.

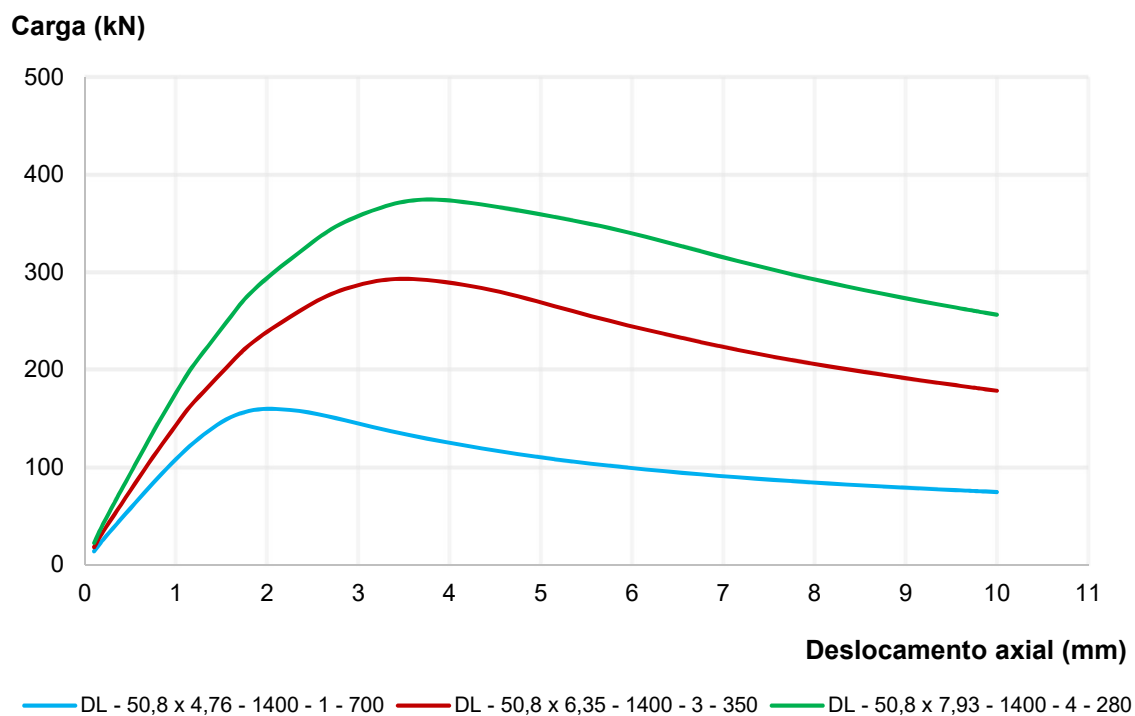


Figura 63 – Gráfico carga máxima resistente *versus* deslocamento axial: colunas com 1400mm de comprimento e seções transversais trabalhando de forma individual.

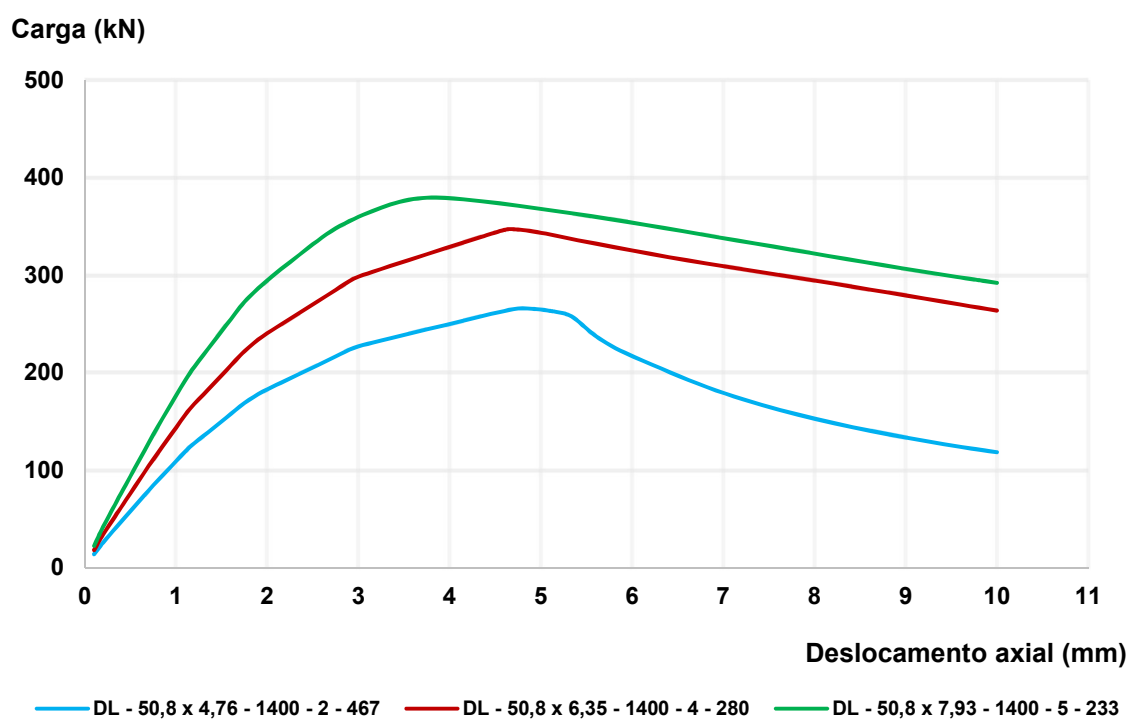


Figura 64 – Gráfico carga máxima resistente *versus* deslocamento axial: colunas com 1400mm de comprimento e seções transversais trabalhando em conjunto.

6.4 Colunas com comprimento de 2200mm

A Tabela 24 apresenta os resultados para as colunas com comprimento de 2200mm e seções transversais formadas por cantoneiras duplas cruciformes de 50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm e 50,8x7,93mm.

Tabela 24 – Resultados para colunas com comprimento de 2200mm.

Cantoneira dupla cruciforme 50,8x4,76mm - Relação b/t = 10,67 - Área da seção = 1832,0mm ²									
N° interconexões	0	1	2	3	4	5	6	7	LT
Dist. interconexões a (mm)	2200	1100	733	550	440	367	314	275	0
1° Modo Flambagem	F	F	F	F	F	F	F	F	F
N _{cr} (kN)	152,51	154,92	296,28	408,38	488,34	543,81	581,24	588,64	605,70
σ _{cr} (MPa)	83,25	84,56	161,72	222,91	266,56	296,84	317,27	321,31	330,62
Imp. geométrica	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000
N _u (kN)	95,33	94,43	138,56	165,47	177,70	185,42	190,56	190,34	193,49
σ _u (MPa)	52,04	51,54	75,63	90,32	97,00	101,21	104,02	103,90	105,62
Cantoneira dupla cruciforme 50,8x6,35mm - Relação b/t = 8,00 - Área da seção = 2424,0mm ²									
N° interconexões	0	1	2	3	4	5	6	7	LT
Dist. interconexões a (mm)	2200	1100	733	550	440	367	314	275	0
1° Modo Flambagem	F	F	F	F	F	F	F	F	F
N _{cr} (kN)	193,89	196,84	379,66	528,63	637,05	713,35	760,03	762,67	770,38
σ _{cr} (MPa)	79,99	81,20	156,63	218,08	262,81	294,29	313,54	314,63	317,81
Imp. geométrica	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000
N _u (kN)	119,96	121,17	179,66	216,06	232,85	243,47	247,81	247,77	252,16
σ _u (MPa)	49,49	49,99	74,12	89,13	96,06	100,44	102,23	102,22	104,03
Cantoneira dupla cruciforme 50,8x7,93mm - Relação b/t = 6,41 - Área da seção = 2968,0mm ²									
N° interconexões	0	1	2	3	4	5	6	7	LT
Dist. interconexões a (mm)	2200	1100	733	550	440	367	314	275	0
1° Modo Flambagem	F	F	F	F	F	F	F	F	F
N _{cr} (kN)	232,65	236,31	458,76	643,92	780,97	878,61	911,79	913,37	918,60
σ _{cr} (MPa)	78,39	79,62	154,57	216,95	263,13	296,03	307,21	307,74	309,50
Imp. geométrica	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000	L/1000
N _u (kN)	144,66	146,27	218,77	264,65	286,05	299,58	301,26	301,33	307,65
σ _u (MPa)	48,74	49,28	73,71	89,17	96,38	100,94	101,50	101,53	103,66

A Figura 65 mostra a relação entre a tensão crítica (σ_{cr}) / tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) com a distância entre interconexões (a) / comprimento da coluna (L).

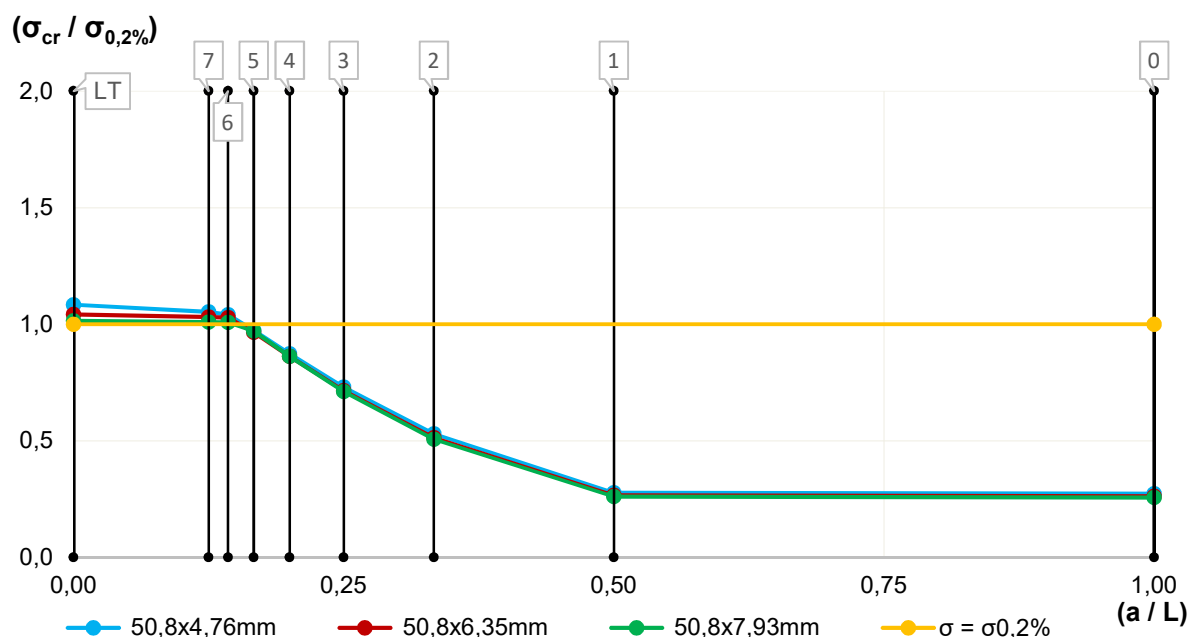


Figura 65 – Gráfico Tensão crítica (σ_{cr}) / Tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) versus Distância entre interconexões (a) / Comprimento da coluna (L) para L = 2200mm.

A Figura 66 mostra a relação entre a tensão máxima resistente (σ_u) / tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) com a distância entre interconexões (a) / comprimento da coluna (L).

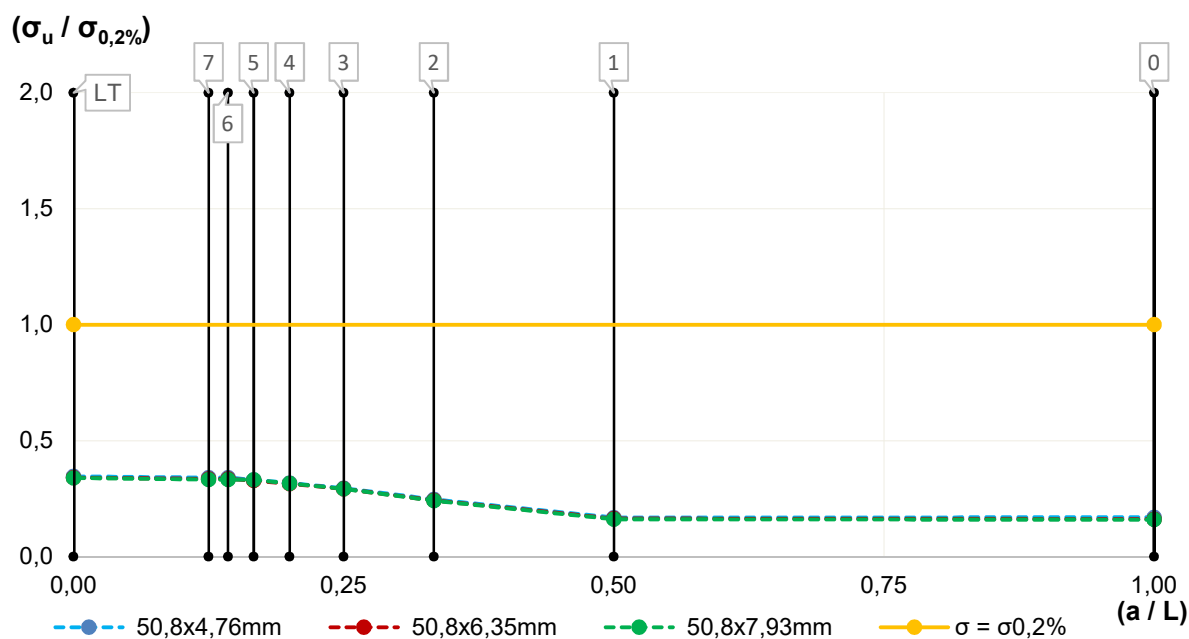


Figura 66 – Gráfico Tensão máxima resistente (σ_u) / Tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) versus Distância entre interconexões (a) / Comprimento da coluna (L) para L = 2200mm.

As figuras a seguir mostram as configurações deformadas para as colunas com comprimento de 2200mm e seções transversais formadas por cantoneiras duplas cruciformes com: 50,8x4,76mm (Figura 67 e Figura 68), 50,8x6,35mm (Figura 69 e Figura 70) e 50,8x7,93mm (Figura 71 e Figura 72).

- DL – 50,8x4,76 – 2200 – 5 – 367

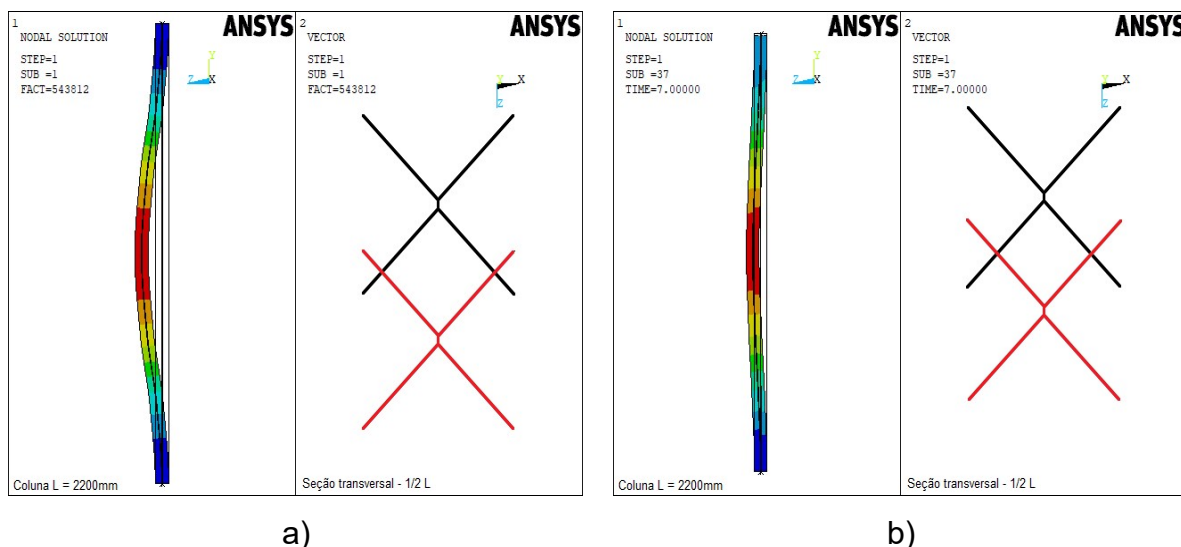


Figura 67 – Coluna trabalhando de forma individual com cinco interconexões e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 543,81\text{kN}$ e b) $N_u = 185,42\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 2200 – 6 – 314

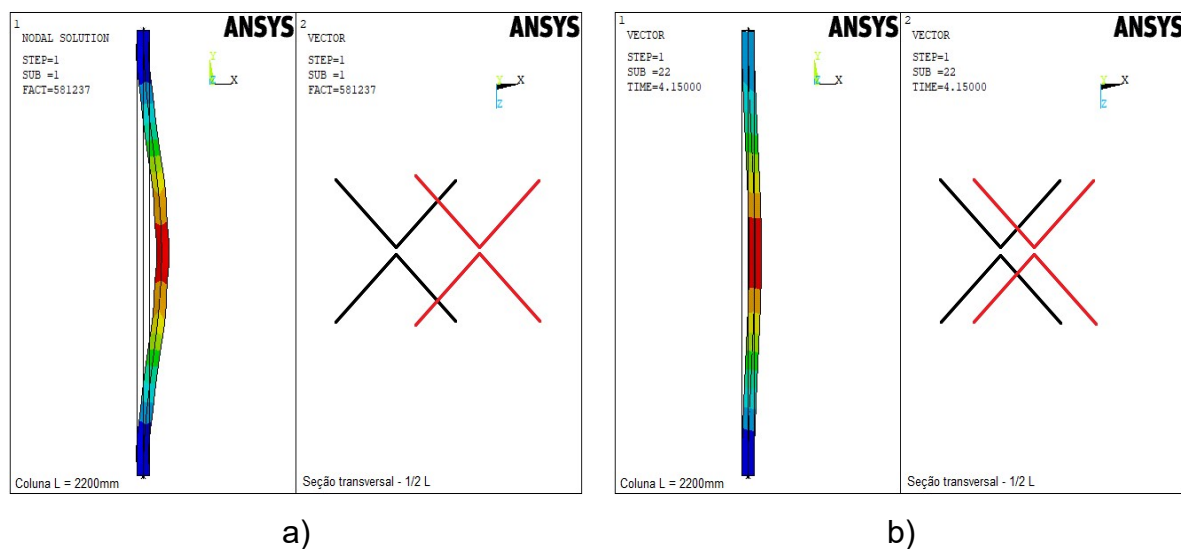


Figura 68 – Coluna trabalhando de forma conjunta com seis interconexões e modo de flambagem por flexão do conjunto: a) $N_{cr} = 581,24\text{kN}$ e b) $N_u = 190,56\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 2200 – 5 – 367

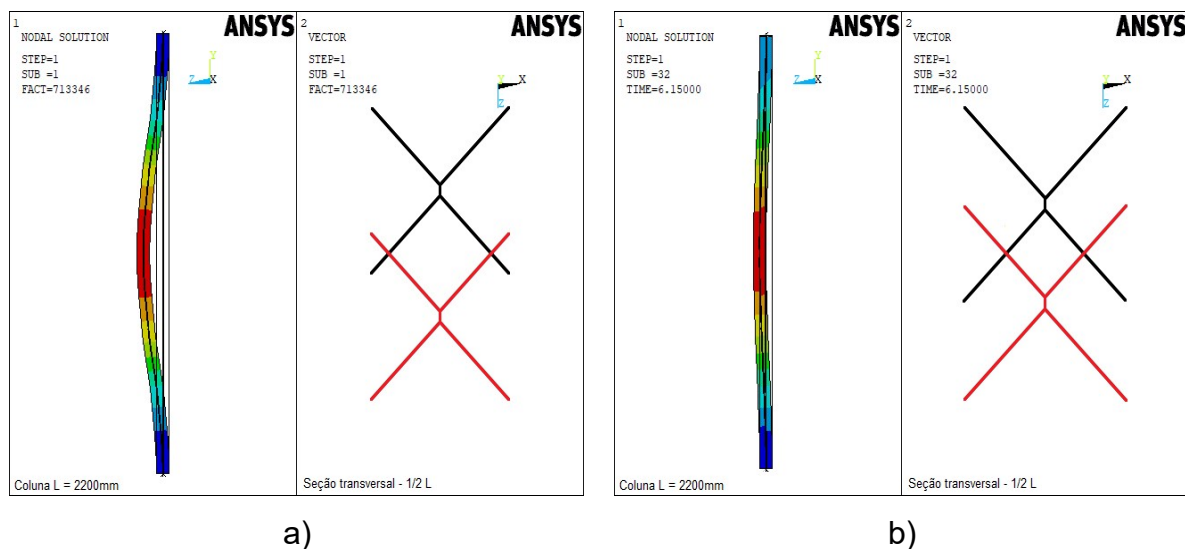


Figura 69 – Coluna trabalhando de forma individual com cinco interconexões e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 713,35\text{kN}$ e b) $N_u = 243,47\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 2200 – 6 – 314

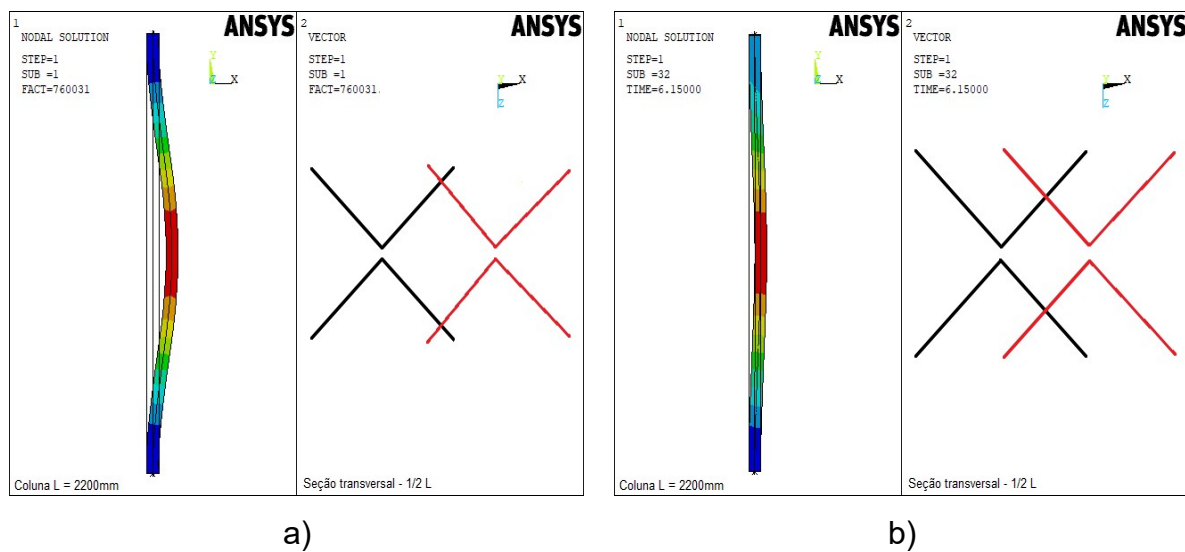


Figura 70 – Coluna trabalhando de forma conjunta com seis interconexões e modo de flambagem por flexão do conjunto: a) $N_{cr} = 760,03\text{kN}$ e b) $N_u = 247,81\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 2200 – 5 – 367

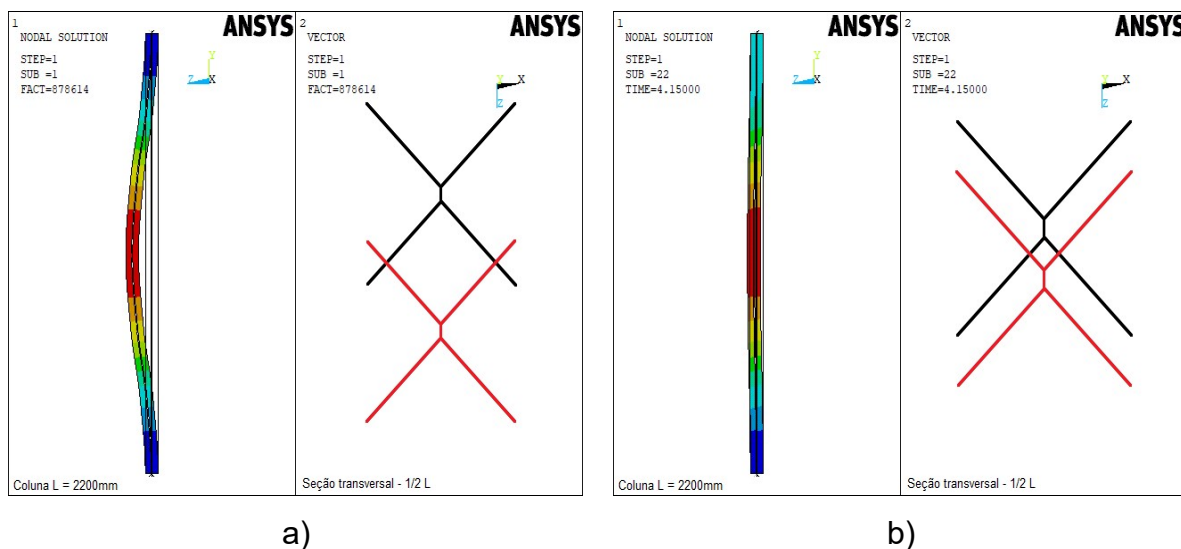


Figura 71 – Coluna trabalhando de forma individual com cinco interconexões e modo de flambagem por flexão individual: a) $N_{cr} = 878,61\text{kN}$ e b) $N_u = 299,58\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 2200 – 6 – 314

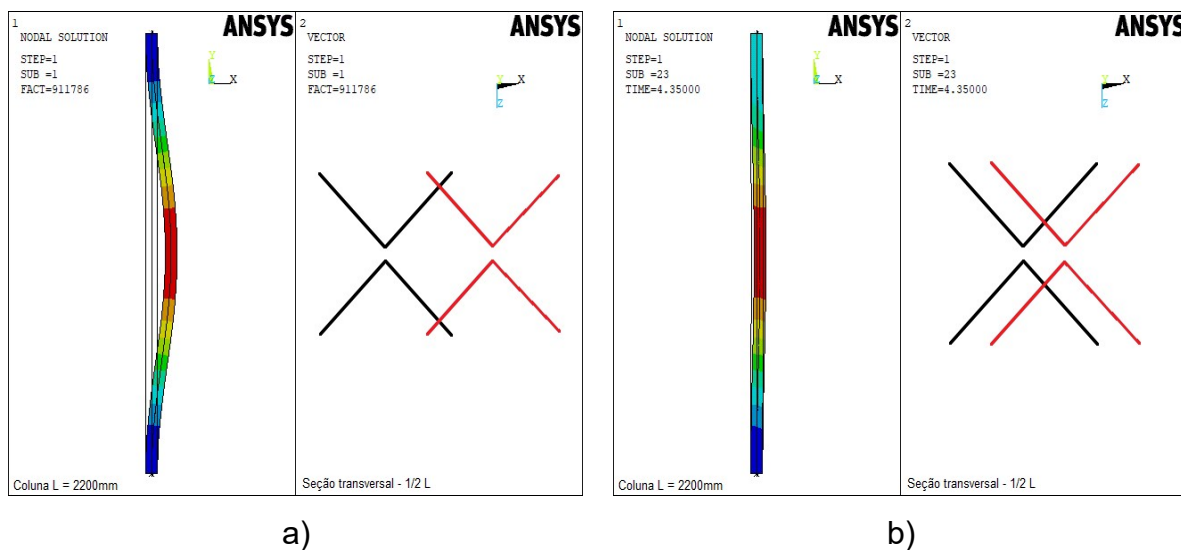


Figura 72 – Coluna trabalhando de forma conjunta com seis interconexões e modo de flambagem por flexão do conjunto: a) $N_{cr} = 911,79\text{kN}$ e b) $N_u = 301,26\text{kN}$.

A Figura 73 e a Figura 74 mostram os gráficos carga *versus* deslocamento axial para colunas com 2200mm, e seções transversais 50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm e 50,8x7,93mm, trabalhando de forma individual e conjunta, respectivamente.

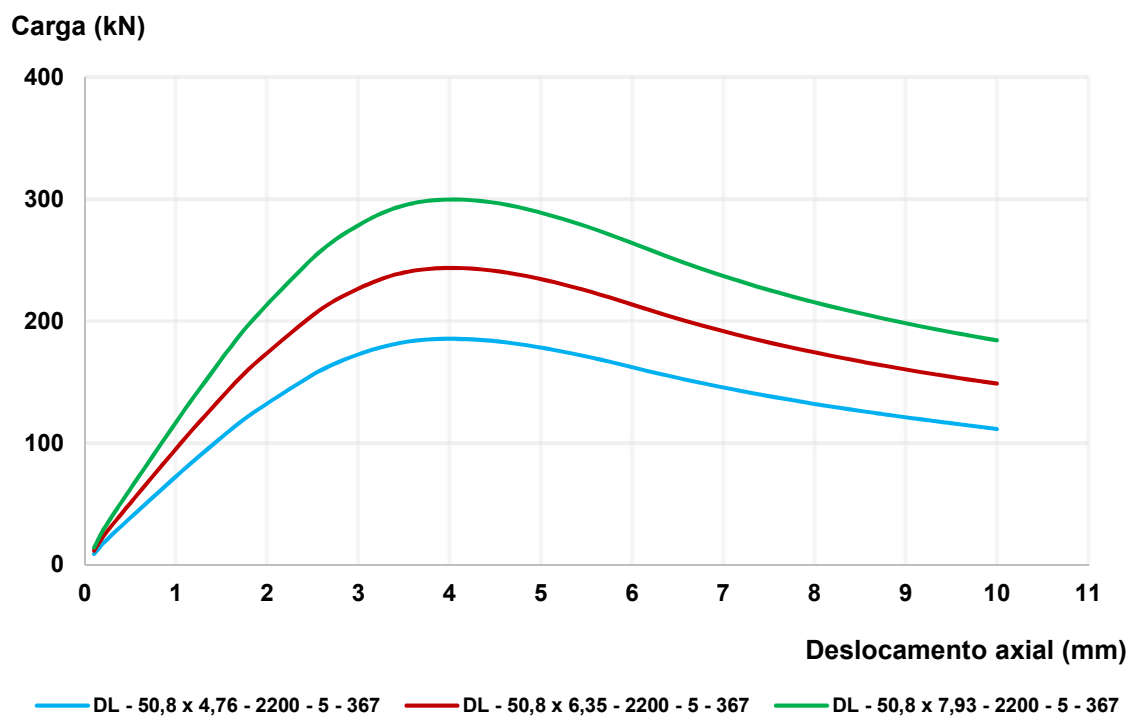


Figura 73 – Gráfico carga máxima resistente *versus* deslocamento axial: colunas com 2200mm de comprimento e seções transversais trabalhando de forma individual.

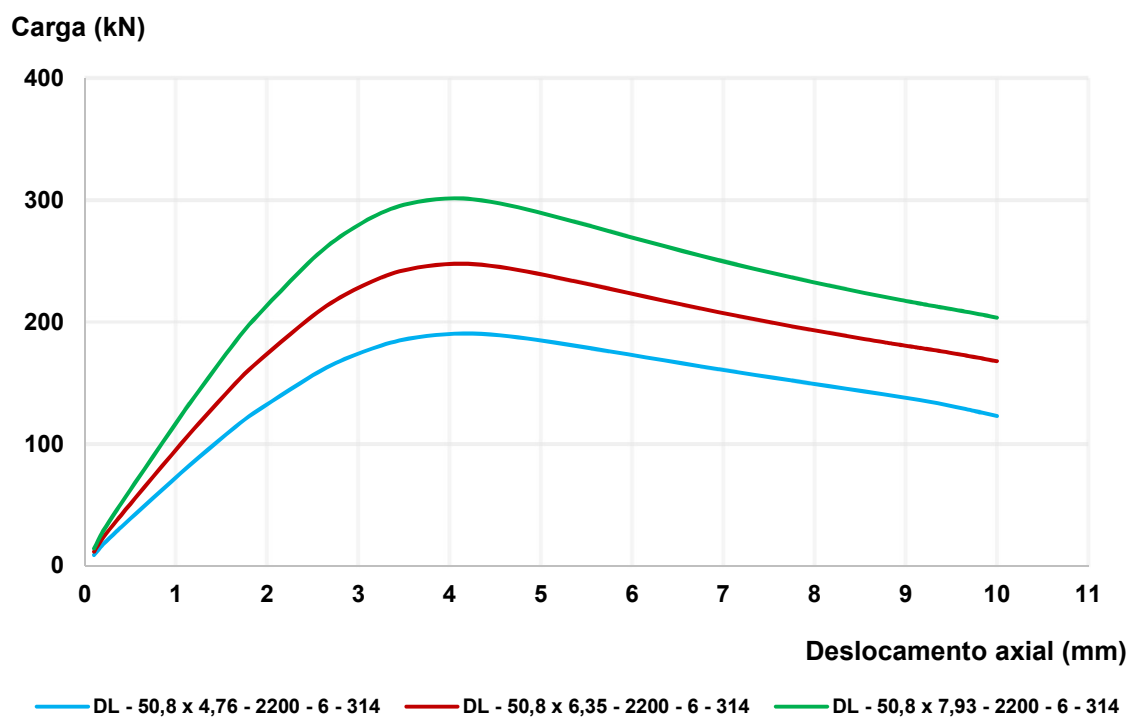


Figura 74 – Gráfico carga máxima resistente *versus* deslocamento axial: colunas com 2200mm de comprimento e seções transversais trabalhando em conjunto.

6.5 Análise e observações dos resultados numéricos

Com base nos resultados obtidos por meio das análises numéricas das colunas com comprimentos de 900mm, 1400mm e 2200mm, e seções transversais formadas por cantoneiras duplas cruciformes com 50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm e 50,8x7,93mm é possível observar que:

- a partir da introdução de um determinado número de interconexões, as colunas cruciformes formadas por cantoneiras duplas de abas iguais passam de um comportamento individual para um comportamento em conjunto;
- para colunas duplas cruciformes com 900mm de comprimento e seção transversal 50,8x4,76mm ($b/t = 10,67$), tanto a carga crítica (N_{cr}) quanto a carga máxima resistente (N_u) não sofreram variações significativas à medida que interconexões foram introduzidas entre as cantoneiras;
- para colunas duplas cruciformes com 900mm de comprimento e seções transversais 50,8x6,35mm ($b/t = 8,00$) e 50,8x7,93mm ($b/t=6,41$), tanto a carga crítica (N_{cr}) quanto a carga máxima resistente (N_u) sofreram variações significativas à medida que interconexões foram inseridas entre as cantoneiras. Isto ocorre até o momento em que as colunas passam a trabalhar de forma conjunta;
- para colunas com 1400mm e 2200mm de comprimento e seções transversais 50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm e 50,8x7,93mm, tanto a carga crítica (N_{cr}) quanto a carga máxima resistente (N_u) sofreram variações significativas à medida que interconexões foram inseridas. Isto ocorreu até o momento em que as colunas passaram a trabalhar de forma conjunta;
- as colunas com 900mm de comprimento e seções transversais 50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm e 50,8x7,93mm, passaram a trabalhar em conjunto, manifestando a flambagem por torção, com a inserção de uma, duas e três interconexões, respectivamente, entre as cantoneiras;
- as colunas com 1400mm de comprimento e seções transversais 50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm, passaram a trabalhar de forma conjunta, apresentando a torção como modo de flambagem, com a inserção de

duas e quatro interconexões, respectivamente, entretanto, a seção 50,8x7,93mm, passou a trabalhar em conjunto com modo de flambagem por flexão em torno do eixo de menor inércia, a partir de cinco interconexões inseridas entre as cantoneiras.

- para colunas com 2200mm de comprimento, o trabalho em conjunto das mesmas ocorreu a partir da inserção de seis interconexões entre as cantoneiras, com modo de flambagem por flexão em torno do eixo de menor inércia, independentemente das dimensões da seção transversal;
- para colunas com 900mm de comprimento, independentemente das dimensões da seção transversal e da quantidade de interconexões, os valores referentes às tensões críticas (σ_{cr}) são maiores do que o valor da tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$), entretanto, os valores referentes às tensões máximas resistentes (σ_u) são menores do que o valor da tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$);
- para colunas com 1400mm de comprimento, independentemente das dimensões da seção transversal e com duas ou mais interconexões inseridas entre as cantoneiras, os valores referentes às tensões críticas (σ_{cr}) são maiores do que o valor da tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$);
- os valores referentes às tensões máximas resistentes (σ_u) são menores do que o valor da tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) para as colunas com 1400mm de comprimento, independentemente das dimensões da seção transversal e da quantidade de interconexões;
- para colunas com 2200mm de comprimento, independentemente das dimensões da seção transversal e com seis ou mais interconexões inseridas, os valores referentes às tensões críticas (σ_{cr}) são maiores do que o valor da tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$);
- em relação às colunas com 2200mm de comprimento, os valores referentes às tensões máximas resistentes (σ_u) são menores do que o valor da tensão em 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$), independentemente das dimensões da seção transversal e da quantidade de interconexões.

7 AVALIAÇÃO DAS NORMAS EUROCODE-3 E AISC E FORMULAÇÃO DE UMA NOVA PROPOSTA PARA DISTÂNCIA ÓTIMA ENTRE INTERCONEXÕES

7.1 Introdução

O presente capítulo apresenta uma avaliação dos valores prescritos para as distâncias máximas entre interconexões, previstas pelo EC3 1-1 [6] e pelo AISC [7], bem como os valores referentes às distâncias entre interconexões obtidas a partir das análises numéricas efetuadas.

Por conseguinte, é feita uma comparação entre os resultados numéricos e os valores previstos pelas normas supramencionadas objetivando avaliar as diferenças encontradas entre as prescrições normativas e as análises numéricas.

Cabe salientar que, tanto o EC3 1-1 [6] quanto o AISC [7] não fazem previsão em relação ao modo de flambagem para colunas com interconexões trabalhando em conjunto.

Por fim, ao analisar os resultados numéricos, referentes às distâncias entre interconexões, e compará-los com as prescrições normativas, uma nova proposta para o cálculo da distância ótima entre interconexões é feita.

7.2 Distância entre interconexões - Eurocode 3

Conforme descrito no item 2.5.2, o EC3 1-1 [6] prevê que os elementos comprimidos, formados por seção combinada, com abas em contato ou pouco espaçadas e interconectadas por chapas ou soldas, devem ser verificados quanto a ocorrência do fenômeno da flambagem como um único elemento somente se as condições descritas na Tabela 12 forem atendidas. As distâncias máximas entre interconexões, realizadas por meio de soldas, para as cantoneiras utilizadas nesta dissertação estão descritas na Tabela 25.

Tabela 25 – Distâncias máximas entre interconexões conforme EC3 1-1 [6].

Dimensões da seção transversal da cantoneira	Raio de giração mínimo de uma cantoneira	Distância máxima entre interconexões*
(mm)	$r_{\min}$ (mm)	a (mm)
50,8x4,76	9,88	136,32
50,8x6,35	9,83	147,45
50,8x7,93	9,80	147,00

*Interconexões soldadas $\rightarrow a \leq 15 r_{\min}$

7.3 Distância entre interconexões - AISC

De acordo com o exposto no item 2.5.1, o AISC [7] normatiza que, em interconexões de cantoneiras duplas, o coeficiente de esbeltez entre duas interconexões de uma cantoneira individual não deve exceder 75% do coeficiente de esbeltez do conjunto. As distâncias máximas entre interconexões para as cantoneiras utilizadas nesta dissertação estão descritas na Tabela 26.

Tabela 26 – Distâncias máximas entre interconexões conforme AISC [7].

Comprimento da coluna	Seção transversal	Raio de giração mínimo de uma cantoneira	Coeficiente de flambagem do conjunto	Coeficiente de flambagem entre interconexões	Raio de giração do conjunto	Distância máxima entre interconexões
(mm)	(mm)	$r_{\min}$ (mm)	k1	k2	r_c (mm)	a (mm)
900	50,8x4,76	9,88	0,5	1,0	19,67	169,52
	50,8x6,35	9,83	0,5	1,0	19,47	170,40
	50,8x7,93	9,80	0,5	1,0	19,17	172,54
1400	50,8x4,76	9,88	0,5	1,0	19,67	263,70
	50,8x6,35	9,83	0,5	1,0	19,47	265,06
	50,8x7,93	9,80	0,5	1,0	19,17	268,39
2200	50,8x4,76	9,88	0,5	1,0	19,67	414,39
	50,8x6,35	9,83	0,5	1,0	19,47	416,53
	50,8x7,93	9,80	0,5	1,0	19,17	421,75

7.4 Distância entre interconexões - Resultados Numéricos

Em relação às análises numéricas realizadas neste trabalho, foi possível constatar que, a partir da inserção de um determinado número de interconexões (e, conseqüentemente, uma determinada distância entre elas) as colunas, com seção formada por cantoneiras, passam de um comportamento individual (flexo-torção ou flexão global em torno do eixo de menor inércia da cantoneira individual) para um comportamento em conjunto (torção ou flexão global em torno do eixo de menor inércia do conjunto).

Entretanto, conforme observado, os valores referentes à distância entre interconexões sofrem alterações para diferentes seções transversais e comprimentos das colunas. Na Tabela 27 são apresentados os valores relativos às distâncias entre interconexões que ocasionam o comportamento em conjunto das colunas, bem como o modo de flambagem associado.

Tabela 27 – Distâncias máximas entre interconexões - análises numéricas.

Comprimento da coluna	Seção transversal	Número de interconexões	Distância entre interconexões	Modo de flambagem
(mm)	(mm)	n	a (mm)	
900	50,8x4,76	1	450,00	T
	50,8x6,35	2	300,00	T
	50,8x7,93	3	225,00	T
1400	50,8x4,76	2	466,67	T
	50,8x6,35	4	280,00	T
	50,8x7,93	5	233,33	F
2200	50,8x4,76	6	314,29	F
	50,8x6,35	6	314,29	F
	50,8x7,93	6	314,29	F

F - Flexão

T - Torção

7.5 Avaliação das prescrições normativas: EC3 1-1 e AISC

Na Tabela 28 é apresentado um resumo das distâncias máximas entre interconexões, que permitem garantir o comportamento em conjunto das colunas com seção transversal formada por cantoneira dupla cruciforme. Nessa tabela também são apresentados os modos de flambagem associados aos comprimentos das colunas interconectadas trabalhando em conjunto.

Tabela 28 – Resumo: distância entre interconexões e modo de flambagem das colunas.

Comprimento da coluna (mm)	Norma/Método	Distância entre interconexões (mm) e modo de flambagem		
		50,8x4,76mm	50,8x6,35mm	50,8x7,93mm
900	EC3 1-1	136,32 (NI)	147,45 (NI)	147,00 (NI)
	AISC	169,52 (NI)	170,40 (NI)	172,54 (NI)
	Numérico	450,00 (T)	300,00 (T)	225,00 (T)
1400	EC3 1-1	136,32 (NI)	147,45 (NI)	147,00 (NI)
	AISC	263,70 (NI)	265,06 (NI)	268,39 (NI)
	Numérico	466,67 (T)	280,00 (T)	233,33 (F)
2200	EC3 1-1	136,32 (NI)	147,45 (NI)	147,00 (NI)
	AISC	414,39 (NI)	416,53 (NI)	421,75 (NI)
	Numérico	314,29 (F)	314,29 (F)	314,29 (F)

F - Flambagem por flexão

T - Flambagem por torção

NI - Modo de flambagem não informado

Com base nas informações contidas na Tabela 28 e nas análises descritas no Capítulo 6, é possível observar que:

- Nas colunas com comprimento de 900mm e 1400mm, a distância entre interconexões (e, conseqüentemente, o número de interconexões) varia de acordo com a seção transversal analisada;
- Para colunas com comprimento de 900mm, o modo de flambagem por torção manifesta-se. Este modo é independente da seção transversal, no caso em que a coluna trabalha de forma conjunta;
- Para colunas com comprimento de 1400mm, o modo de flambagem por torção manifesta-se nas seções 50,8x4,76mm e 50,8x6,35mm. Já na

seção 50,8x7,93mm o modo de flambagem está associado a uma flexão em torno do eixo de menor inércia do conjunto de cantoneiras;

- Nas colunas com comprimento de 2200mm, a distância entre interconexões (e, conseqüentemente, o número de interconexões) não sofre variação (ou sofre variação insignificante, no caso das previsões normativas do EC3 1-1 [6] e do AISC [7]) para diferentes seções transversais;
- Para colunas com comprimento de 2200mm, o modo de flambagem está associado a uma flexão em torno do eixo de menor inércia do conjunto de cantoneiras, independente da seção transversal;
- Tanto o EC3 1-1 [6] quanto o AISC [7] não fazem distinção em relação ao modo de flambagem das colunas cruciformes sob compressão axial, no que tange a determinação da distância máxima entre interconexões;
- Independente do comprimento das colunas, os valores para a distância máxima entre interconexões, previstos pelo EC3 1-1 [6] são idênticos para as mesmas seções transversais;
- Para colunas com comprimento de 900mm os valores referentes às distâncias máximas entre interconexões, previstos tanto pelo EC3 1-1 [6] quanto pelo AISC [7], são relativamente próximos;
- Para colunas com comprimento de 1400mm os valores relativos às distâncias máximas entre interconexões previstos pelo AISC [7] são, em média, cerca de 80% maiores em relação as previstas pelo EC3 1-1 [6];
- Para colunas com comprimento de 2200mm os valores relativos às distâncias máximas entre interconexões previstos pelo AISC [7] são, em média, cerca de 180% maiores do que as previstas pelo EC3 1-1 [6].

7.6 Nova proposta - determinação da distância ótima entre interconexões

Ao analisar os resultados numéricos das distâncias máximas entre interconexões, que garantem o trabalho em conjunto das colunas duplas cruciformes sob compressão, e comparando os mesmos com os valores fornecidos pelas normas EC3 1-1 [6] e AISC [7], surge um questionamento: Qual deve ser a distância entre as interconexões para que as colunas cruciformes formadas por cantoneiras duplas de

abas iguais trabalhem em conjunto, considerando o modo de flambagem que controla seu dimensionamento? Esta pergunta, que tem como origem o fato das normas supracitadas não fornecerem resultados satisfatórios para casos em que o modo de instabilidade destas colunas está associado a torção, levando ao desenvolvimento de uma nova abordagem que será discutida a seguir.

Os resultados das análises numéricas demonstram um padrão de comportamento para colunas duplas cruciformes sob compressão axial à medida que interconexões são adotadas para interligá-las. A partir da inserção de um determinado número de interconexões ocorre uma transição entre os modos de flambagem das colunas, independente da seção transversal ou do seu comprimento.

As análises permitiram uma avaliação do comportamento e estabilidade destas colunas com base nas distâncias entre interconexões adotadas. Estas interconexões devem ser igualmente espaçadas e em quantidade suficiente para que:

- o modo de flambagem do conjunto seja o mesmo modo das partes localizadas entre as interconexões da coluna;
- a carga crítica de flambagem elástica, resistida pelo conjunto, seja também resistida pelas partes localizadas entre as interconexões;
- o valor da esbeltez do conjunto seja maior ou igual ao valor da esbeltez nos trechos localizados entre as interconexões da coluna.

Em função das premissas supracitadas, e tomando como base as curvas de assinatura das colunas, a Teoria de Estabilidade e as propriedades geométricas das seções formadas por cantoneiras simples e duplas (conforme Figura 17 à Figura 19), foi possível desenvolver uma proposta para determinação da distância ótima entre interconexões para colunas duplas cruciformes formadas por cantoneiras de abas iguais. Esta formulação será apresentada a seguir.

7.6.1 Comprimento de transição - coluna dupla totalmente interconectada

Os modos de flambagem possíveis de se manifestarem em colunas duplas cruciformes formadas por cantoneiras de abas iguais, interconectadas em todo seu comprimento (DL - LT) são: torção e flexão global.

A flambagem global por torção ocorre nos comprimentos iniciais das colunas DL - LT e permanece até um determinado comprimento. A partir de tal comprimento, acontece uma transição no modo de flambagem da coluna. A instabilidade passa a se manifestar por meio da flexão global em torno do eixo de menor inércia da seção transversal do conjunto. Como exemplo, a Figura 75 mostra a curva de assinatura para a coluna DL - 50,8x4,76 - LT. Cabe destacar o local (comprimento aproximado de 2000mm) onde ocorre a transição entre os modos de flambagem.

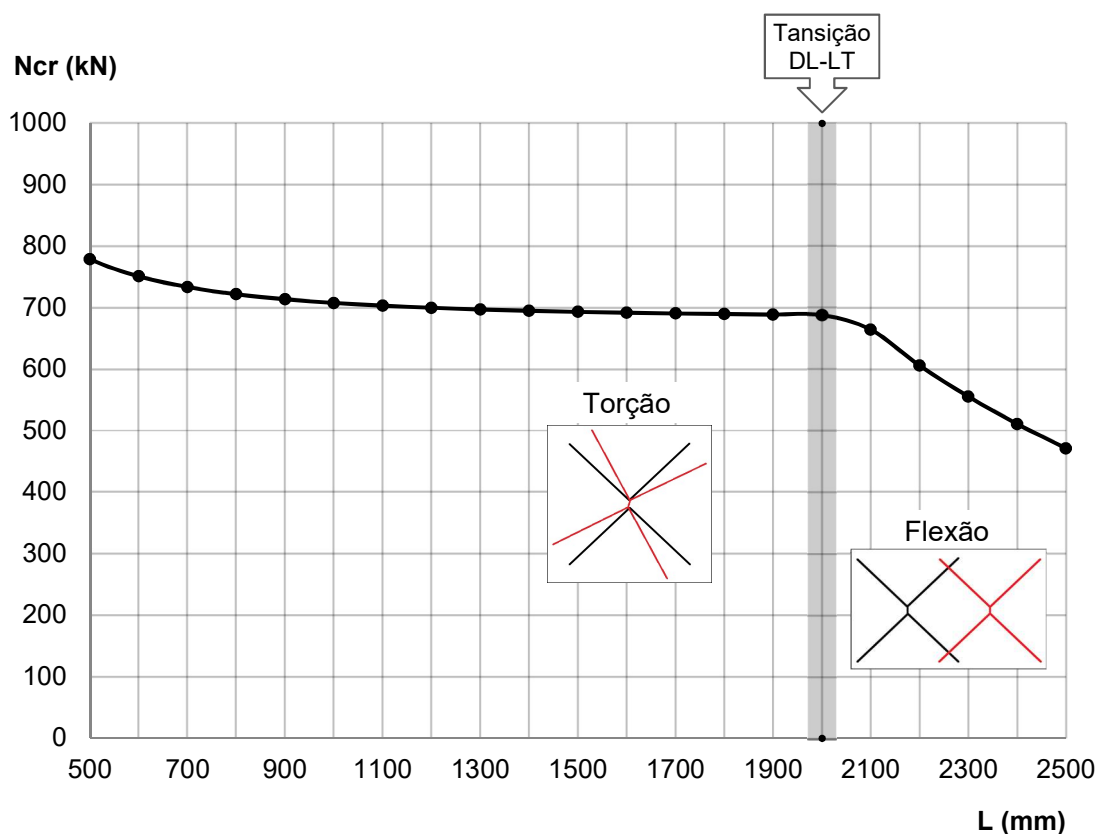


Figura 75 – Comprimento de transição e modos de flambagem: cantoneira dupla cruciforme com seção 50,8x4,76mm interconectada em todo seu comprimento.

Observando a curva de assinatura, quando o comprimento de transição é atingido, a carga crítica de flambagem elástica (N_{cr}) tende a ocorrer pelos modos globais tanto de torção ($N_{cr,T}$) quanto flexão ($N_{cr,F}$). Sendo assim, no limite da mudança é possível escrever a equação (23).

$$N_{cr,T} = N_{cr,F} \rightarrow \frac{1}{r_0^2} \left[G J + \frac{\pi^2 E C_w}{(k L)^2} \right] = \frac{\pi^2 E I}{(k L)^2} \quad (23)$$

Desenvolvendo a equação (23) e isolando o termo referente ao comprimento da coluna (L), obtém-se a equação (24), cujo resultado é o comprimento de transição entre os modos de flambagem para a coluna dupla cruciforme totalmente interconectada.

$$L_{\text{trans (DL-LT)}} = \frac{\pi}{k} \sqrt{\frac{b_{\text{eff}}^2 (1 + \nu) (6 r_{u,c}^2 - t^2)}{3 t^2}} \quad (24)$$

Onde:

$L_{\text{trans (DL-LT)}}$ - comprimento de transição entre os modos de flambagem (DL - LT);

k - coeficiente de flambagem da coluna;

ν - coeficiente de Poisson;

$r_{u,c}$ - raio de giração da seção em torno do eixo u (conjunto);

t - espessura da aba da cantoneira;

b_{eff} - comprimento efetivo da aba da cantoneira $\rightarrow b_{\text{eff}} = b - t/2$;

b - comprimento da aba da cantoneira.

Conforme mostrado na Figura 22, para a seção cruciforme com interconexão em todo seu comprimento, o eixo de menor inércia da seção transversal é o eixo u .

7.6.2 Comprimento de transição - coluna dupla sem interconexão

Assim como ocorre nas colunas DL - LT, os modos de flambagem possíveis de se manifestarem em colunas com seção transversal formada por cantoneira dupla de abas iguais sem interconexão (DL - 0L) são: flexo-torção e flexão global.

A flambagem por flexo-torção ocorre nos comprimentos iniciais das colunas DL-0L e permanece até um determinado comprimento. A partir de tal comprimento, acontece uma transição no modo de flambagem da referida coluna. A instabilidade passa a ser controlada pela flexão global em torno do eixo de menor inércia da seção transversal individual. Como exemplo, a Figura 76 mostra a curva de assinatura para a coluna DL - 50,8x4,76 - 0L. Cabe destacar o local (comprimento aproximado de 1000mm) onde ocorre a transição entre os modos de flambagem.

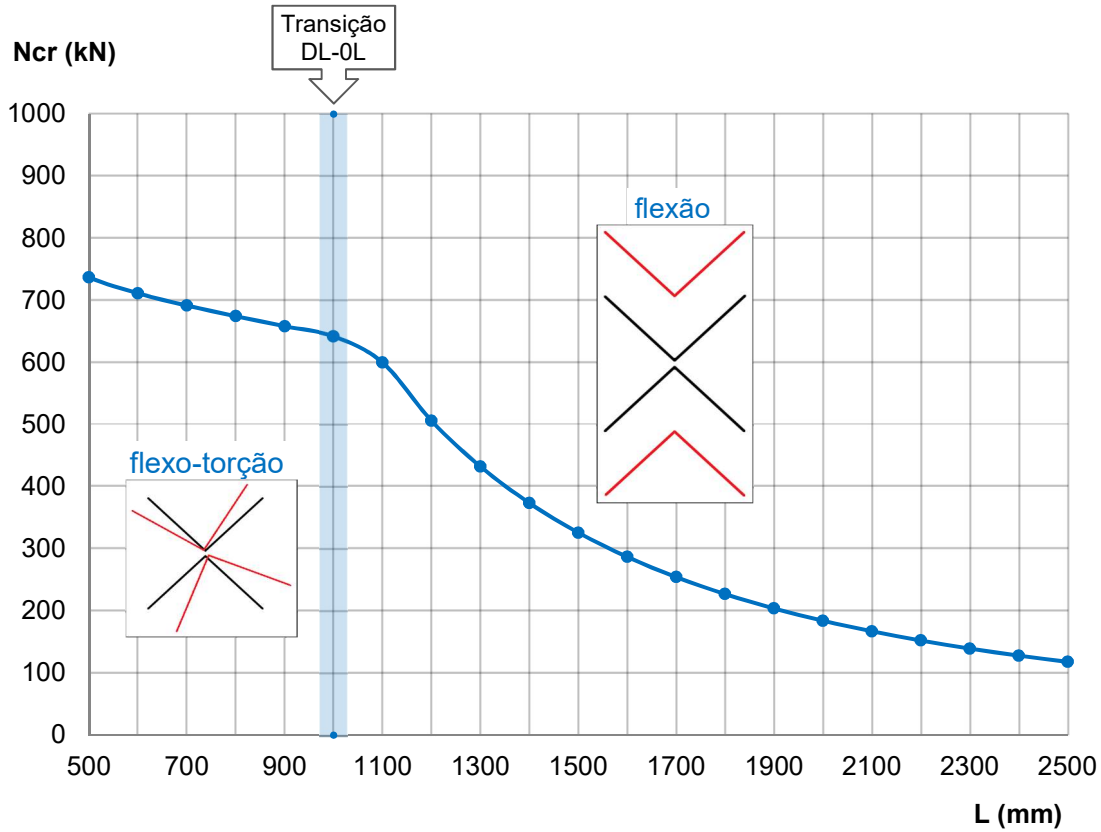


Figura 76 – Comprimento de transição e modos de flambagem: cantoneira dupla sem interconexão com seção 50,8x4,76mm.

Observando a curva de assinatura, quando o comprimento de transição é atingido, a carga crítica de flambagem elástica (N_{cr}) tende a ocorrer tanto pelo modo de flexo-torção ($N_{cr,FT}$) quanto pelo modo de flexão ($N_{cr,F}$). Sendo assim, no limite da mudança é possível escrever a equação (25).

$$N_{cr,FT} = N_{cr,F} \rightarrow \frac{1}{2\beta} \left[N_{cr,T} + N_{cr,Fu} - \sqrt{(N_{cr,T} + N_{cr,Fu})^2 - 4\beta N_{cr,T} N_{cr,Fu}} \right] = \frac{\pi^2 E I}{(k L)^2} \quad (25)$$

Desenvolvendo a equação (25) e isolando o termo referente ao comprimento da coluna (L), chega-se à equação (26), cujo resultado é o comprimento de transição entre os modos de flambagem para a coluna dupla cruciforme sem interconexão.

$$L_{trans (DL-0L)} = \frac{\pi}{k} \sqrt{\frac{b_{eff}^2 (1 + \nu) [6 r_v^2 (\beta r_v^2 - r_u^2) + t^2 (r_u^2 - r_v^2)]}{3 t^2 (r_v^2 - r_u^2)}} \quad (26)$$

Onde:

L_{trans} (DL-0L) - comprimento de transição entre os modos de flambagem (DL - 0L);

k - coeficiente de flambagem da coluna;

ν - coeficiente de Poisson;

r_u - raio de giração da seção em torno do eixo u (cantoneira simples);

r_v - raio de giração da seção em torno do eixo v (cantoneira simples);

t - espessura da aba da cantoneira;

b_{eff} - comprimento efetivo da aba da cantoneira $\rightarrow b_{eff} = b - t/2$;

b - comprimento da aba da cantoneira;

β - coeficiente dado por : $\beta = 1 - \left(\frac{u_{G0}}{r_0}\right)^2$;

r_0 - raio de giração polar da seção em relação ao CS (cantoneira simples);

u_{G0} - distância entre o CG e o CS da seção (cantoneira simples).

As propriedades geométricas descritas acima são referentes à seção transversal de uma cantoneira simples. Os eixos principais de inércia (eixos u e v) da seção transversal formada por cantoneira simples de abas iguais, apontados na equação (26), estão descritos na Figura 17.

7.6.3 Comparação dos comprimentos de transição das colunas

Após determinar o comprimento de transição, tanto da coluna DL - LT quanto da coluna DL - 0L, compara-se o comprimento da coluna a ser analisada com os comprimentos de transição. Com isso é possível estabelecer qual modo de flambagem irá ocorrer.

De uma forma geral, a mudança que ocorre no comportamento das colunas duplas cruciformes, por meio da introdução de interconexões entre as mesmas, pode ser resumida conforme descrito na Figura 77 e na Tabela 29.

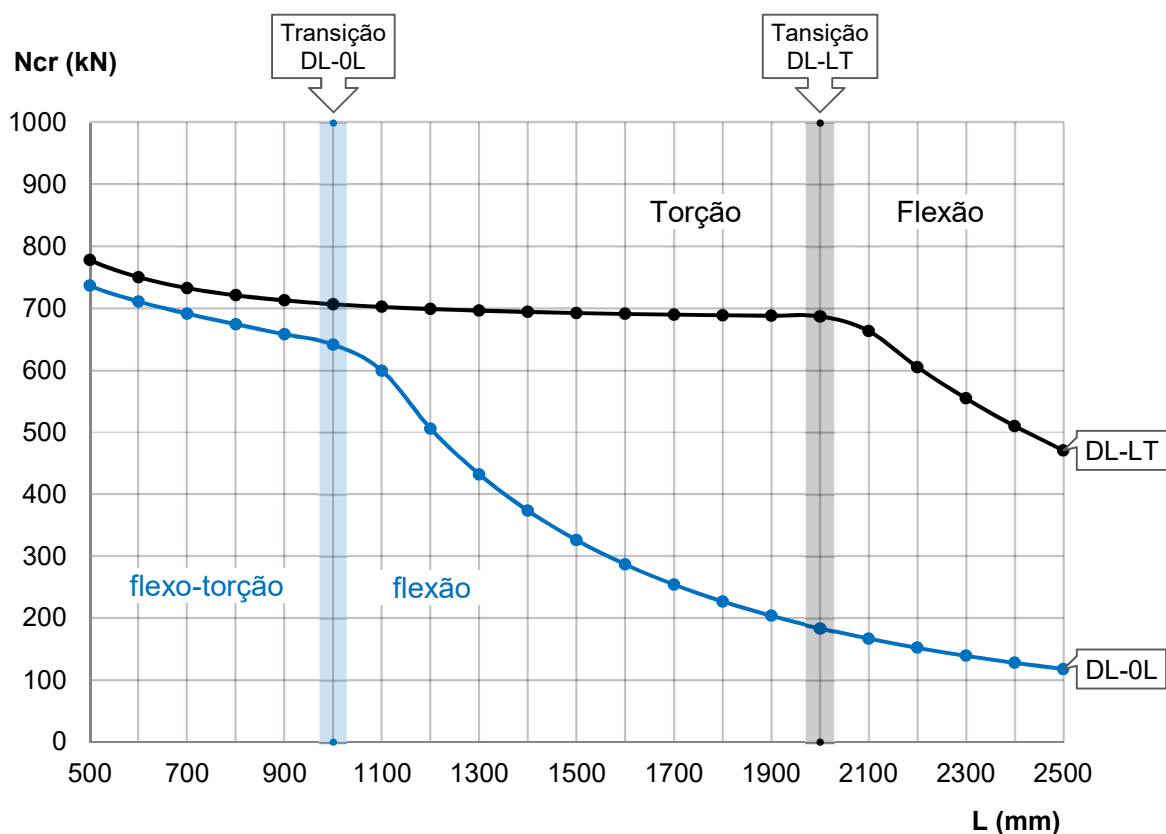


Figura 77 – Comprimento de transição e modos de flambagem: colunas com seção transversal DL - LT e DL - OL.

Tabela 29 – Mudança de comportamento das colunas duplas cruciformes.

Colunas	Modos de flambagem		
DL - OL	ft	f	f
DL - LT	T	T	F
Inserindo "n" interconexões	↓		
Transição no modo de flambagem	ft → T	f → T	f → F

ft - flexo-torção na coluna dupla cruciforme sem interconexão (DL - OL)

f - flexão na coluna dupla cruciforme sem interconexão (DL - OL)

T - torção na coluna dupla cruciforme totalmente interconectada (DL - LT)

F - Flexão na coluna dupla cruciforme totalmente interconectada (DL - LT)

Sendo assim, ao comparar o comprimento da coluna a ser analisada com os comprimentos de transição, tanto da coluna DL - OL quanto da coluna DL - LT, é possível escrever expressões para determinar a distância ótima entre as interconexões que garantem o trabalho em conjunto da coluna dupla cruciforme.

7.6.4 Processo para determinação da distância ótima entre interconexões

Com base tanto na Figura 77 quanto na Tabela 29, o caso a ser utilizado no cálculo da distância entre interconexões de colunas duplas cruciformes sob compressão axial, deve ser enquadrado em uma das seguintes situações:

- Se $L < L_{trans} (DL - 0L) \rightarrow$ Caso 1;
- Se $L_{trans} (DL - 0L) \leq L \leq L_{trans} (DL - LT) \rightarrow$ Caso 2;
- Se $L > L_{trans} (DL - LT) \rightarrow$ Caso 3.

Os três casos supracitados são analisados e discutidos nos próximos subitens.

7.6.4.1 Caso 1: flexo-torção (DL - 0L) $\rightarrow$ Torção (DL - LT)

A particularidade inerente ao modo de flambagem por flexo-torção, cuja flexão em torno do eixo de maior inércia e a torção ocorrem de forma simultânea, não permite desacoplar os dois fenômenos. Sendo assim, para comprimentos de coluna, cuja mudança de comportamento ocorre conforme descrito no diagrama da Figura 78, duas condições devem ser observadas, sendo elas:

- o modo de flambagem do conjunto deve ser o mesmo modo de flambagem das partes localizadas entre as interconexões da coluna;
- a carga crítica de flambagem elástica, resistida pelo conjunto, deve ser a mesma carga de flambagem elástica resistida pelas partes localizadas entre as interconexões.

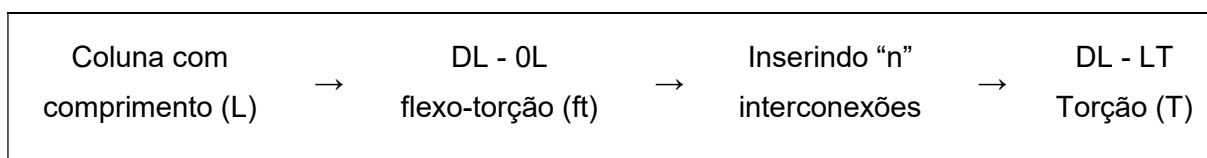


Figura 78 – Coluna dupla cruciforme: diagrama de transição entre o comportamento individual (ft) para o comportamento em conjunto (T).

Levando em consideração tanto o diagrama descrito na Figura 78 quanto as condições citadas, é possível escrever a equação (27).

$$N_{cr,ft} = N_{cr,T} \rightarrow \frac{1}{2\beta} \left[N_{cr,T} + N_{cr,Fu} - \sqrt{(N_{cr,T} + N_{cr,Fu})^2 - 4\beta N_{cr,T} N_{cr,Fu}} \right] = \frac{1}{r_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(kL)^2} \right] \quad (27)$$

Conforme citado nos itens 2.2 e 2.3, as cantoneiras de abas iguais possuem seção transversal aberta, conferindo às mesmas uma constante de empenamento com valor aproximadamente nulo ($C_w \approx 0$). Sendo assim, com o intuito de reduzir a complexidade dos cálculos, a parcela referente ao empenamento foi desconsiderada no cálculo da carga crítica de flambagem elástica no modo torsional. Desenvolvendo a equação (27), a distância máxima entre interconexões pode ser calculada por meio da equação (28).

$$a_{ft \rightarrow T} = \frac{\pi}{k} \frac{r_{0,c} r_u}{t} \sqrt{\frac{6(1+u)(r_{0,c}^2 - r_0^2)}{(r_{0,c}^2 - \beta r_0^2)}} \leq \frac{L}{2} \quad (28)$$

Onde:

$a_{ft \rightarrow T}$ - distância ótima entre interconexões - caso 1 (flexo-torção $\rightarrow$ torção);

k - coeficiente de flambagem do trecho da coluna entre interconexões;

$r_{0,c}$ - raio de giração polar da seção em relação ao CS (conjunto);

r_0 - raio de giração polar da seção em relação ao CS (cantoneira simples);

r_u - raio de giração da seção em torno do eixo u (cantoneira simples);

t - espessura da aba da cantoneira;

β - coeficiente dado por : $\beta = 1 - \left(\frac{u_{G0}}{r_0} \right)^2$;

u - coeficiente de Poisson;

u_{G0} - distância entre o CG e o CS da seção (cantoneira simples);

L - comprimento da coluna.

A distância ($a_{ft \rightarrow T}$) entre interconexões é a distância que impossibilita a ocorrência da flambagem por flexo-torção. Mais do que isso, a distância ($a_{ft \rightarrow T}$) calculada faz com que o comportamento da coluna passe de individual para o comportamento em conjunto.

7.6.4.2 Caso 2: flexão (DL - 0L) $\rightarrow$ Torção (DL - LT)

Para comprimentos de coluna, cuja mudança de comportamento ocorre conforme descrito no diagrama da Figura 79, duas condições devem ser satisfeitas, sendo elas:

- o modo de flambagem do conjunto deve ser o mesmo modo de flambagem das partes localizadas entre as interconexões da coluna; e
- a carga crítica de flambagem elástica, resistida pelo conjunto, deve ser a mesma carga de flambagem elástica resistida pelos segmentos entre as interconexões.

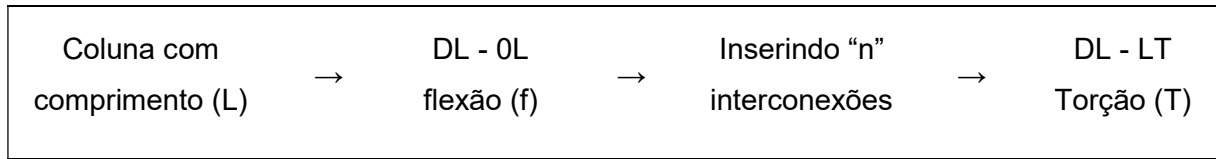


Figura 79 – Coluna dupla cruciforme: diagrama de transição entre o comportamento individual (f) para o comportamento em conjunto (T).

Com base no diagrama da Figura 79, nas condições citadas acima e nas análises dos resultados numéricos, é possível escrever a equação (29).

$$N_{cr,f} = N_{cr,T} \rightarrow \frac{\pi^2 E I}{(k L)^2} = \frac{1}{r_0^2} \left[G J + \frac{\pi^2 E C_w}{(k L)^2} \right] \quad (29)$$

Desenvolvendo a equação (29) e isolando o termo referente a distância entre interconexões (a), obtém-se a equação (30).

$$a_{f \rightarrow T} = \frac{\pi r_v (k_c L) b_{eff}}{k} \sqrt{\frac{3 (1 + u)}{3 (k_c L)^2 + (\pi b_{eff})^2 (1 + u)}} \quad (30)$$

Onde:

$a_{f \rightarrow T}$ - distância ótima entre interconexões - caso 2 (flexão → torção);

k - coeficiente de flambagem do trecho da coluna entre interconexões;

r_v - raio de giração da seção em torno do eixo v (cantoneira simples);

k_c - coeficiente de flambagem da coluna (conjunto);

L - comprimento da coluna;

b_{eff} - comprimento efetivo da aba da cantoneira → $b_{eff} = b - t/2$;

b - comprimento da aba da cantoneira;

t - espessura da aba da cantoneira;

u - coeficiente de Poisson.

A distância ($a_{f \rightarrow T}$) é a distância entre interconexões que modifica o comportamento individual da coluna para o comportamento em conjunto. Neste caso ao inserir “n” interconexões a uma distância máxima de ($a_{f \rightarrow T}$) igualmente espaçadas, a coluna tende a apresentar um comportamento de coluna cruciforme.

7.6.4.3 Caso 3: flexão (DL - 0L) $\rightarrow$ Flexão (DL - LT)

Neste caso, para comprimentos de coluna, cuja mudança de comportamento ocorra conforme descrito no diagrama da Figura 80, duas condições devem ser satisfeitas, sendo elas:

- o modo de flambagem do conjunto deve ser o mesmo modo de flambagem das partes localizadas entre as interconexões da coluna; e
- o valor da esbeltez da seção da coluna trabalhando de forma individual, localizada entre as interconexões da coluna, deve ser menor ou igual a metade do valor da esbeltez da seção da coluna trabalhando em conjunto.

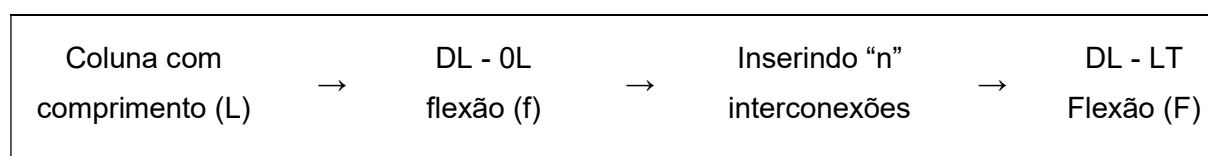


Figura 80 – Coluna dupla cruciforme: diagrama de transição entre o comportamento individual (f) para o comportamento em conjunto (F).

Baseado no diagrama da Figura 80, nas condições citadas acima e nas análises dos resultados numéricos, é possível escrever a equação (31).

$$\frac{k a}{r_v} \leq 0,5 \frac{k_c L}{r_{u,c}} \quad (31)$$

Desenvolvendo a equação (31) e isolando o termo referente a distância entre interconexões (a), tem-se a equação (32).

$$a_{f \rightarrow F} = \frac{(k_c L)}{k} \frac{r_v}{2 r_{u,c}} \quad (32)$$

Onde:

$a_{f \rightarrow F}$ - distância ótima entre interconexões - caso 3 (flexão $\rightarrow$ flexão);

k - coeficiente de flambagem do trecho da coluna entre interconexões;

r_v - raio de giração da seção em torno do eixo v ;

k_c - coeficiente de flambagem da coluna (conjunto);

L - comprimento da coluna;

$r_{u,c}$ - raio de giração da seção em torno do eixo u (conjunto).

As interconexões, inseridas a uma distância ($a_{f \rightarrow F}$) entre elas promoverão o trabalho em conjunto da coluna dupla cruciforme sob compressão axial.

7.7 Comparação dos resultados

A Tabela 30 mostra um resumo dos valores referentes às distâncias máximas entre interconexões quando calculados pelo do EC3 1-1 [6], AISC [7], método numérico e a distância ótima determinada pelo método proposto.

Tabela 30 – Resumo dos valores relativos às distâncias entre interconexões.

Comprimento da coluna (mm)	Norma/Método	Distância máxima entre interconexões (mm)		
		50,8x4,76mm	50,8x6,35mm	50,8x7,93mm
900	EC3 1-1	136,32	147,45	147,00
	AISC	169,52	170,40	172,54
	Numérico	450,00	300,00	225,00
	Proposto	512,06	258,00	202,70
1400	EC3 1-1	136,32	147,45	147,00
	AISC	263,70	265,06	268,39
	Numérico	466,67	280,00	233,33
	Proposto	356,37	261,53	178,93
2200	EC3 1-1	136,32	147,45	147,00
	AISC	414,39	416,53	421,75
	Numérico	314,29	314,29	314,29
	Proposto	276,26	277,68	281,17

Na Tabela 31 são apresentadas as taxas de variação das distâncias máximas entre interconexões obtidas tanto do EC3 1-1 [6] quanto do AISC [7] em relação aos valores obtidos pelo método proposto para o cálculo da distância ótima. São apresentados, também, a taxa de variação média e o desvio padrão.

Tabela 31 – Taxa de variação (EC3 1-1 / Proposto) e (AISC / Proposto), taxa de variação média e desvio padrão.

Comprimento da coluna (mm)	Norma/Método	Distância máxima entre interconexões		
		50,8x4,76mm	50,8x6,35mm	50,8x7,93mm
900	EC3 1-1 (mm)	136,32	147,45	147,00
	AISC (mm)	169,52	170,40	172,54
	Proposto (mm)	512,06	258,00	202,70
	Variação (EC3 1-1 / Proposto)	0,73	0,43	0,27
	Variação (AISC / Proposto)	0,67	0,34	0,15
	Variação Média	0,70	0,38	0,21
	Desvio Padrão (mm)	508,44	141,05	63,34
1400	EC3 1-1 (mm)	136,32	147,45	147,00
	AISC (mm)	263,70	265,06	268,39
	Proposto (mm)	356,37	261,53	178,93
	Variação (EC3 1-1 / Proposto)	0,62	0,44	0,18
	Variação (AISC / Proposto)	0,26	0,01	0,50
	Variação Média	0,44	0,22	0,34
	Desvio Padrão (mm)	238,77	114,13	94,99
2200	EC3 1-1 (mm)	136,32	147,45	147,00
	AISC (mm)	414,39	416,53	421,75
	Proposto (mm)	276,26	277,68	281,17
	Variação (EC3 1-1 / Proposto)	0,51	0,47	0,48
	Variação (AISC / Proposto)	0,50	0,50	0,50
	Variação Média	0,50	0,48	0,49
	Desvio Padrão (mm)	196,63	190,37	194,33

Já na Tabela 32 são apresentadas as taxas de variação das distâncias máximas entre interconexões obtidas tanto do EC3 1-1 [6] quanto do AISC [7] em relação aos valores obtidos por meio das análises numéricas. São apresentados, também, a taxa de variação média e o desvio padrão.

Tabela 32 – Taxa de variação (EC3 1-1 / Numérico) e (AISC / Numérico), taxa de variação média e desvio padrão.

Comprimento da coluna (mm)	Norma/Método	Distância máxima entre interconexões		
		50,8x4,76mm	50,8x6,35mm	50,8x7,93mm
900	EC3 1-1 (mm)	136,32	147,45	147,00
	AISC (mm)	169,52	170,40	172,54
	Numérico (mm)	450,00	300,00	225,00
	Variação (EC3 1-1 / Numérico)	0,70	0,51	0,35
	Variação (AISC / Numérico)	0,62	0,43	0,23
	Variação Média	0,66	0,47	0,29
	Desvio Padrão (mm)	420,79	200,17	94,00
1400	EC3 1-1 (mm)	136,32	147,45	147,00
	AISC (mm)	263,70	265,06	268,39
	Numérico (mm)	466,67	280,00	233,33
	Variação (EC3 1-1 / Numérico)	0,71	0,47	0,37
	Variação (AISC / Numérico)	0,43	0,05	0,15
	Variação Média	0,57	0,26	0,26
	Desvio Padrão (mm)	387,72	133,39	93,18
2200	EC3 1-1 (mm)	136,32	147,45	147,00
	AISC (mm)	414,39	416,53	421,75
	Numérico (mm)	314,29	314,29	314,29
	Variação (EC3 1-1 / Numérico)	0,57	0,53	0,53
	Variação (AISC / Numérico)	0,32	0,33	0,34
	Variação Média	0,44	0,43	0,44
	Desvio Padrão (mm)	204,19	195,67	198,83

7.8 Fluxograma - Determinação da distância ótima entre interconexões

A Figura 81 apresenta um fluxograma do processo relativo à determinação da distância ótima entre interconexões para colunas cruciformes com seção transversal formada por cantoneiras duplas de abas iguais, sob compressão axial.

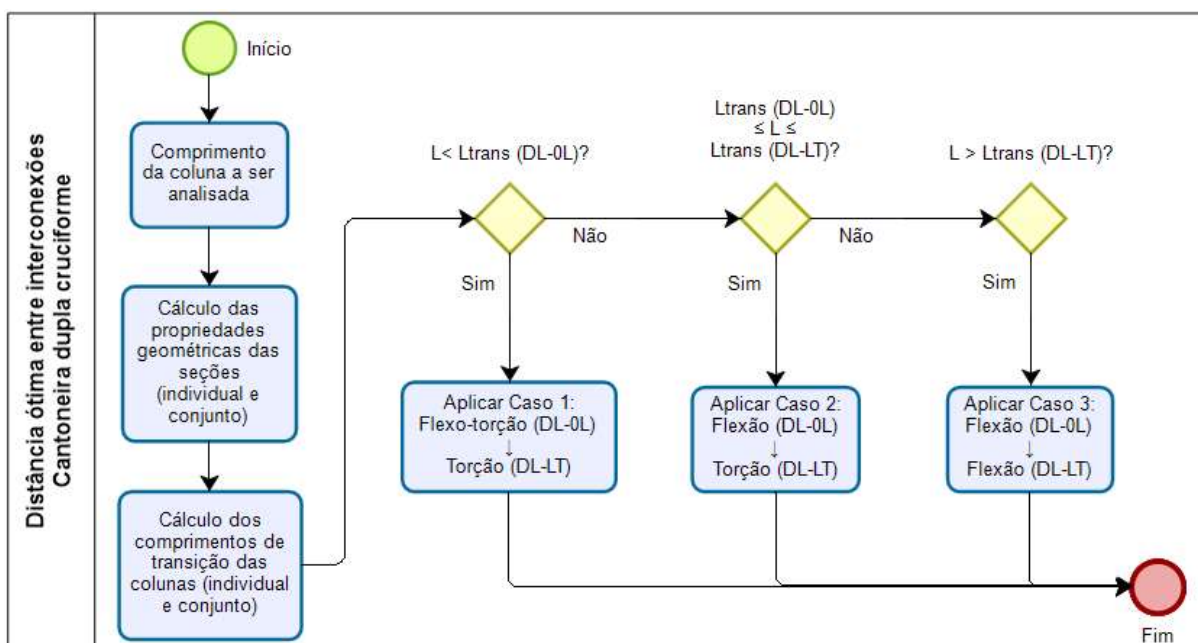


Figura 81 – Fluxograma para a determinação da distância ótima entre interconexões em colunas formadas por cantoneiras duplas cruciformes.

De acordo com o fluxograma da Figura 81, para a determinação da distância ótima entre interconexões são necessários:

- O comprimento da coluna a ser analisada;
- O cálculo das propriedades geométricas das seções transversais (individual e do conjunto);
- O cálculo dos comprimentos de transição (individual e do conjunto);
- Comparar e enquadrar o comprimento da coluna a ser analisa em um dos três casos relativos à determinação da distância ótima entre interconexões.

Sendo assim, com base no que foi exposto neste item, é possível determinar a distância ótima entre interconexões, considerando o modo de instabilidade da coluna dupla cruciforme, formada por cantoneiras de abas iguais, sob compressão axial.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 Introdução

A utilização do aço inoxidável vem se tornando cada vez mais comum devido ao seu amplo espectro de aplicação. Do ponto de vista construtivo, os aços inoxidáveis aliam elevada resistência mecânica com baixa necessidade de manutenção, o que os tornam interessantes economicamente. São fabricados por meio de diversas técnicas de engenharia e são totalmente recicláveis no final do seu ciclo de utilização.

No trabalho em tela, foram avaliados o comportamento de colunas duplas cruciformes formadas por cantoneiras de abas iguais interconectadas, constituídas por aço inoxidável austenítico 304, sob compressão axial.

Em se tratando de estabilidade estrutural, as cantoneiras de abas iguais apresentam um comportamento peculiar. Apesar de possuir uma geometria relativamente simples, o estudo do fenômeno da flambagem em cantoneiras é relativamente complexo devido aos modos a que estão suscetíveis. Consequentemente, ao combinar duas cantoneiras de abas iguais em uma seção cruciforme e promover a interconexão entre ambas por meio de soldas, tal complexidade se eleva ainda mais.

Sendo assim, em virtude da complexidade do assunto abordado e para dar embasamento teórico a este trabalho, buscou-se referências em trabalhos anteriores. Entretanto, quando se trata de cantoneiras duplas em seção cruciforme, especialmente quando constituídas em aço inoxidável, a quantidade de estudos realizados é escassa.

Com relação ao programa previsto para esta dissertação, no planejamento inicial deste trabalho, estavam previstos a realização da investigação experimental e a análise numérica das colunas. Porém, por conta da COVID-19, a investigação experimental (caracterização do aço inoxidável austenítico 304, a medição das imperfeições geométricas iniciais e a execução dos ensaios à compressão) que seria realizada no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), não pode ser realizada. Esta investigação foi então direcionada a uma avaliação numérica do comportamento das colunas duplas cruciformes

interconectadas. Inicialmente foram validados os modelos numéricos com resultados experimentais disponíveis seguido de uma ampliação do escopo das análises numéricas centrada em diferentes comprimentos e seções transversais.

As dimensões das seções transversais e os comprimentos das colunas utilizados neste trabalho, foram escolhidos com base em estudos de estabilidade elástica realizadas com auxílio do GBTul [34]. Foram eleitas três dimensões para as seções transversais (50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm e 50,8x7,93mm) e três comprimentos para as colunas (900mm, 1400mm e 2200mm). As propriedades do aço inoxidável austenítico 304, necessárias para modelagem numérica, foram retiradas do trabalho de Sarquis [35].

Em seguida deu-se início a modelagem e análise numérica das colunas. Tanto a concepção dos modelos numéricos quanto as análises foram feitas com o auxílio do ANSYS [36], cuja base teórica é o método dos elementos finitos. As seções transversais e o comprimento das colunas foram modelados com parâmetros variáveis por meio do recurso de script APDL (ANSYS Parametric Design Language) do ANSYS [36].

A partir dos modelos numéricos, foram realizadas análises de flambagem elástica das colunas e, com os resultados obtidos, construiu-se as curvas de assinatura, cujos gráficos contemplavam colunas com seções transversais formadas tanto por cantoneiras simples quanto cantoneiras duplas cruciformes (com e sem interconexões) com dimensões de 50,8x4,76mm, 50,8x6,35mm e 50,8x7,93mm. Todas as curvas de assinatura foram elaboradas para colunas com comprimentos variando de 500mm até 2500mm. As curvas de assinatura forneceram informações importantes com relação às cargas críticas de flambagem elástica, aos modos de flambagem das colunas e o comprimento da coluna onde ocorre a transição entre os modos de flambagem.

Com base nos modos de flambagem das colunas, foram introduzidas as imperfeições geométricas iniciais nas colunas e realizada as análises não lineares das mesmas. Com os resultados obtidos foi possível avaliar a carga máxima resistente das colunas bem como o modo de flambagem das mesmas.

De posse dos resultados obtidos nas análises numéricas, foi possível observar o comportamento das colunas frente a introdução de interconexões entre as cantoneiras duplas. Além do aumento da capacidade resistente da coluna, o modo de

flambagem ao qual a coluna esta suscetível, influenciou na determinação da distância entre interconexões necessárias para promover o trabalho em conjunto da coluna.

Ao comparar os resultados obtidos com as prescrições normativas, tanto do EC3 1-1 [6] quanto do AISC [7], foi possível observar que alguns valores normativos previstos são demasiadamente conservadores. Além disso, ambas as normas não apontam para a influência do modo de flambagem das colunas no que se refere a distância máxima entre as interconexões.

Ao final deste trabalho foi proposta uma metodologia para determinar a distância ótima entre as interconexões das colunas duplas cruciformes com seção transversal formada por cantoneiras de abas iguais, com base nos modos de flambagem das colunas sem interconexão e com interconexão em todo seu comprimento.

8.2 Principais contribuições do presente trabalho

Pode-se ressaltar que a presente dissertação contribui para o desenvolvimento de pesquisas acadêmicas da seguinte maneira:

- Ampliar o número de trabalhos abordando o comportamento estrutural de colunas duplas cruciformes em aço inoxidável austenítico 304, formadas por cantoneiras duplas de abas iguais interconectadas, sob compressão;
- Identificação e análise das curvas de assinatura para colunas duplas cruciformes com e sem interconexões (de uma a sete interconexões introduzidas nas colunas);
- Avaliação da distância entre interconexões que promove o trabalho em conjunto de colunas duplas cruciformes formadas por cantoneiras duplas de abas iguais interconectadas, sob compressão otimizando, desta forma, o seu dimensionamento;
- Desenvolvimento de relações entre os modos de flambagem e o comportamento em conjunto de colunas duplas cruciformes engastadas, formadas por cantoneiras duplas de abas iguais interconectadas sob compressão axial;

- Efetuou-se uma comparação entre os as distâncias máximas entre interconexões, previstas tanto pelo EC3 1-1 [6] quanto pelo AISC [7], com os valores fornecidos pelas análises numéricas;
- Proposta de uma metodologia para a determinação da distância ótima entre interconexões de colunas duplas cruciformes com base nos modos de flambagem das mesmas;
- Por fim, comparou-se os valores das distâncias máximas entre interconexões, fornecidos pelo EC3 1-1 [6], pelo AISC [7] e pelas análises numéricas com os valores fornecidos pela metodologia de cálculo proposta neste trabalho.

8.3 Conclusões

As análises numéricas das colunas duplas cruciformes, modeladas neste trabalho, apontaram interessantes interrelações entre os modos de flambagem e a distância entre interconexões das referidas colunas.

Com base nas curvas de assinatura, foi possível observar que, a partir de um determinado número de interconexões, as colunas duplas cruciformes, formadas por cantoneiras duplas de abas iguais, passam a apresentar um comportamento muito semelhante ao comportamento de colunas com seções cruciformes, tanto em relação aos modos de flambagem quanto as cargas críticas e máximas resistentes.

Para colunas com comprimento de 900mm, o modo de flambagem das mesmas, trabalhando de forma individual, passou de flexo-torção global (seção transversal 50,8x4,76mm - relação $b/t = 10,67$) ou flexão global em torno do eixo de menor inércia (seções transversais de 50,8x6,35mm - relação $b/t = 8,00$ e 50,8x7,93mm - relação $b/t = 6,41$) para o comportamento de coluna trabalhando em conjunto pelo modo global de torção.

Para colunas com comprimento de 1400mm, o modo de flambagem das mesmas, trabalhando de forma individual, passou de flexão global em torno do eixo de menor inércia (seção transversal 50,8x4,76mm - relação $b/t = 10,67$ e 50,8x6,35mm - relação $b/t = 8,00$) para o comportamento de coluna trabalhando em conjunto pelo modo global de torção. Já para coluna com seção transversal de 50,8x7,93mm - relação $b/t = 6,41$, o modo de flambagem passou de flexão global em torno do eixo de

menor inércia, de forma individual, para flexão global em torno do eixo de menor inércia do conjunto assim que a quantidade de interconexões inseridas garantiu o trabalho em conjunto da coluna.

Em relação as colunas com comprimento de 2200mm, o modo de flambagem das mesmas, trabalhando de forma individual, passou de flexão global em torno do eixo de menor inércia (para as três seções transversais) para flexão global em torno do eixo de menor inércia do conjunto assim que a quantidade de interconexões introduzidas promoveu o trabalho em conjunto da coluna.

Em relação a distância máxima entre interconexões, necessárias para que a coluna seja analisada de forma conjunta, baseado nos resultados obtidos por meio das análises numéricas e comparando-os com os valores previstos pelo EC3 1-1 [6] e pelo AISC [7], foi possível observar que alguns valores previstos pelas normas são demasiadamente conservadores e não apontam para a influência do modo de flambagem das colunas no que se refere ao cálculo da distância máxima entre as interconexões.

Ainda com base nos resultados numéricos, foi observada a necessidade de considerar o modo de flambagem, tanto da coluna trabalhando de forma individual quanto da coluna trabalhando em conjunto, no cálculo da distância máxima entre as interconexões.

Foram realizadas análises das curvas de assinatura das seções avaliadas neste trabalho e proposta uma metodologia para o cálculo das distâncias supracitadas. Tal metodologia visa garantir o trabalho em conjunto das colunas duplas cruciformes sob compressão axial.

Para tanto, foi necessário dividir esta metodologia de cálculo em três etapas, cuja base reside nos modos de flambagem tanto das colunas duplas sem interconexões quanto das colunas totalmente interconectadas. Foram propostas fórmulas para o cálculo das distâncias máximas entre interconexões baseadas nas propriedades geométricas, no comprimento de transição entre os modos de flambagem da seção transversal e no comprimento da coluna a ser analisada.

Os resultados relativos as distâncias máximas entre interconexões, fornecidos pelo método proposto, apresentaram valores próximos aos obtidos por meio das análises numéricas.

8.4 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar ensaios experimentais com o objetivo de avaliar o real comportamento das colunas duplas cruciformes formadas por cantoneiras de abas iguais interconectadas e calibrar os modelos numéricos;
- Com base nos modelos numéricos calibrados, expandir as análises para diferentes comprimentos e dimensões de seções transversais;
- Ampliar o estudo em tela considerando outras condições de apoios;
- Investigar o comportamento de colunas duplas cruciformes com outros tipos de interconexões;
- Investigar outras combinações de seções formadas por cantoneiras (seções “T” por exemplo);
- Investigar o comportamento de colunas duplas cruciformes com outros tipos de aços inoxidáveis.

REFERÊNCIAS

- [1] Instituto Aço Brasil, “A História do Aço,” [Online]. Available: http://www.acobrasil.org.br/site2015/noticia_interna.asp?id=14076. [Acesso em 21 Junho 2020].
- [2] Instituto Aço Brasil, “A Siderurgia em Números,” Instituto Aço Brasil, Rio de Janeiro, 2021.
- [3] Arcelor Mittal Inox Brasil, Aços Inoxidáveis: aplicações e especificação. São Paulo: Arcelor Mittal Inox Brasil, 2008.
- [4] CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista. Manual de Dimensionamento de Estruturas em Aço Inoxidável. Coimbra: CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, pp. 3-37, 2017.
- [5] Davison, B., Owens G. W., Steel Designers’ Manual - 7th edition. Wiley-Blackwel, p. 495, 2012.
- [6] EUROCODE 3, EN 1993 - 1-1: 2003. Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN - European Committee for Standardization, Brussels.
- [7] American Institute of Steel Construction - AISC. Steel Construction Manual - 13th edition. Chicago: AISC, 2005.
- [8] Reis, A., Camotim, D., Estabilidade Estrutural. Portugal: McGraw-Hill, pp. 1-37, 2000.
- [9] Souza, Y. P., Ferreira, W. G., Ferreira, L. D., Gonçalves, V. F., Camargo, R. S., Neto, A. B., Lecchi, L. B., Introdução à teoria da estabilidade elástica - 3º edição. Vitória: LBF, pp. 7-15, 2018.
- [10] EUROCODE 3, EN 1993 - 1-6: 2006. Design of steel structures - Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures. CEN - European Committee for Standardization, Brussels.
- [11] Vayas, I., Ermopoulos, J., Ioannidis, G., Design of Steel Structures to Eurocodes. Springer Tracts in Civil Engineering: Switzerland, pp.31-74, 2019.
- [12] Baddoo, N. R., Burgan, B. A., Structural Design of Stainless Steel. SCI Publication. The Steel Construction Institute: Ascot, p. 6, 2001.

- [13] EUROCODE 3, EN 1993 - 1-4: 2006. Design of steel structures - Part 1-4: Supplementary rules for stainless steels. CEN - European Committee for Standardization, Brussels.
- [14] AISC Design Guide 27, Structural Stainless Steel, American Institute of Steel Construction (AISC), 2013.
- [15] Gere, J. M., Goodno, B. J., Mechanics of Materials - 8th edition. Stamford: Cengage, pp. 902-951, 2013.
- [16] Usami, T., Galambos, T. V., Eccentrically Loaded Single Angle Columns. IABSE publications, vol. 31, 1971.
- [17] Menezes, A. A., Comportamento estrutural de cantoneiras de aço inoxidável submetidas à compressão axial, Rio de Janeiro: UERJ, 2017.
- [18] L. Zhang, Y. Liang, O. Zhao., Experimental and numerical investigations of pin-ended hot-rolled stainless steel angle section columns failing by flexural buckling, Thin-Walled Structures, 2020.
- [19] L. Zhang, Y. Liang, O. Zhao., Laboratory testing and numerical modelling of pin-ended hot-rolled stainless steel angle section columns failing by flexural-torsional buckling, Thin-Walled Structures, 2021.
- [20] SEI/ASCE 8-02, Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, 2002. S. 8-02, *Specification for the Design*, Reston: ASCE, 2002.
- [21] AS/NZS 4673, Cold-formed Stainless Steel Structures, vol. 4673, AS/NZS, Sydney, 2001, 2001.
- [22] A. da S. Sirqueira, P. C. G. da S. Vellasco, L. R. O. de Lima, F. R. Sarquis, Experimental assessment of stainless steel hot-rolled equal legs angles in compression. J. Constr. Steel Res. 2020.
- [23] Afshan, S., Gardner, L., The Continuous Strength Method for Structural Stainless Steel Design. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, UK.
- [24] B.W. Schafer, The direct strength method of cold-formed steel member design, J. Constr. Steel Res. 64 (7–8) (2008) 766–778.
- [25] F. R. Sarquis, L. R. O. de Lima, P. C. G. da S. Vellasco, M. C. Rodrigues, Experimental and numerical investigation of hot-rolled stainless steel equal leg angles under compression. Thin-Walled Structures. 2020.

- [26] A. Filipović, J. Dobrić, N. Baddoo, P. Može, Experimental response of hot-rolled stainless steel angle columns. *Thin-Walled Structures*. 2021.
- [27] Temple, M. C., Mok, K. H. W., Starred Angles Supporting Secondary Trusses. *J. Construct. Steel Research*, nº 17, pp. 45-55, 1989.
- [28] Canadian Standards Association - CSA. Limit States Design of Steel Structures, S16.1. Toronto, Ontário, Canada: CSA, 1994.
- [29] American Society of Civil Engineers - ASCE. Technical Procedures Committee. Guide for Design of Steel Transmission Towers. 2nd edition, nº 52. New York: American Society of Civil Engineers, 1988.
- [30] Botelho, I. S., Comportamento estrutural de seções cruciformes constituídas de cantoneiras de abas iguais de aço inoxidável. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2018.
- [31] I. S. Botelho, A. M. G. Kayser, F. R. Sarquis, L. R. O. de Lima, P. C. G. da S. Vellasco, A. T. da Silva, M. C. Rodrigues, M. G. Diniz, Starred rolled stainless steel angle sections under compression: An experimental and numerical investigation. *Thin-Walled Structures*. 2021.
- [32] Timoshenko, S. P., Gere, J. M., Theory of elastic stability, McGraw-Hill International Book Company, 1963.
- [33] Galambos, T. V., Guide of stability design criteria for metal structures. 5th edition. New York: John Wiley & Sons, INC, pp. 418-454, 1998.
- [34] Bebiano, R., Silvestre, N., Camotim, D., GBTUL 1.0β code for buckling and vibration analysis of thin-walled members, 2008. Freely available at <http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>
- [35] Sarquis, F. R., Avaliação estrutural de cantoneiras em aço inoxidável austenítico submetidas à compressão. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2019.
- [36] Ansys, Inc. Theory Reference (R3), 2019.
- [37] DIN EN 1090-2. Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: Technical requirements for steel structures. Berlin, Germany, 2011.

ANEXO A

Este anexo apresenta exemplos de cálculo das distâncias ótimas para colunas com seção transversal formada por cantoneiras duplas cruciformes. Serão seguidas as etapas de conforme descrito no capítulo 7.

A Tabela A 1 apresenta as propriedades geométricas das seções transversais utilizadas na presente dissertação.

Tabela A 1 – Propriedades geométricas das seções transversais.

Cantoneira simples - Individual												
Comp. da aba	Esp. da aba	Largura efetiva	Área da seção	Momento de Inércia (eixo v)	Raio de giração (eixo v)	Momento de Inércia (eixo u)	Raio de giração (eixo u)	Momento polar de inércia CG	Raio de giração polar CG	Distância entre CG e CS	Raio de giração polar CS	Coef. β
b (mm)	t (mm)	b _{eff} (mm)	A (mm ²)	I _v (mm ⁴)	r _v (mm)	I _u (mm ⁴)	r _u (mm)	I _G (mm ⁴)	r _G (mm)	u _{G0} (mm)	r ₀ (mm)	
50,8	4,76	48,42	465,81	45369,20	9,88	180228,20	19,67	225597,40	22,01	17,77	28,29	0,61
	6,35	47,63	605,16	58688,60	9,83	229343,60	19,47	288032,20	21,82	17,87	28,19	0,60
	7,93	46,84	741,93	72008,00	9,80	272631,60	19,17	344639,60	21,55	17,90	28,00	0,59

Cantoneira dupla interconectada em todo comprimento - Conjunto (c)												
Comp. da aba	Esp. da aba	Largura efetiva	Área da seção	Momento de Inércia (eixo v)	Raio de giração (eixo v)	Momento de Inércia (eixo u)	Raio de giração (eixo u)	Momento polar de inércia CG	Raio de giração polar CG	Distância entre CG e CS	Raio de giração polar CS	Coef. β
b (mm)	t (mm)	b _{eff} (mm)	A _c (mm ²)	I _{v,c} (mm ⁴)	r _{v,c} (mm)	I _{u,c} (mm ⁴)	r _{u,c} (mm)	I _{G,c} (mm ⁴)	r _{G,c} (mm)	u _{G0,c} (mm)	r _{0,c} (mm)	
50,8	4,76	48,42	931,62	469092,57	22,44	360456,40	19,67	829548,97	29,84	0,0	29,84	1,0
	6,35	47,63	1210,32	653341,75	23,23	458687,20	19,47	1112028,95	30,31	0,0	30,31	1,0
	7,93	46,84	1483,86	853335,51	23,98	545263,20	19,17	1398598,71	30,70	0,0	30,70	1,0

A1 - Coluna dupla cruciforme biengastada (k=0,5) formada por cantoneira com seção transversal 50,8x4,76mm e comprimento (L) de 900mm.

1º passo - Cálculo dos comprimentos de transição das colunas duplas: com interconexão em todo seu comprimento e sem interconexão. Utilizando a equação (24), cálculo do comprimento de transição para cantoneira dupla totalmente interconectada, tem-se:

$$L_{\text{trans (DL-LT)}} = \frac{\pi}{k} \sqrt{\frac{b_{\text{eff}}^2 (1 + \nu)(6r_{u,c}^2 - t^2)}{3t^2}}$$

$$L_{\text{trans (DL-LT)}} = \frac{\pi}{0,5} \sqrt{\frac{48,42^2 (1 + 0,3)(6[19,67]^2 - 4,76^2)}{3(4,76)^2}}$$

$$L_{\text{trans (DL-LT)}} = 2017,25\text{mm}$$

Utilizando a equação (25), cálculo do comprimento de transição para cantoneira dupla sem interconexão, tem-se:

$$L_{\text{trans (DL-OL)}} = \frac{\pi}{k} \sqrt{\frac{b_{\text{eff}}^2 (1 + \nu)[6r_v^2(\beta r_u^2 - r_u^2) + t^2(r_u^2 - r_v^2)]}{3t^2(r_v^2 - r_u^2)}}$$

$$= \frac{\pi}{0,5} \sqrt{\frac{48,42^2 (1 + 0,3)[6(9,88)^2 (0,61(9,88)^2 - 19,67^2) + 4,76^2 (19,67^2 - 9,88^2)]}{3(4,76)^2 (9,88^2 - 19,67^2)}}$$

$$L_{\text{trans (DL-OL)}} = 1064,47\text{mm}$$

2° passo - Comparação do comprimento da coluna com os comprimentos de transição calculados no item anterior.

$$L = 900\text{mm} < L_{\text{trans (DL-OL)}} = 1060,74\text{mm}$$

3° passo - Após comparar os comprimentos, enquadra-se a situação conforme mostrado no fluxograma do capítulo 7. Consultando o fluxograma, observa-se que esta situação atende ao requisito do caso 1, ou seja: Flexo-torção (DL - OL) → Torção (DL - LT). Sendo assim, utiliza-se a equação (28).

$$a_{\text{ft} \rightarrow \text{T}} = \frac{\pi}{k} \frac{(r_{0,c})r_u}{t} \sqrt{\frac{6(1+\nu)(r_{0,c}^2 - r_0^2)}{r_{0,c}^2 - \beta r_0^2}}$$

Adotando $k = 1$ para a distância entre interconexões, tem-se:

$$a_{ft \rightarrow T} = \frac{\pi}{1,0} \frac{(29,84) 19,67}{4,76} \sqrt{\frac{6(1 + 0,3)(29,84^2 - 28,29^2)}{29,84^2 - 0,61(28,29)^2}}$$

$$a_{ft \rightarrow T} = 512,06 \text{ mm}$$

A máxima distância entre interconexões para que a coluna biengastada com 900mm de comprimento e seção transversal formada por cantoneira dupla de 50,8x4,76mm trabalhe de forma conjunta é de 512,06mm.

A2 - Coluna dupla cruciforme biengastada ($k=0,5$) formada por cantoneira com seção transversal 50,8x6,35mm e comprimento (L) de 1400mm.

1° passo - Cálculo dos comprimentos de transição das colunas duplas: com interconexão em todo seu comprimento e sem interconexão. Utilizando a equação (24), cálculo do comprimento de transição para cantoneira dupla totalmente interconectada, tem-se:

$$L_{\text{trans (DL-LT)}} = \frac{\pi}{k} \sqrt{\frac{b_{\text{eff}}^2 (1 + \nu)(6r_{u,c}^2 - t^2)}{3t^2}}$$

$$L_{\text{trans (DL-LT)}} = \frac{\pi}{0,5} \sqrt{\frac{47,63^2 (1 + 0,3)(6[19,47]^2 - 6,35^2)}{3(6,35)^2}} = 1466,41 \text{ mm}$$

Utilizando a equação (25), cálculo do comprimento de transição para cantoneira dupla sem interconexão, tem-se:

$$L_{\text{trans (DL-OL)}} = \frac{\pi}{k} \sqrt{\frac{b_{\text{eff}}^2 (1 + \nu)[6r_v^2(\beta r_v^2 - r_u^2) + t^2(r_u^2 - r_v^2)]}{3t^2(r_v^2 - r_u^2)}}$$

$$= \frac{\pi}{0,5} \sqrt{\frac{47,63^2(1 + 0,3)[6(9,83)^2(0,60(9,83)^2 - 19,47^2) + 6,35^2(19,47^2 - 9,83^2)]}{3(6,35)^2(9,83^2 - 19,47^2)}}$$

$$L_{\text{trans (DL-0L)}} = 771,74\text{mm}$$

2º passo - Comparação do comprimento da coluna com os comprimentos de transição calculados no item anterior.

$$L_{\text{trans (DL-0L)}} = 771,74\text{mm} < L = 1400\text{mm} < L_{\text{trans (DL-LT)}} = 1466,41\text{mm}$$

3º passo - Após comparar os comprimentos, enquadra-se a situação conforme mostrado no fluxograma do capítulo 7. Consultando o fluxograma, observa-se que esta situação atende ao requisito do caso 2, ou seja: Flexão (DL - 0L) → Torção (DL - LT). Sendo assim, utiliza-se a equação (30).

$$a_{f \rightarrow T} = \frac{\pi}{k} \frac{r_v(k_c L)b_{\text{eff}}}{t} \sqrt{\frac{3(1 + u)}{3(k_c L)^2 + (\pi b_{\text{eff}})^2(1 + u)}}$$

Adotando $k = 1$ para a distância entre interconexões, tem-se:

$$a_{f \rightarrow T} = \frac{\pi}{1,0} \frac{9,83 (0,5 \cdot 1400) 47,63}{6,35} \sqrt{\frac{3(1 + 0,3)}{3(0,5 \cdot 1400)^2 + (\pi 47,63)^2(1 + 0,3)}}$$

$$a_{f \rightarrow T} = 261,53\text{mm}$$

A máxima distância entre interconexões para que a coluna biengastada com 1400mm de comprimento e seção transversal formada por cantoneira dupla de 50,8x6,35mm trabalhe de forma conjunta é de 261,53mm.

A3 - Coluna dupla cruciforme biengastada ($k=0,5$) formada por cantoneira com seção transversal 50,8x7,93mm e comprimento (L) de 2200mm.

1° passo - Cálculo dos comprimentos de transição das colunas duplas: com interconexão em todo seu comprimento e sem interconexão. Utilizando a equação (24), cálculo do comprimento de transição para cantoneira dupla totalmente interconectada, tem-se:

$$L_{\text{trans (DL-LT)}} = \frac{\pi}{k} \sqrt{\frac{b_{\text{eff}}^2 (1 + \nu)(6r_{u,c}^2 - t^2)}{3t^2}}$$

$$L_{\text{trans (DL-LT)}} = \frac{\pi}{0,5} \sqrt{\frac{46,84^2 (1 + 0,3)(6[19,17]^2 - 7,93^2)}{3(7,93)^2}} = 1130,70\text{mm}$$

Utilizando a equação (25), cálculo do comprimento de transição para cantoneira dupla sem interconexão, tem-se:

$$L_{\text{trans (DL-OL)}} = \frac{\pi}{k} \sqrt{\frac{b_{\text{eff}}^2 (1 + \nu)[6r_v^2(\beta r_v^2 - r_u^2) + t^2(r_u^2 - r_v^2)]}{3t^2(r_v^2 - r_u^2)}}$$

$$= \frac{\pi}{0,5} \sqrt{\frac{46,84^2 (1 + 0,3)[6(9,80)^2(0,59(9,80)^2 - 19,17^2) + 7,93^2(19,17^2 - 9,80^2)]}{3(7,93)^2(9,80^2 - 19,17^2)}}$$

$$L_{\text{trans (DL-OL)}} = 596,90\text{mm}$$

2° passo - Comparação do comprimento da coluna com os comprimentos de transição calculados no item anterior.

$$L = 2200\text{mm} > L_{\text{trans (DL-LT)}} = 1130,70\text{mm}$$

3° passo - Após comparar os comprimentos, enquadra-se a situação conforme mostrado no fluxograma do capítulo 7. Consultando o fluxograma, observa-se que esta situação atende ao requisito do caso 3, ou seja: Flexão (DL - OL) → Flexão (DL - LT). Sendo assim, utiliza-se a equação (32).

$$a_{f \rightarrow F} = \frac{(k_c L)}{k} \frac{r_v}{2r_{u,c}}$$

$$a_{f \rightarrow F} = \frac{(0,5 \cdot 2200)}{1,0} \frac{9,80}{2(19,17)}$$

$$\mathbf{a_{f \rightarrow F} = 281,17mm}$$

A máxima distância entre interconexões para que a coluna biengastada com 2200mm de comprimento e seção transversal formada por cantoneira dupla de 50,8x7,93mm trabalhe de forma conjunta é de 281,17mm.

ANEXO B

Este anexo apresenta todos os modelos numéricos, analisados neste trabalho, referentes as colunas com seção transversal formada por cantoneira com dimensões de 50,8x4,76mm e comprimento de 900mm.

- SL – 50,8x4,76 – 900
1º Modo de Flambagem

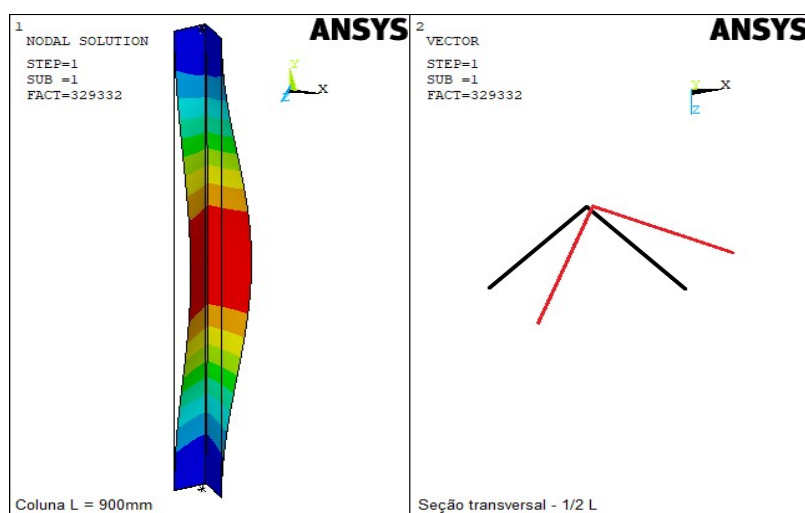


Figura B1 – Análise de flambagem elástica: SL - 50,8x4,76 - 900, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 329,33\text{kN}$.

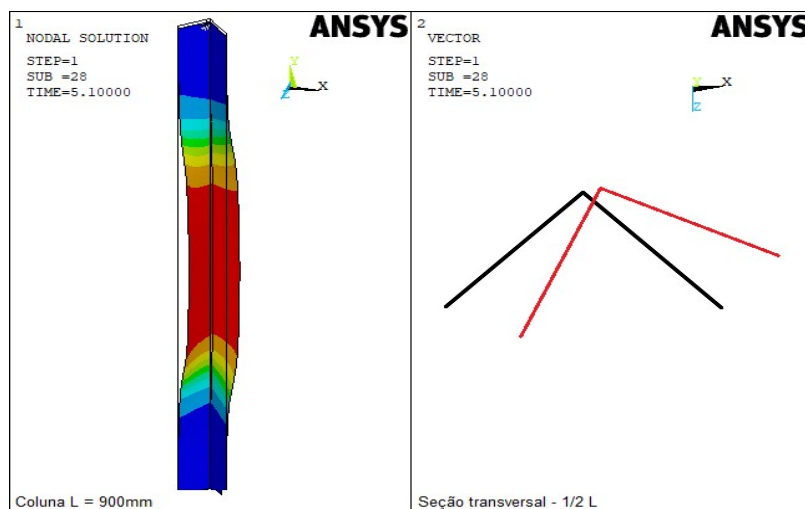


Figura B2 – Análise não linear: SL - 50,8x4,76 – 900, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 128,01\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 900 – 0
1º Modo de Flambagem

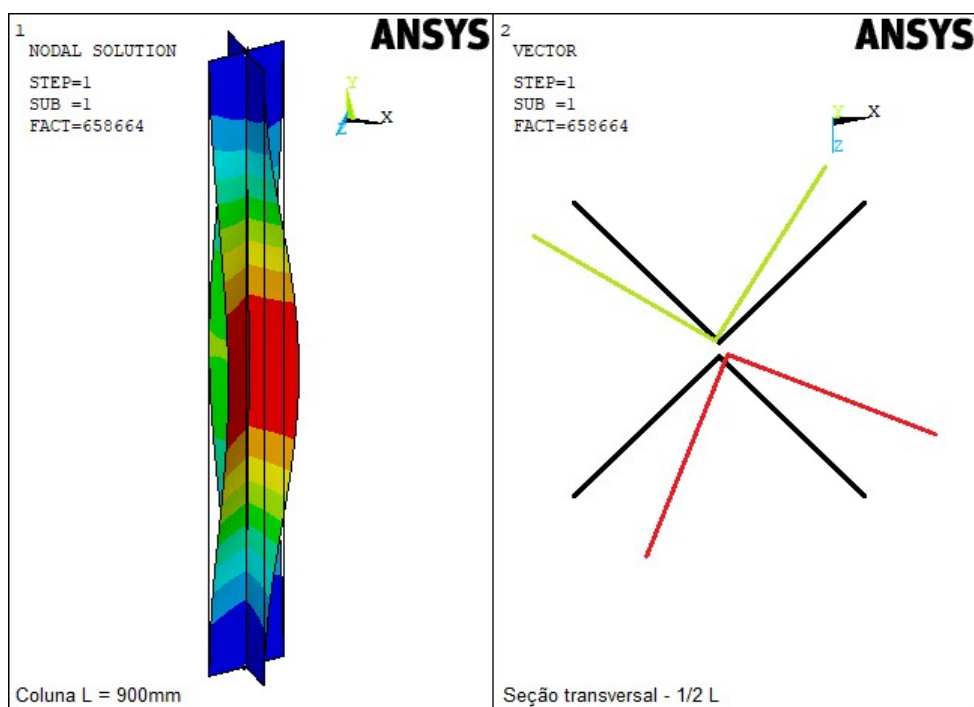


Figura B3 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 900 - 0, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 658,66\text{kN}$.

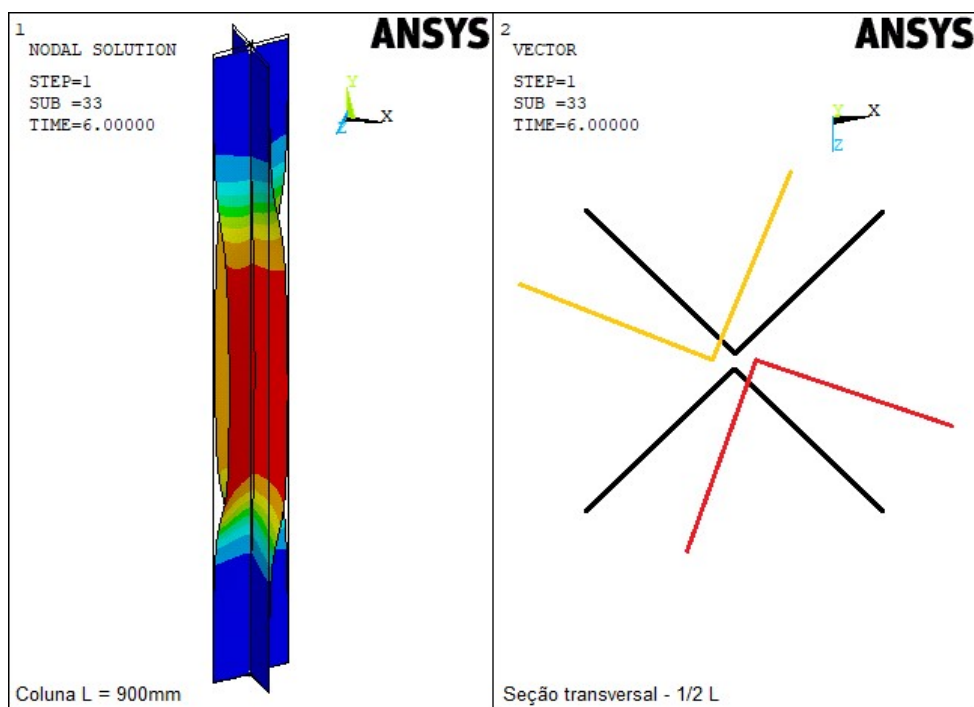


Figura B4 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 900 - 0, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 258,02\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 900 – 1 – 450
1º Modo de Flambagem

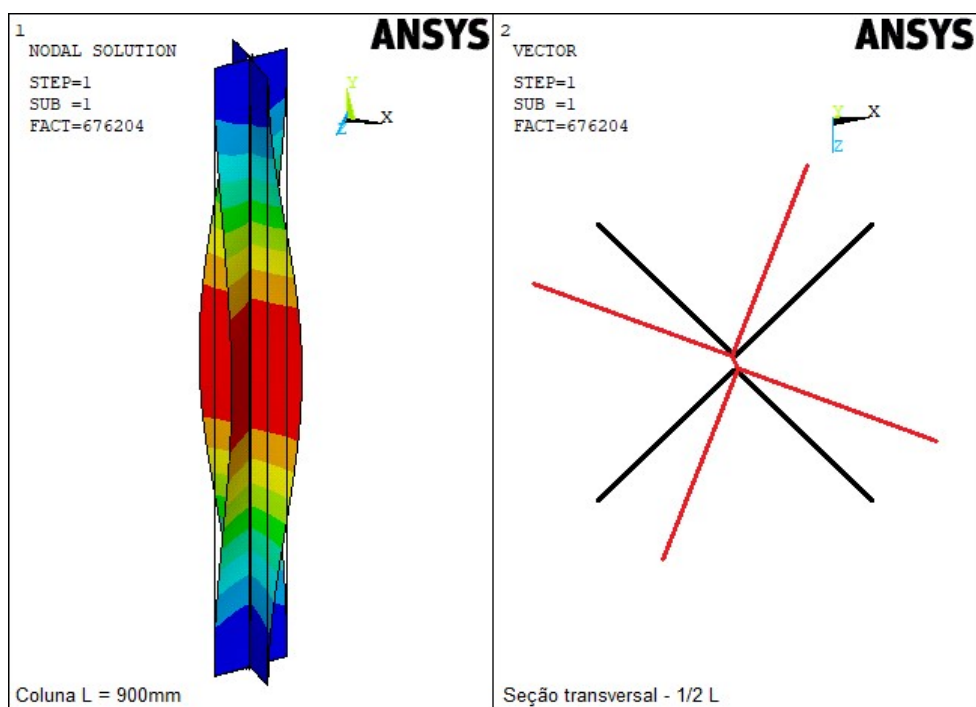


Figura B5 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 900 - 1 - 450, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 676,20\text{kN}$.

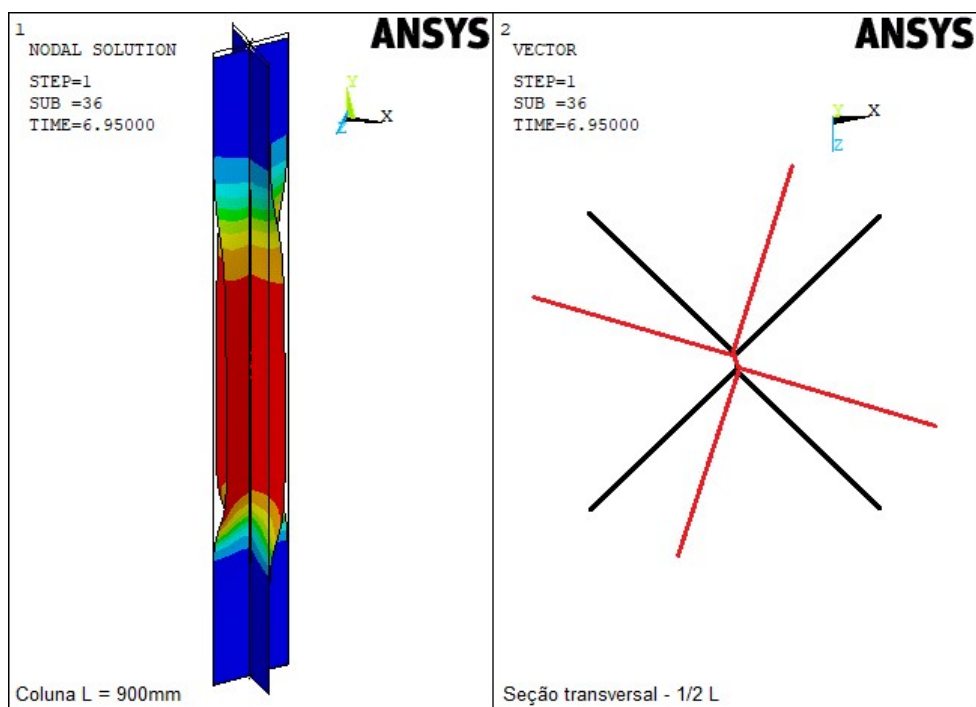


Figura B6 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 900 - 1 - 450, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 269,72\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 900 – 2 – 300
1º Modo de Flambagem

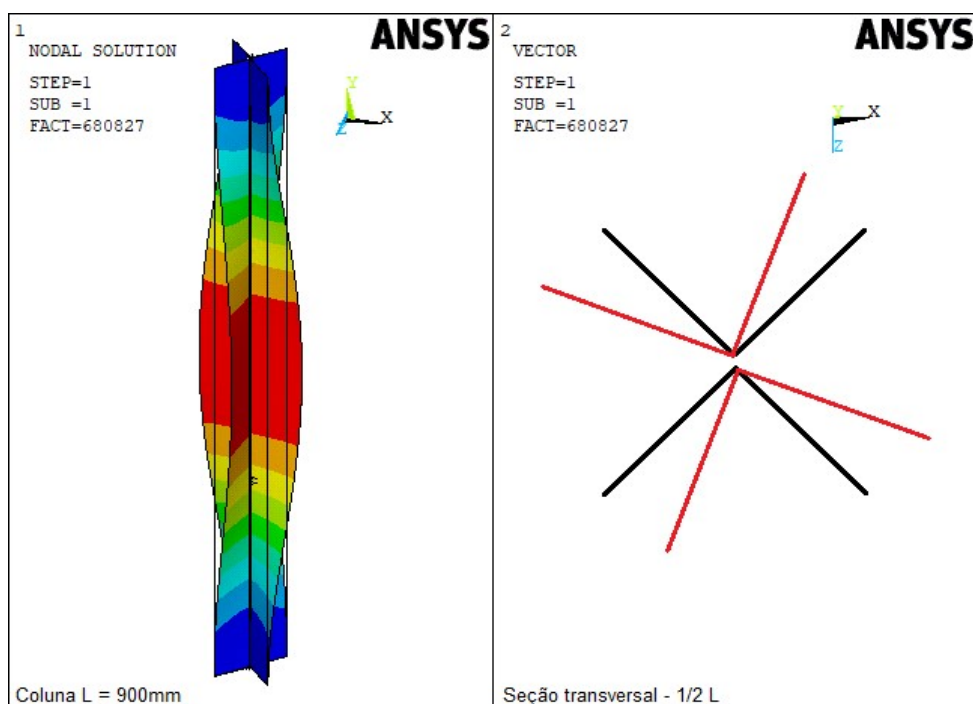


Figura B7 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 900 - 2 - 300, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 680,83\text{kN}$.

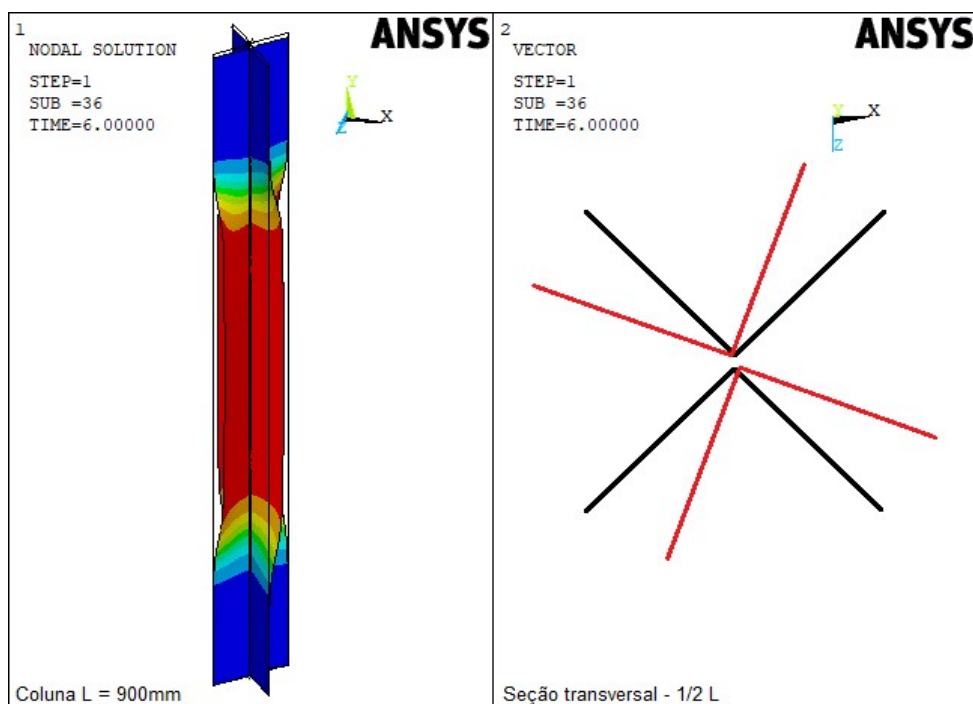


Figura B8 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 900 - 2 - 300, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 270,37\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 900 – 3 – 225
1º Modo de Flambagem

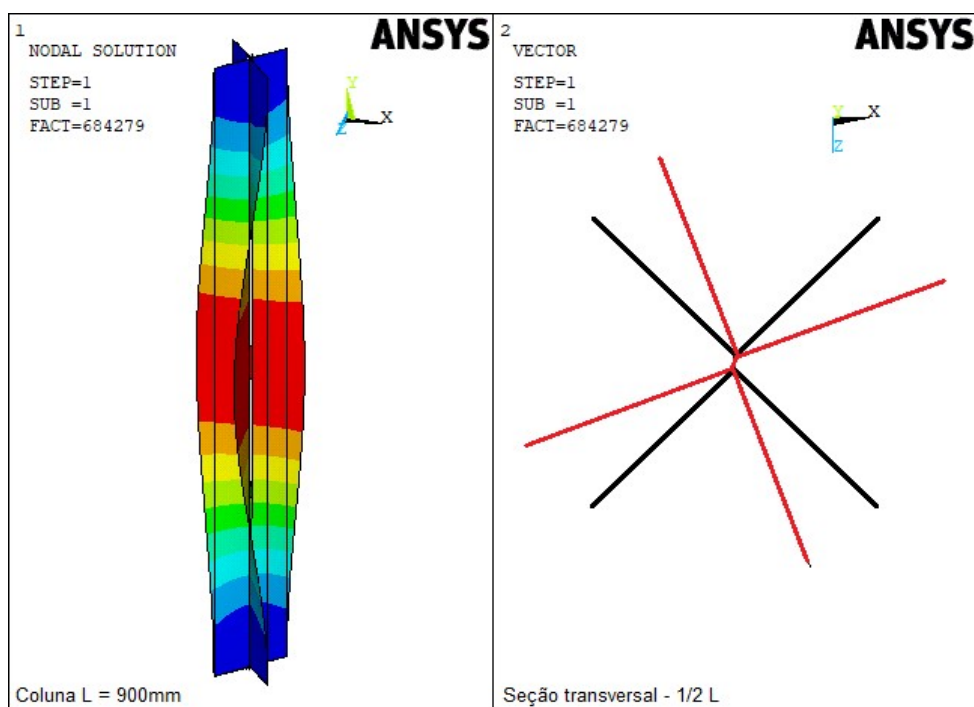


Figura B9 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 900 - 3 - 225, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 684,23\text{kN}$.

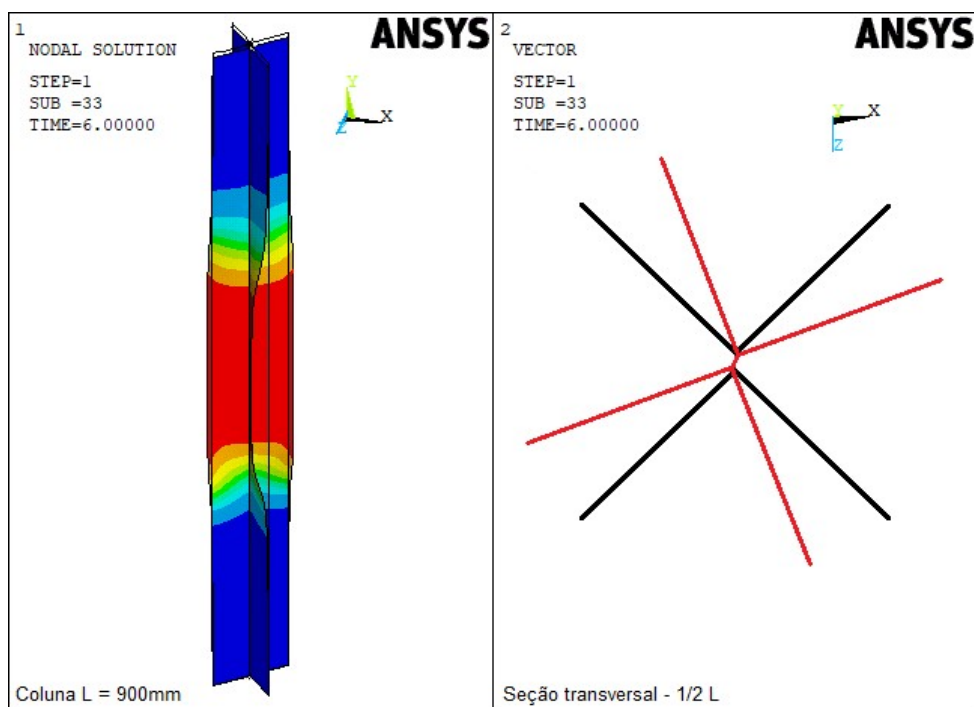


Figura B10 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 900 - 3 - 225, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 272,12\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 900 – 4 – 180
1º Modo de Flambagem

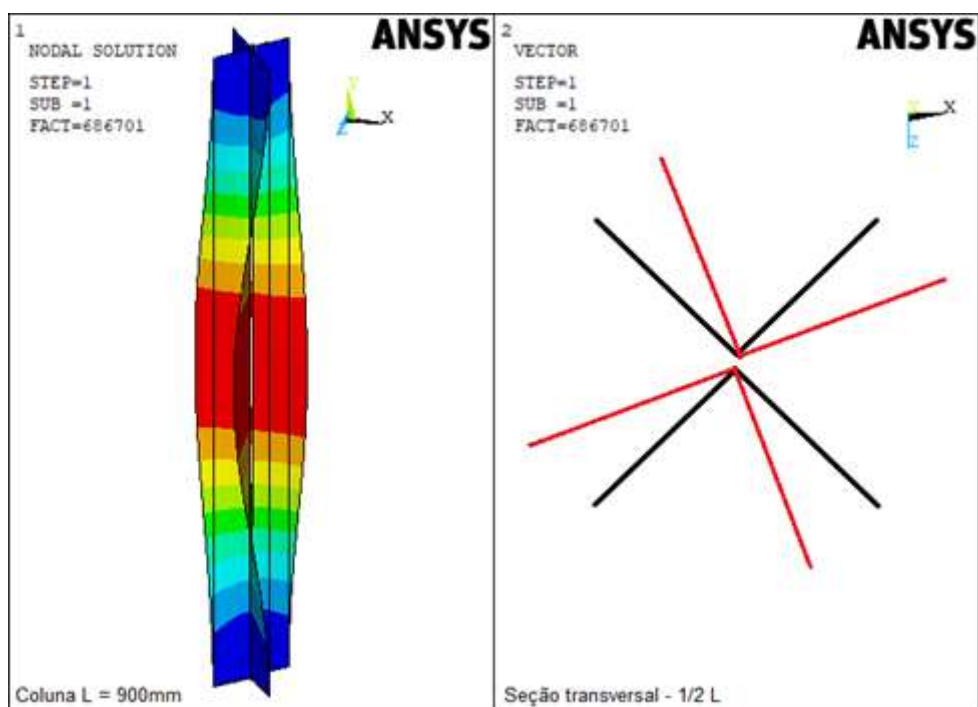


Figura B11 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 900 - 4 - 180, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 686,70\text{kN}$.

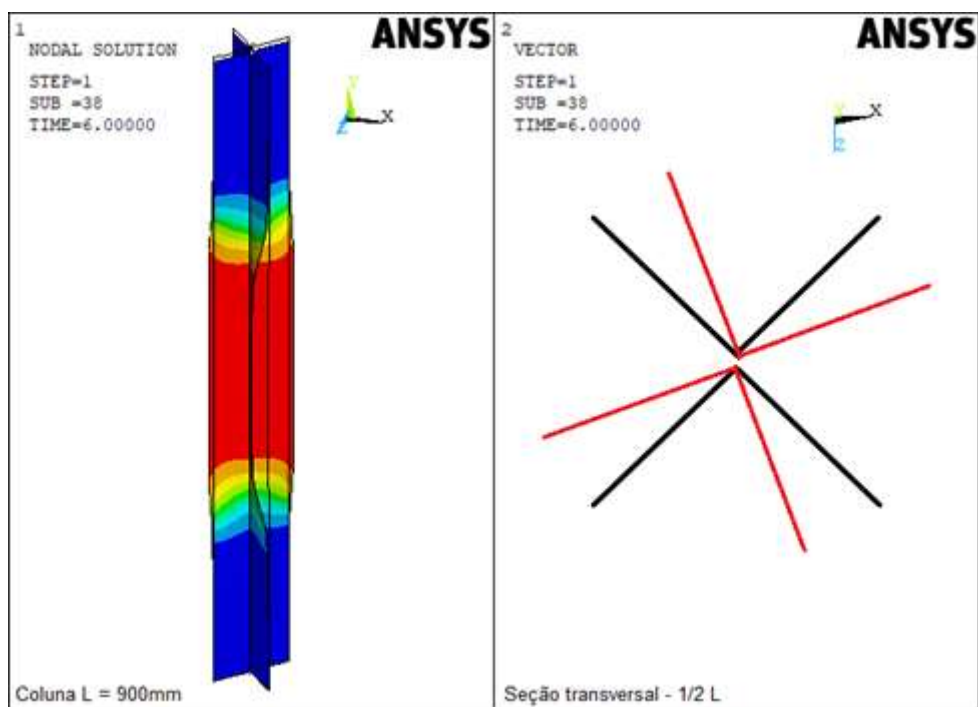


Figura B12 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 900 - 4 - 180, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 271,15\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 900 – 5 – 150
1º Modo de Flambagem

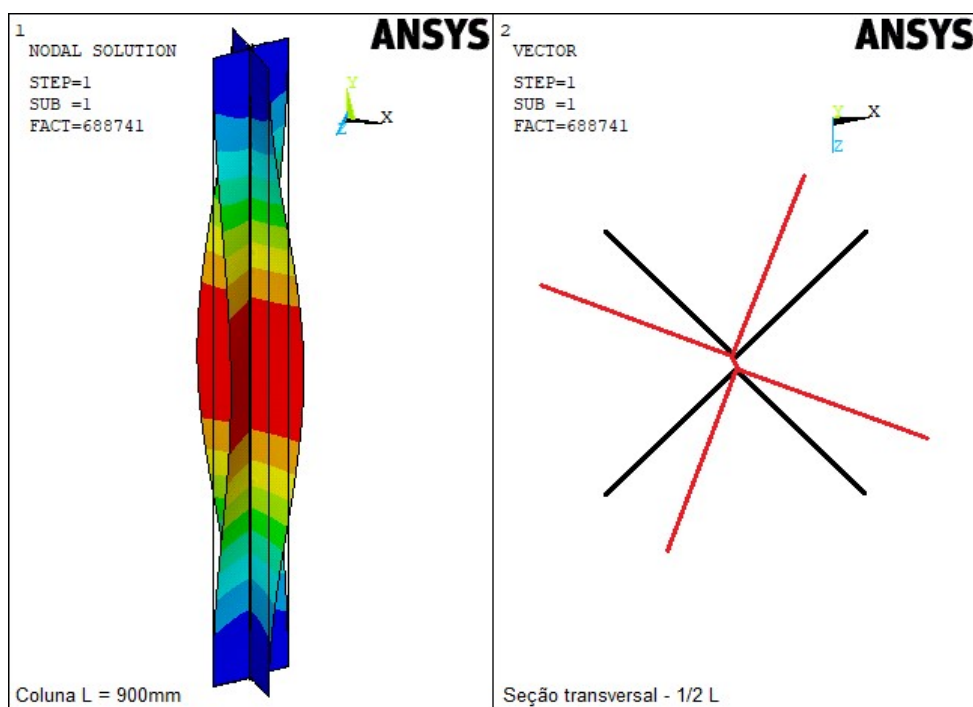


Figura B13 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 900 - 5 - 150, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 688,74\text{kN}$.

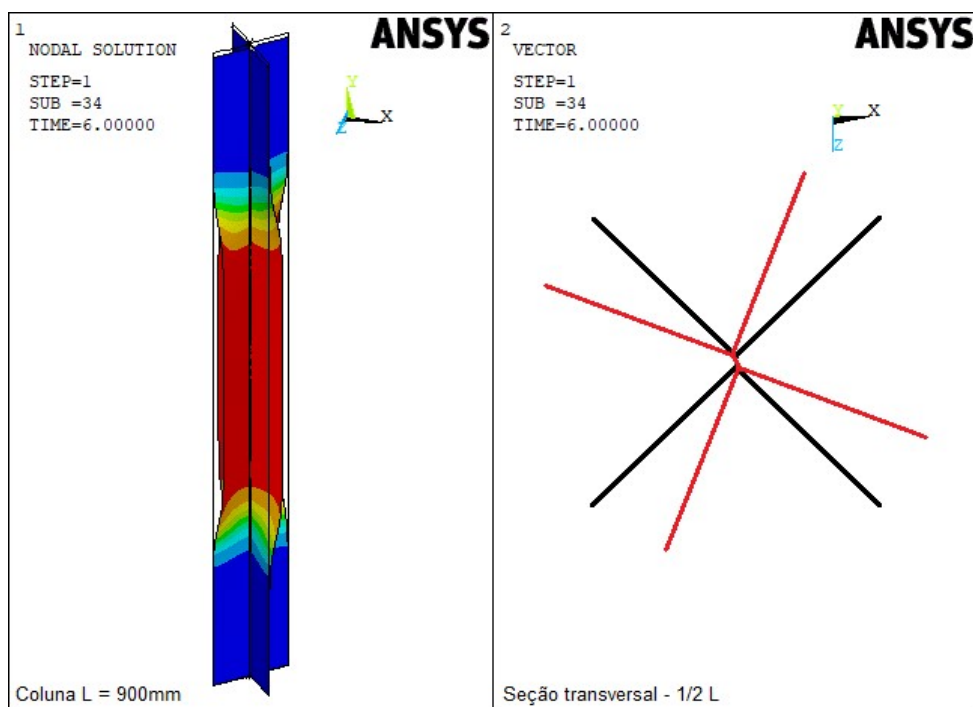


Figura B14 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 900 - 5 - 150, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 271,50\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 900 – 6 – 129
1º Modo de Flambagem

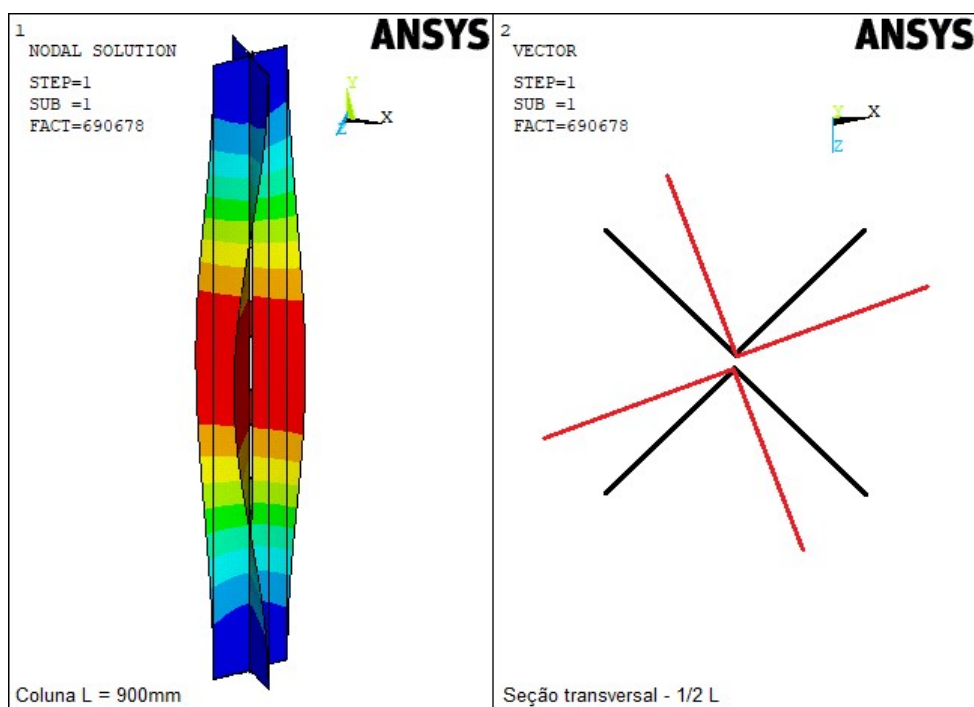


Figura B15 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 900 - 6 - 129, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 690,68\text{kN}$.

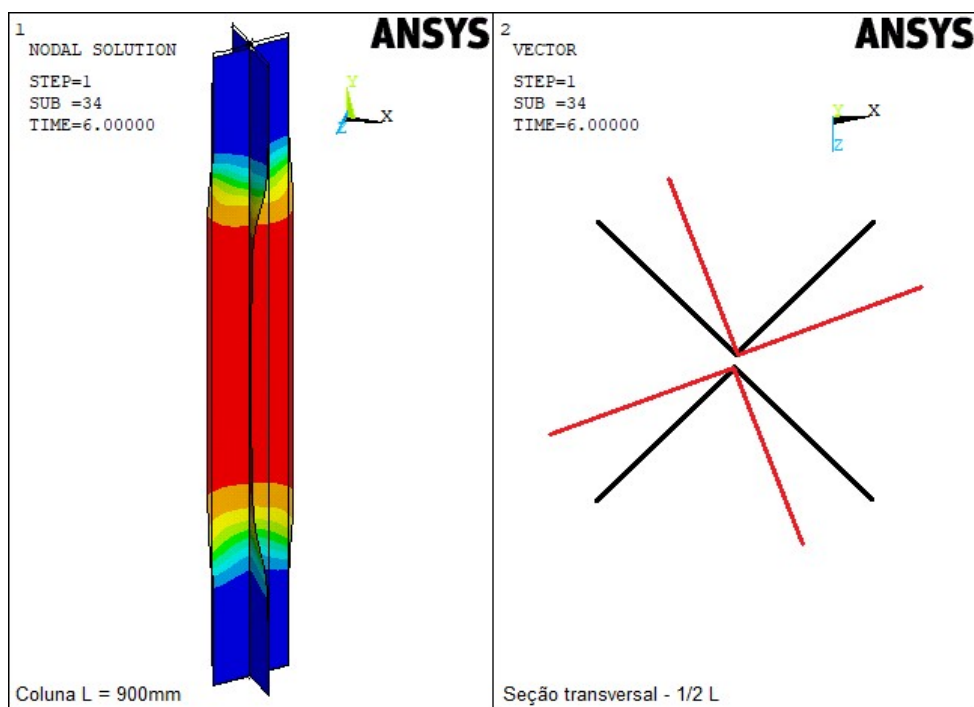


Figura B16 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 900 - 6 - 129, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 272,26\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 900 – 7 – 113
1º Modo de Flambagem

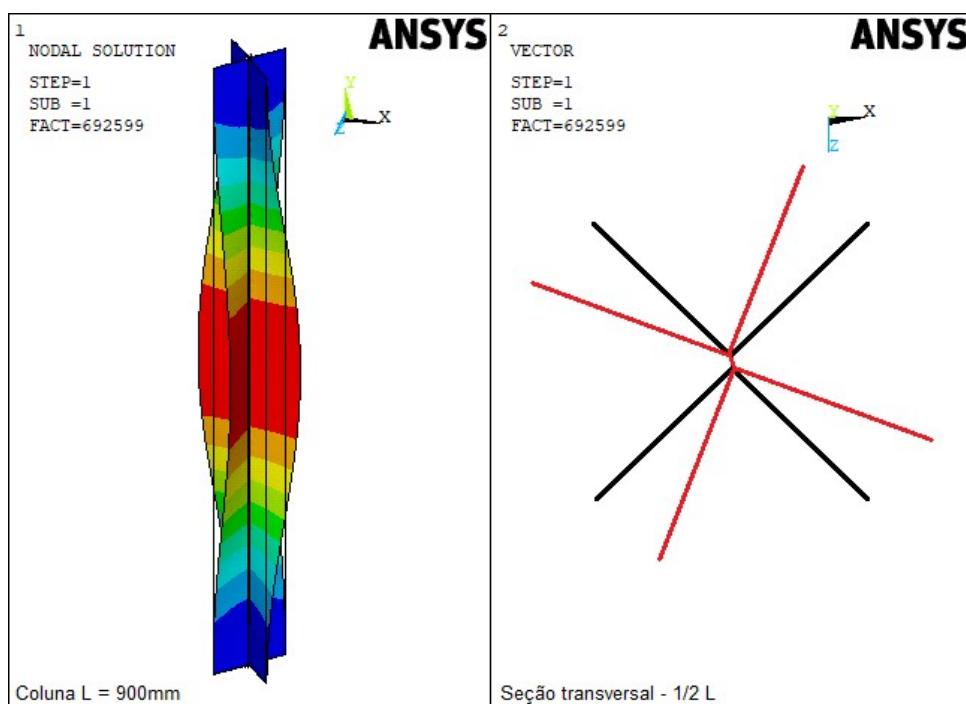


Figura B17 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 900 - 7 - 113, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 692,60\text{kN}$.

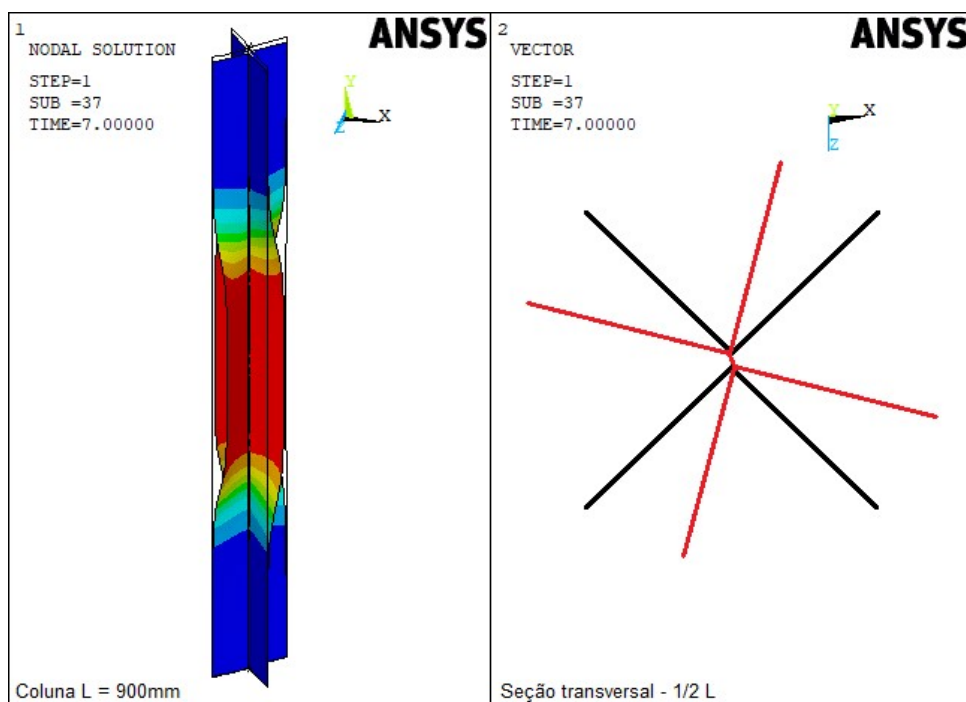


Figura B18 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 900 - 7 - 113, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 272,75\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 900
1º Modo de Flambagem

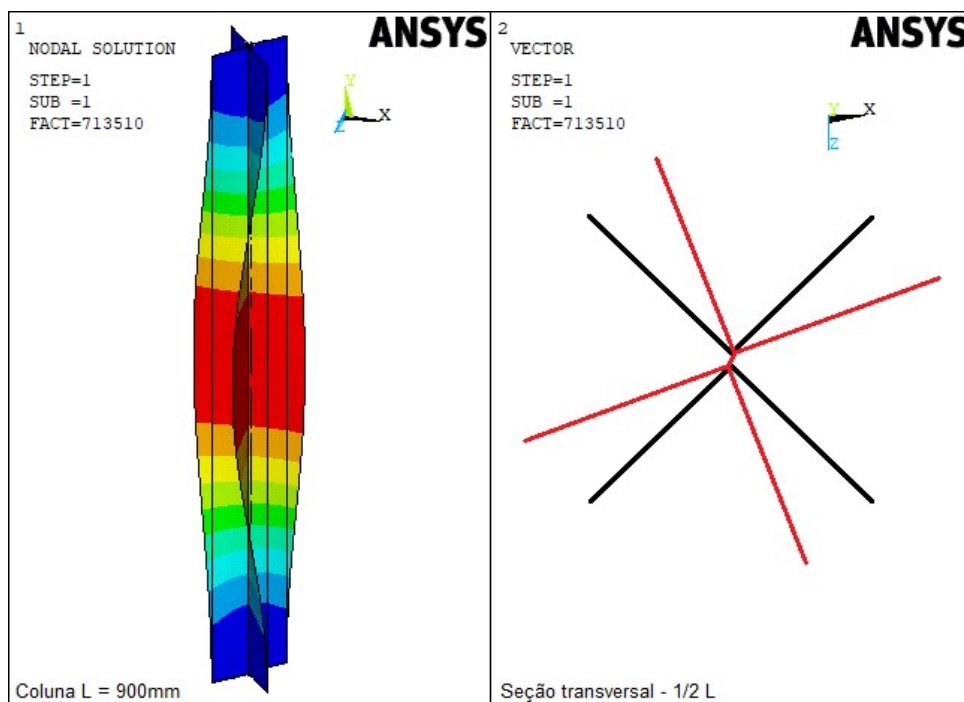


Figura B19 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 900, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 713,51\text{kN}$.

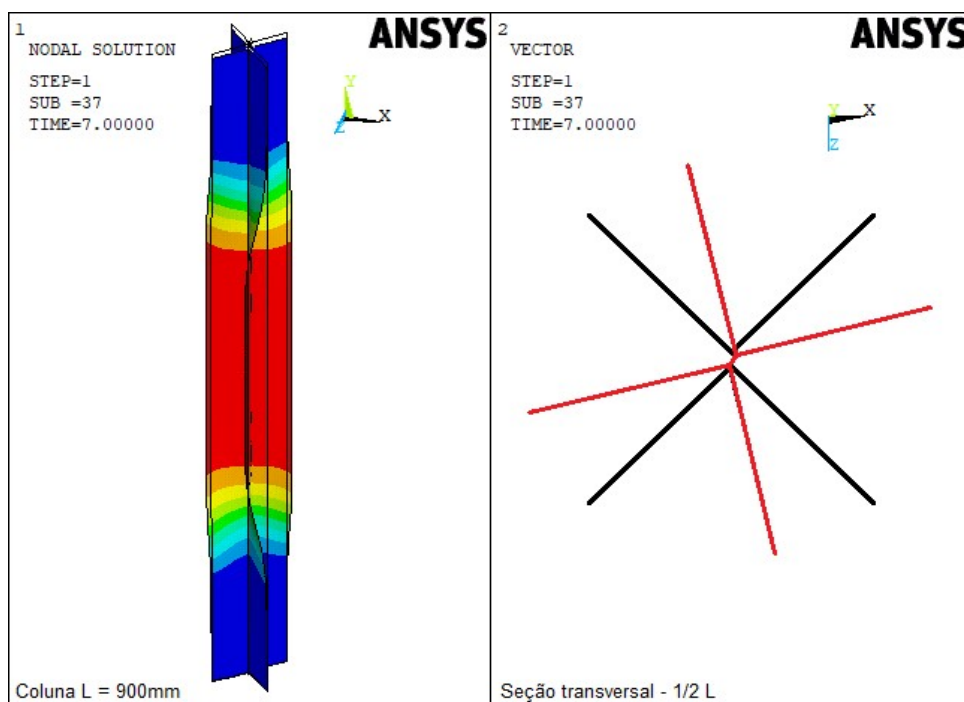


Figura B20 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 900, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 276,14\text{kN}$.

ANEXO C

Este anexo apresenta todos os modelos numéricos, analisados neste trabalho, referentes as colunas com seção transversal formada por cantoneira com dimensões de 50,8x4,76mm e comprimento de 1400mm.

- SL – 50,8x4,76 – 1400
1º Modo de Flambagem

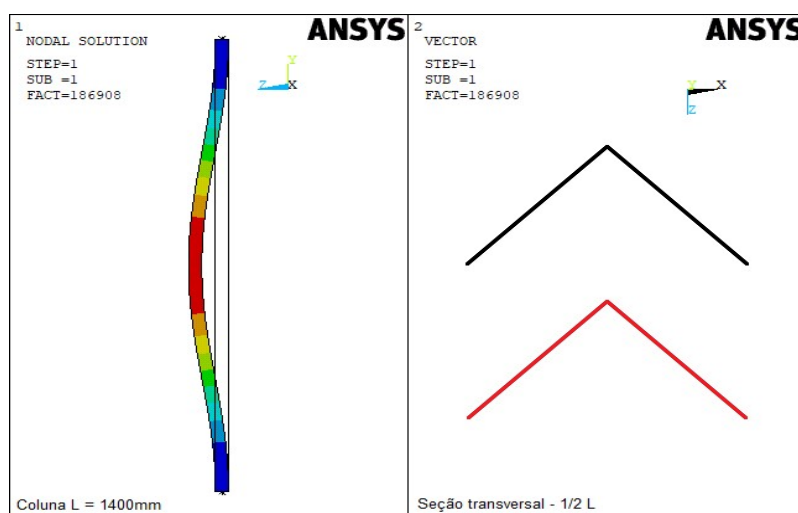


Figura C1 – Análise de flambagem elástica: SL - 50,8x4,76 - 1400, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 186,91\text{kN}$.

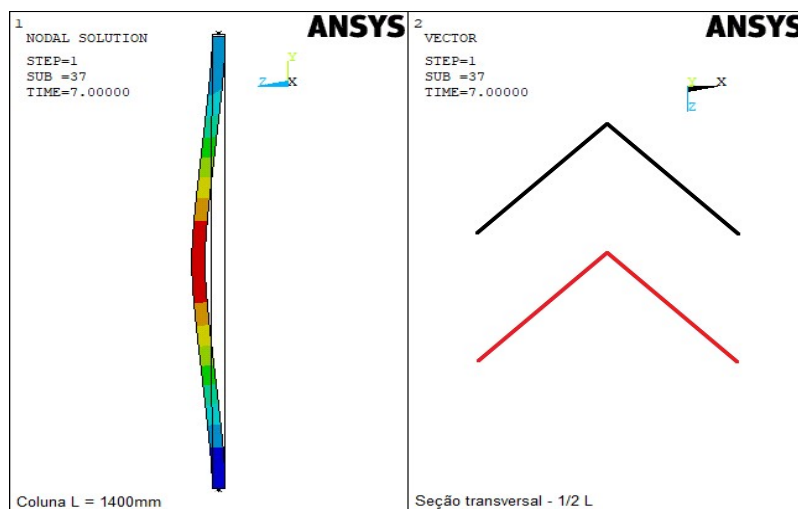


Figura C2 – Análise não linear: SL - 50,8x4,76 - 1400, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 79,03\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 1400 – 0
1º Modo de Flambagem

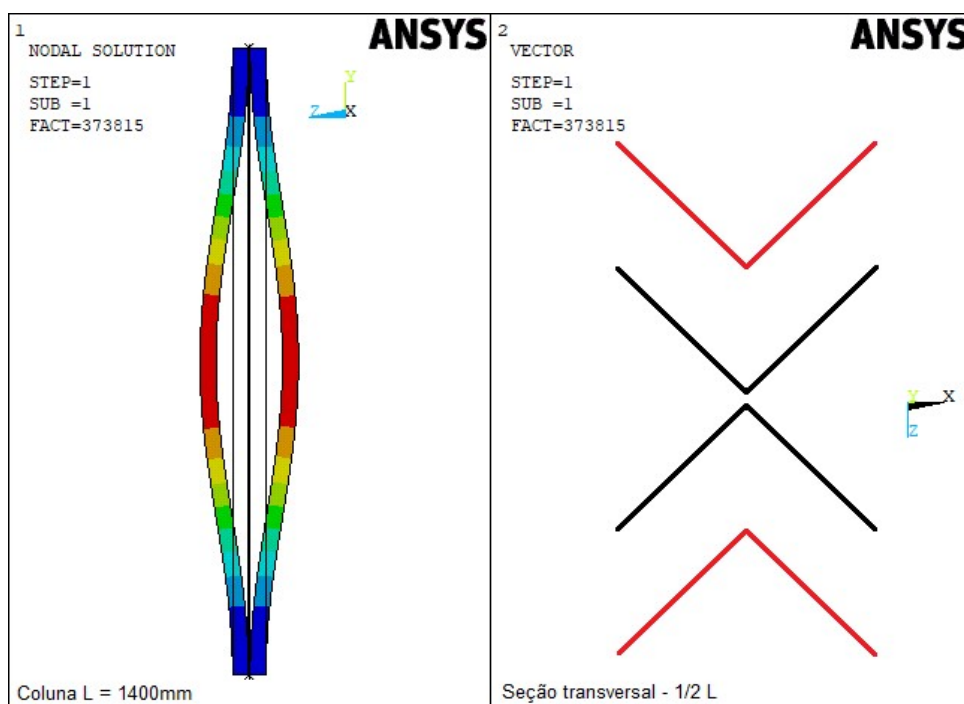


Figura C3 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 0, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 373,82\text{kN}$.

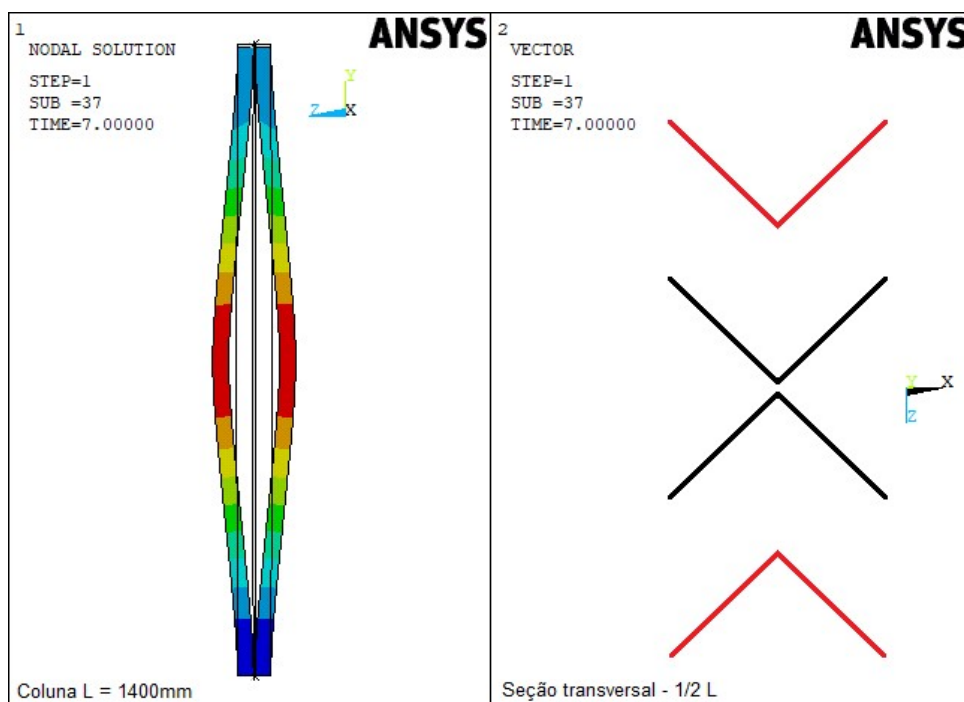


Figura C4 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 0, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 158,09\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 1400 – 1 – 700
1º Modo de Flambagem

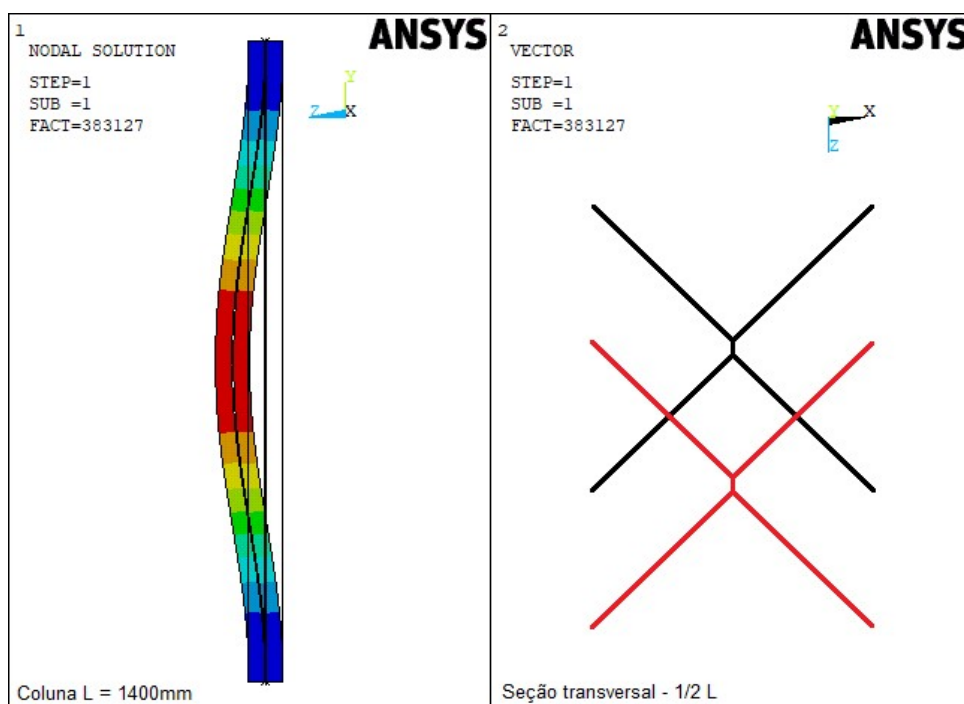


Figura C5 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 1 - 700, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 383,13\text{kN}$.

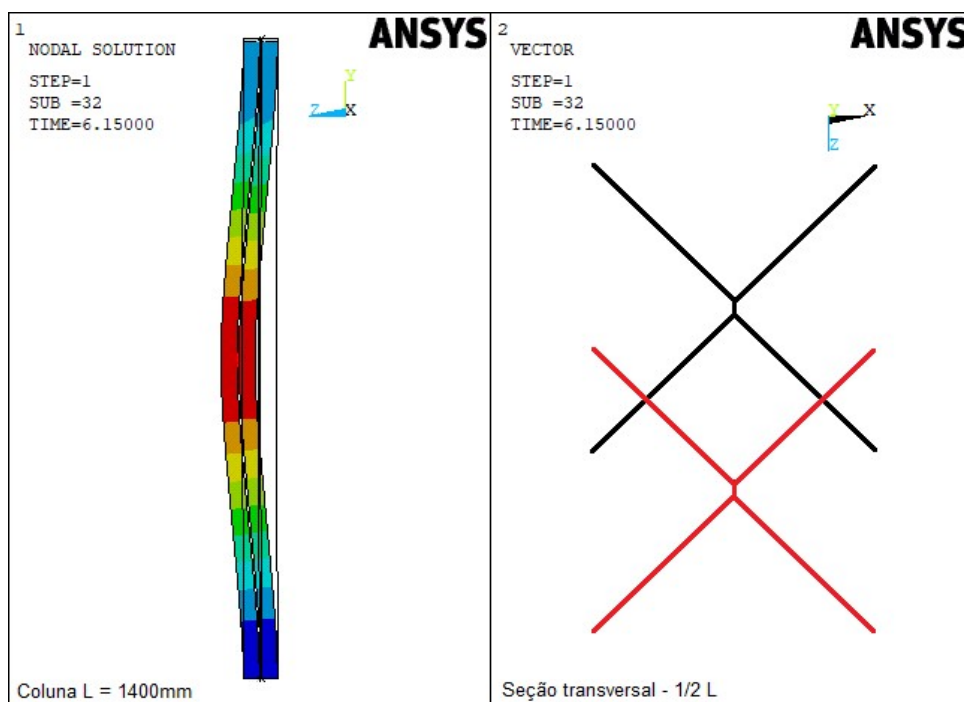


Figura C6 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 1 - 700, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 158,83\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 1400 – 2 – 467
1º Modo de Flambagem

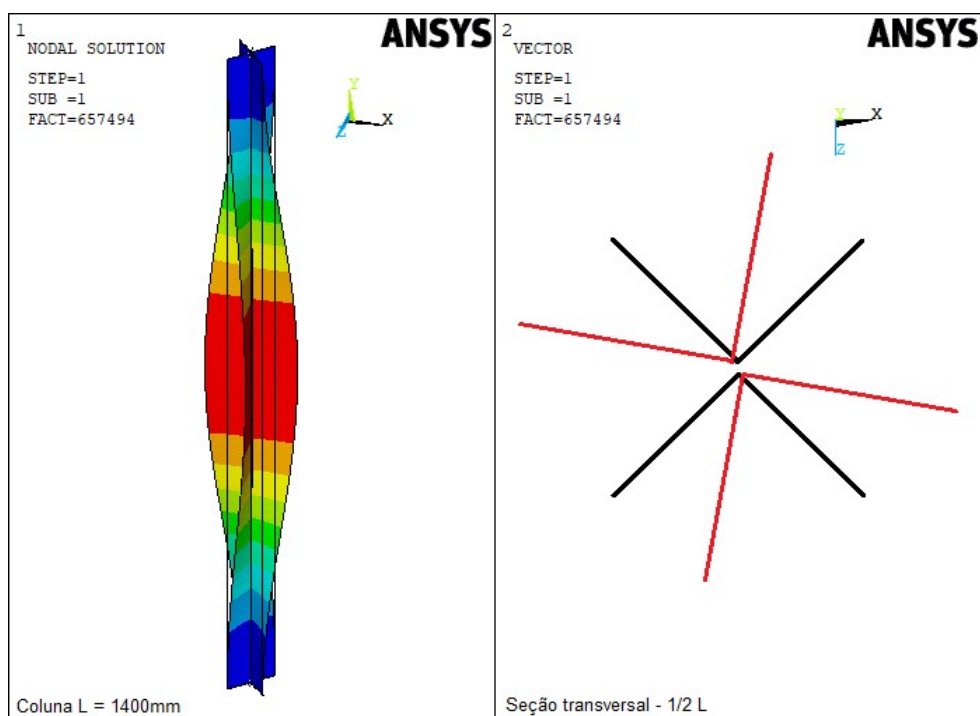


Figura C7 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 2 - 467, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 657,49\text{kN}$.

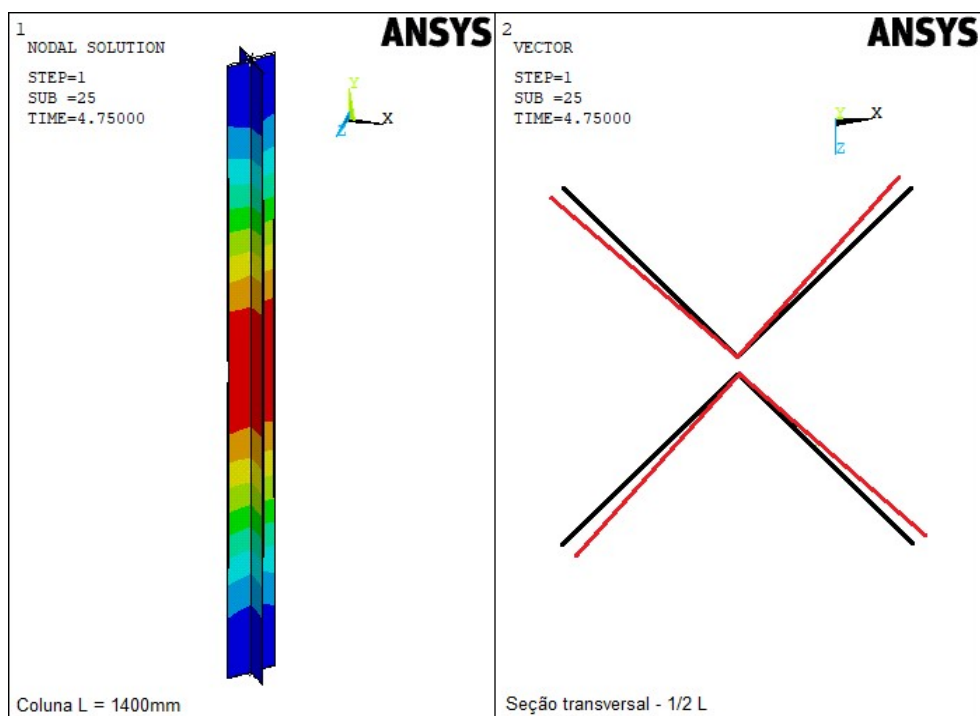


Figura C8 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 2 - 467, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 265,89\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 1400 – 3 – 350
1º Modo de Flambagem

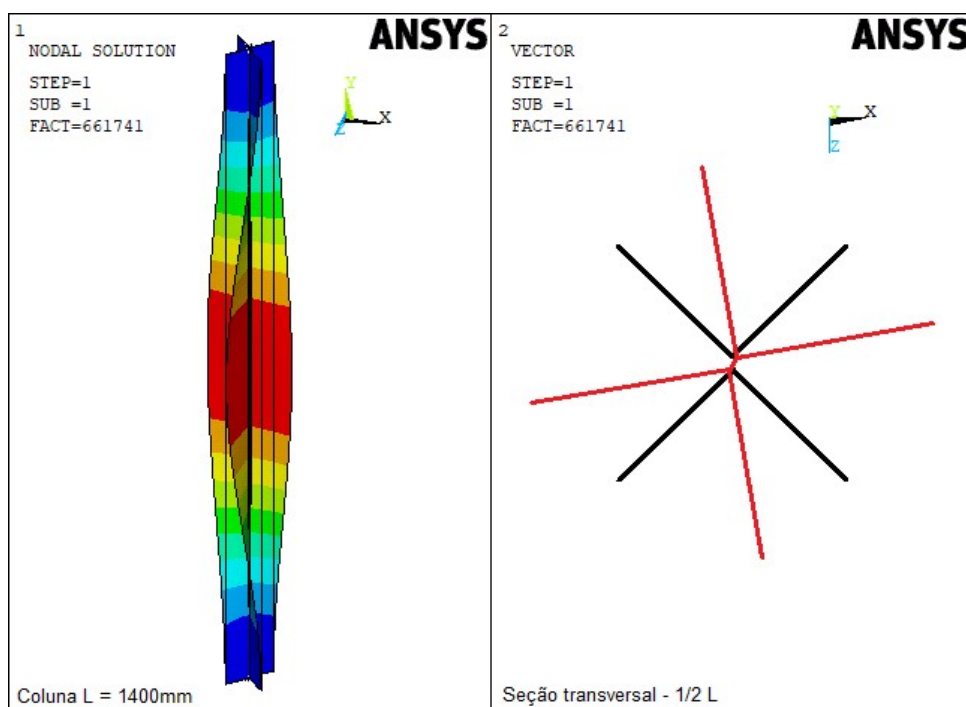


Figura C9 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 3 - 350, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 661,74\text{kN}$.

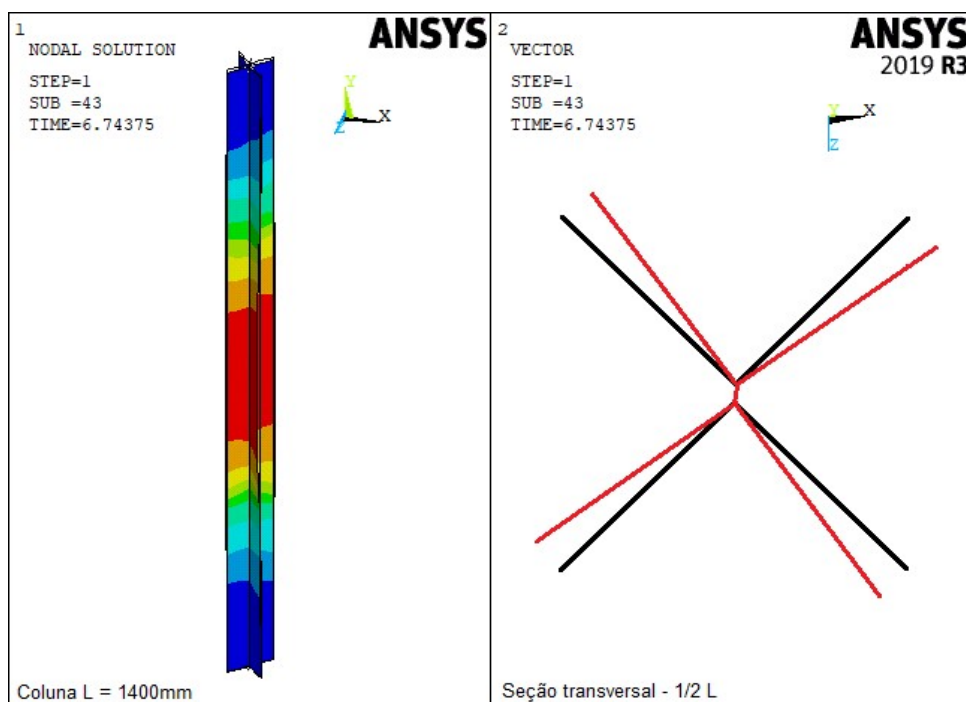


Figura C10 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 3 - 350, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 273,82\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 1400 – 4 – 280
- 1º Modo de Flambagem

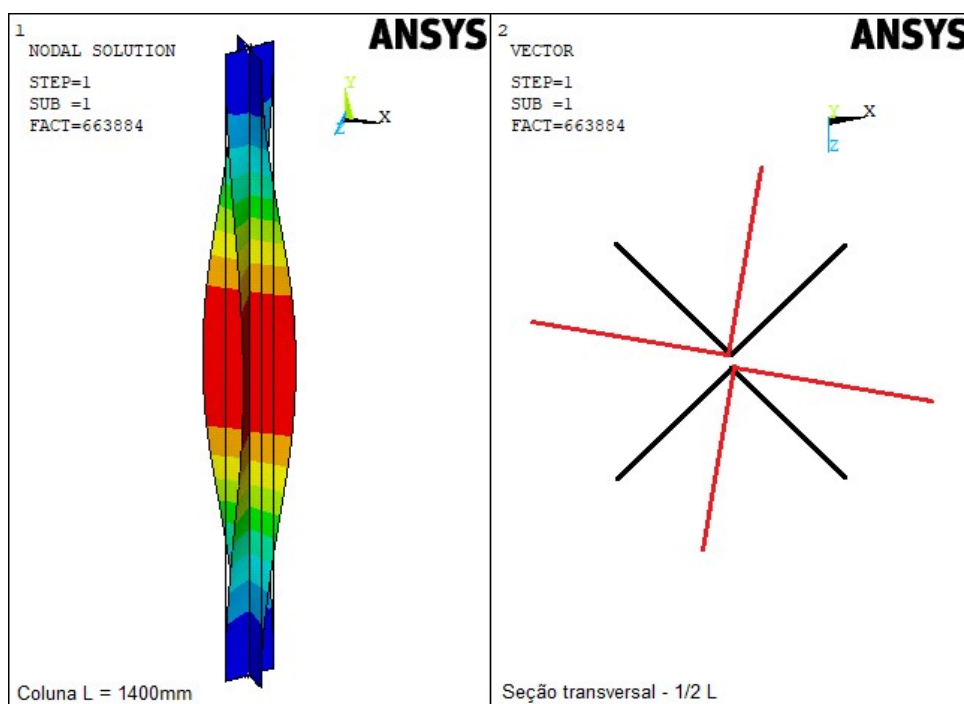


Figura C11 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 4 - 280, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 663,88\text{kN}$.

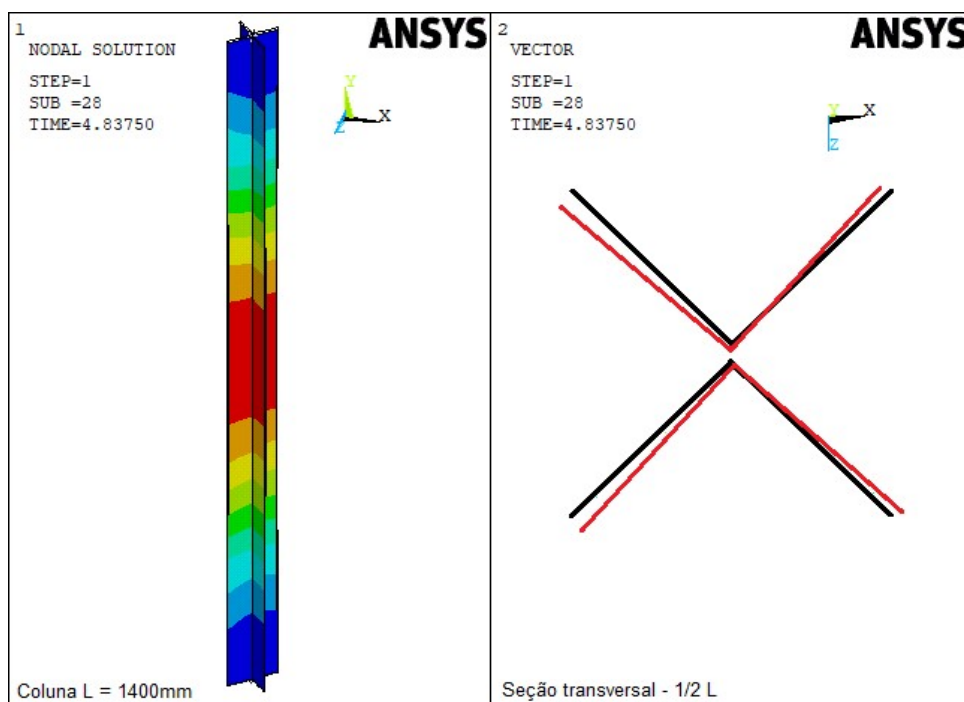


Figura C12 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 4 - 280, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 273,93\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 1400 – 5 – 233
1º Modo de Flambagem

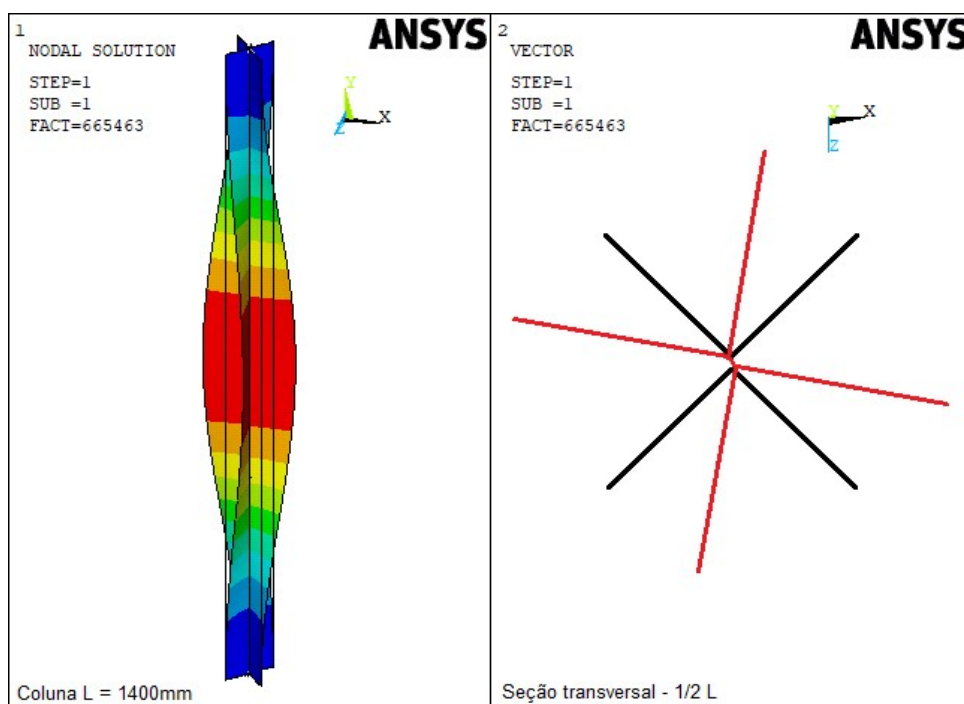


Figura C13 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 5 - 233, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 665,46\text{kN}$.

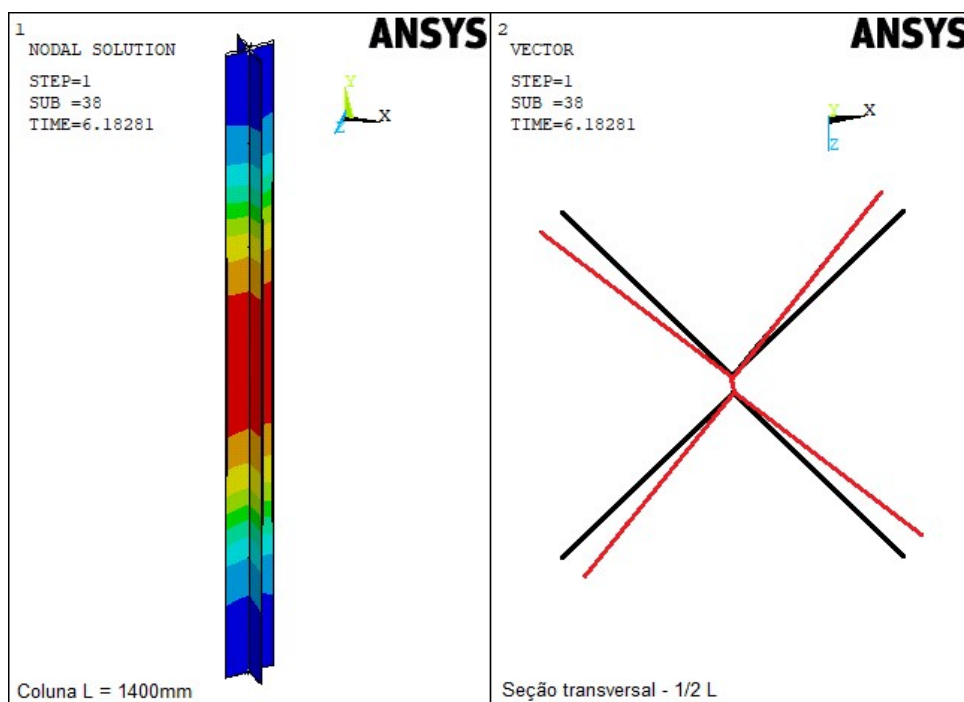


Figura C14 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 5 - 233, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 274,59\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 1400 – 6 – 200
1º Modo de Flambagem

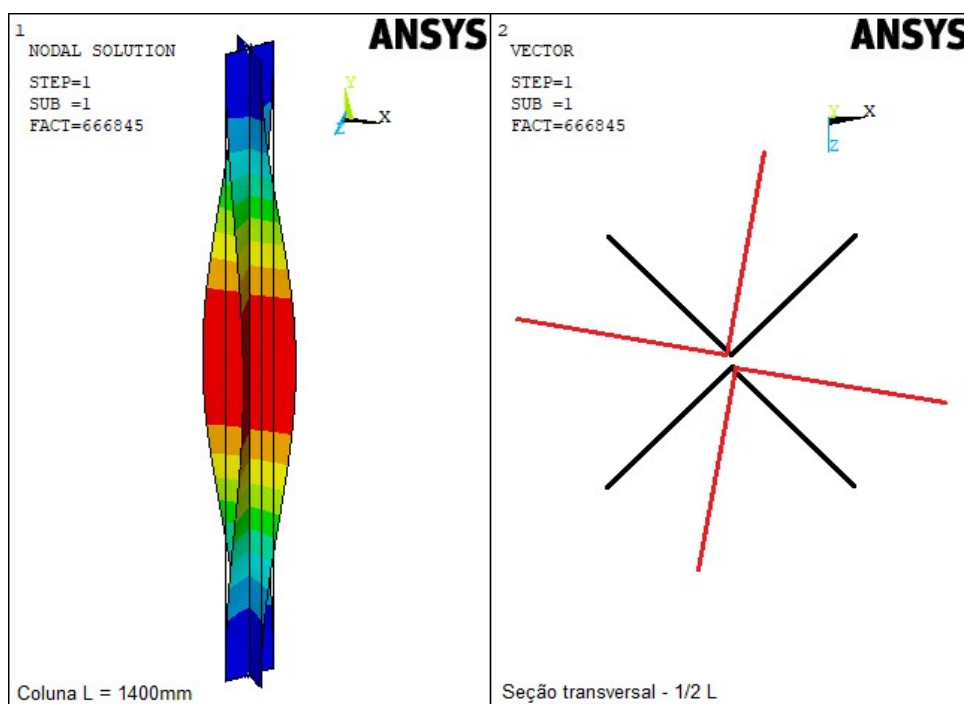


Figura C15 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 6 - 200, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 666,85\text{kN}$.

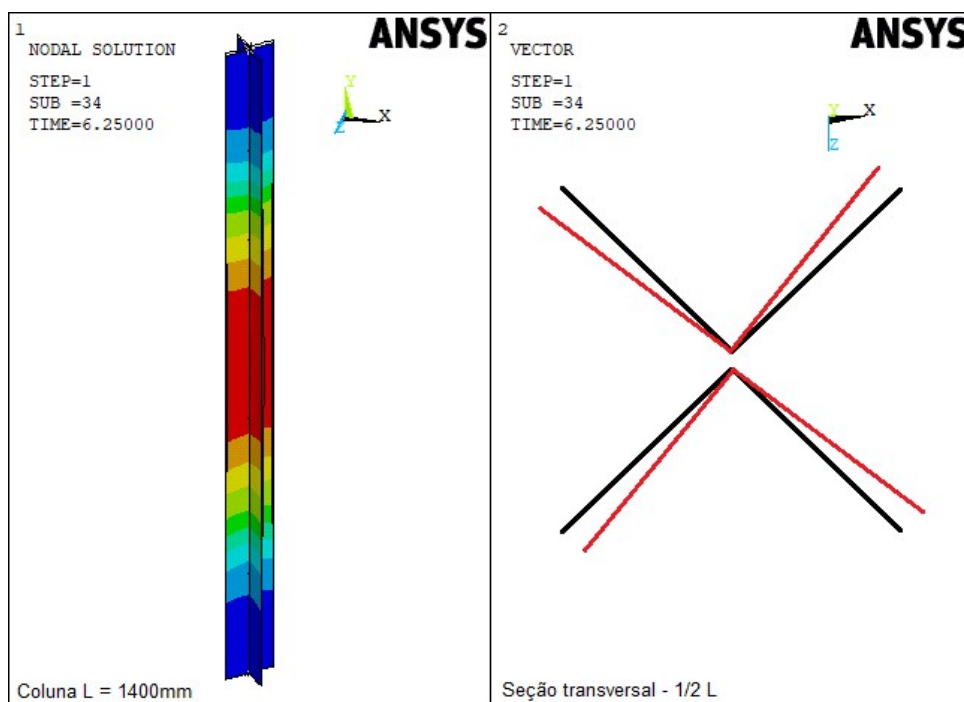


Figura C16 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 6 - 200, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 274,96\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 1400 – 7 – 175
1º Modo de Flambagem

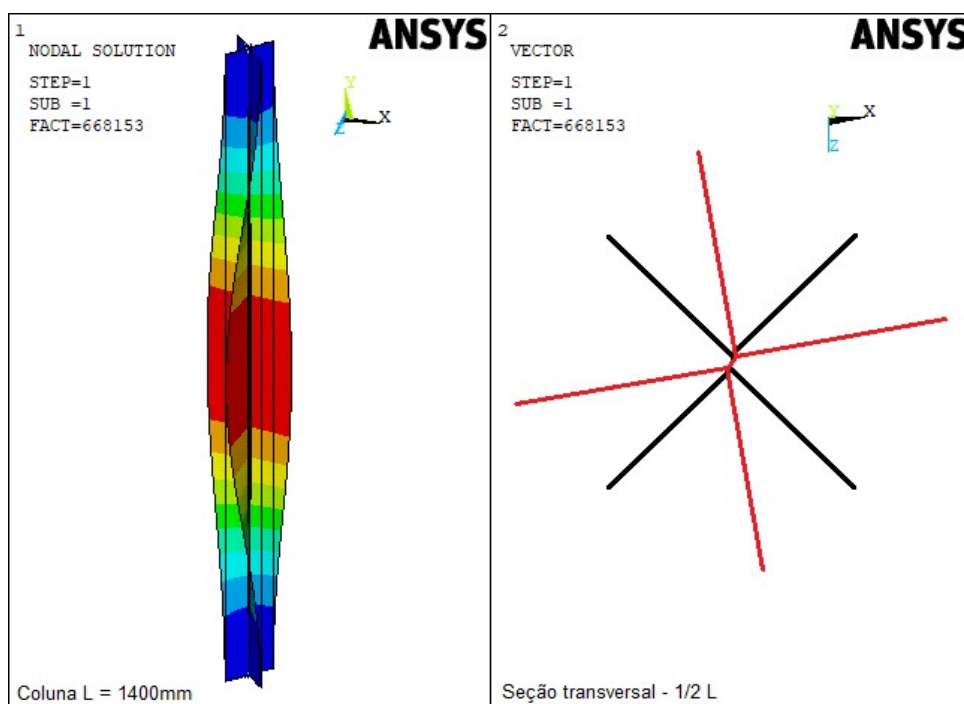


Figura C17 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 7 - 175, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 668,15\text{kN}$.

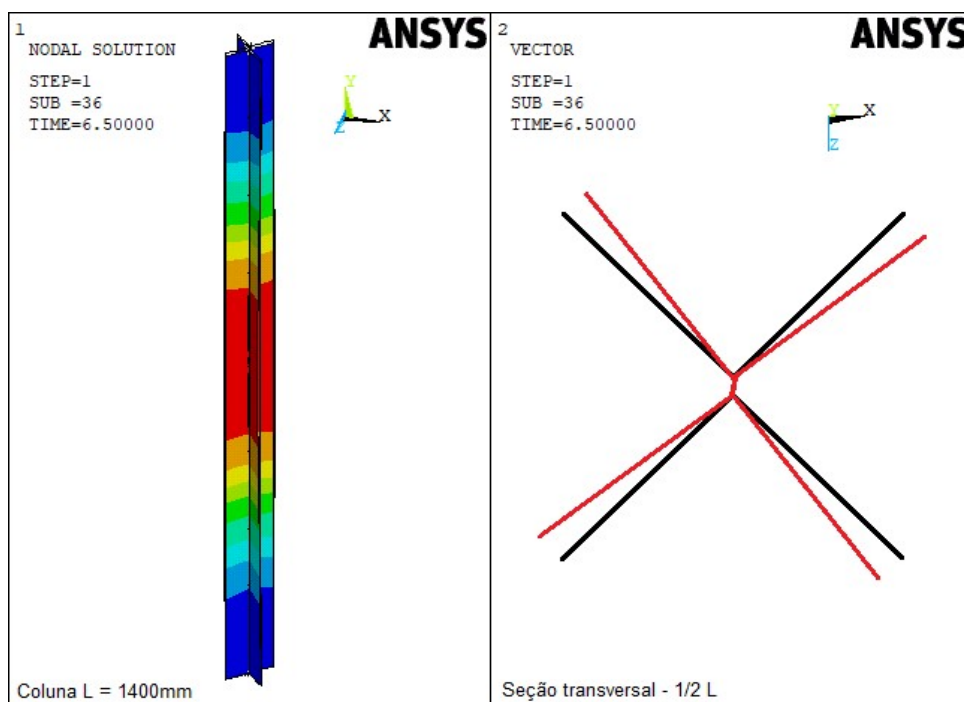


Figura C18 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 1400 - 7 - 175, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 275,94\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 1400
1º Modo de Flambagem

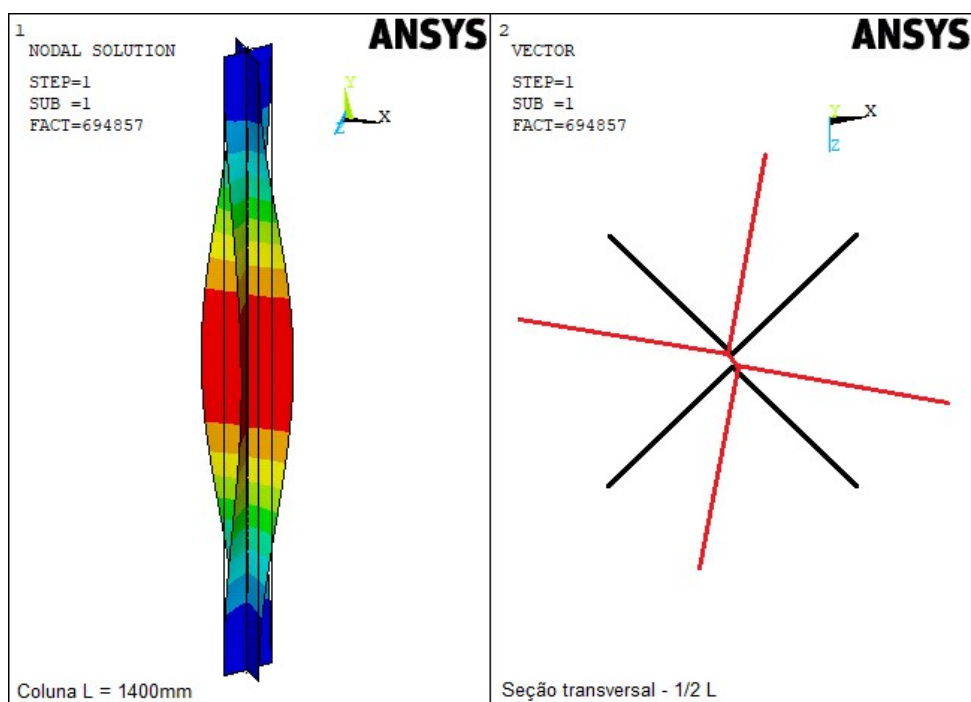


Figura C19 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 1400, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 694,86\text{kN}$.

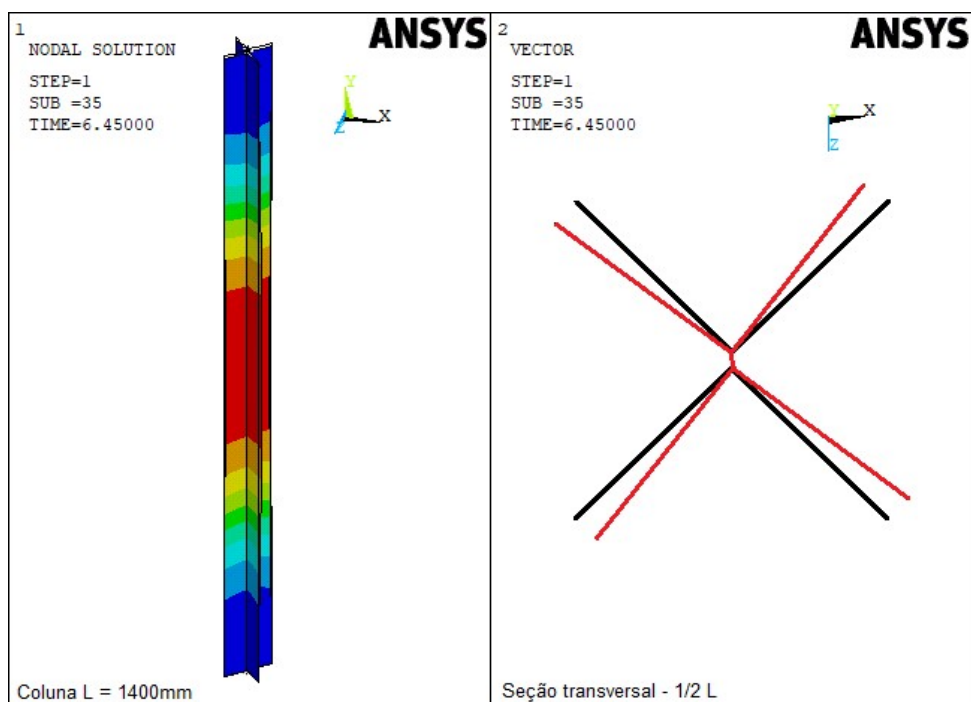


Figura C20 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 1400, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 280,24\text{kN}$.

ANEXO D

Este anexo apresenta todos os modelos numéricos, analisados neste trabalho, referentes as colunas com seção transversal formada por cantoneira com dimensões de 50,8x4,76mm e comprimento de 2200mm.

- SL – 50,8x4,76 – 2200
1º Modo de Flambagem

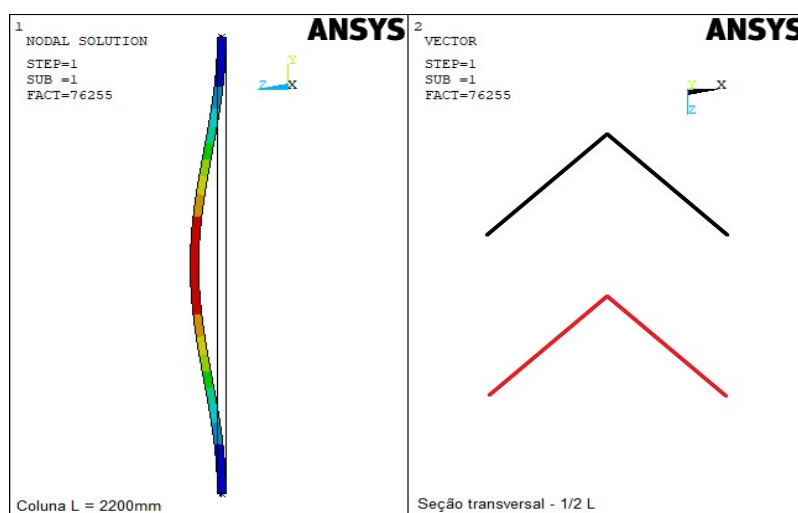


Figura D1 – Análise de flambagem elástica: SL - 50,8x4,76 - 2200, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 76,26\text{kN}$.

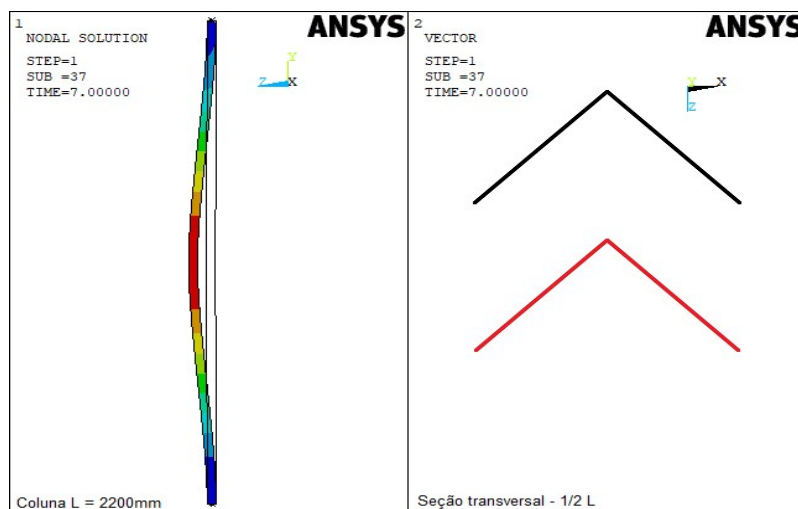


Figura D2 – Análise não linear: SL - 50,8x4,76 - 2200, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 46,73\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 2200 – 0
1º Modo de Flambagem

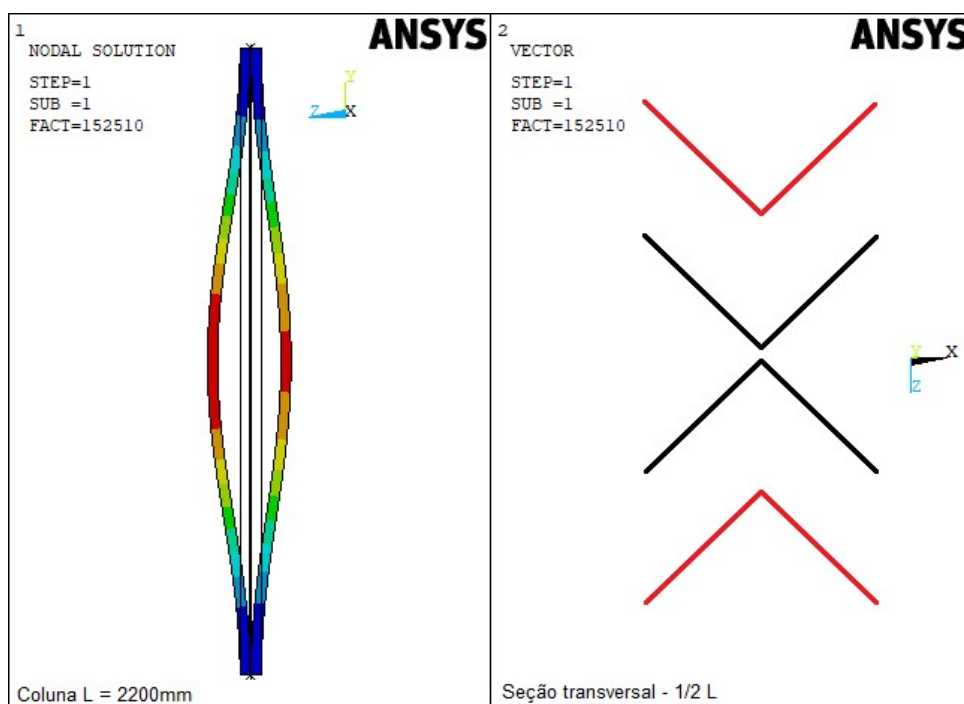


Figura D3 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 0, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 152,51\text{kN}$.

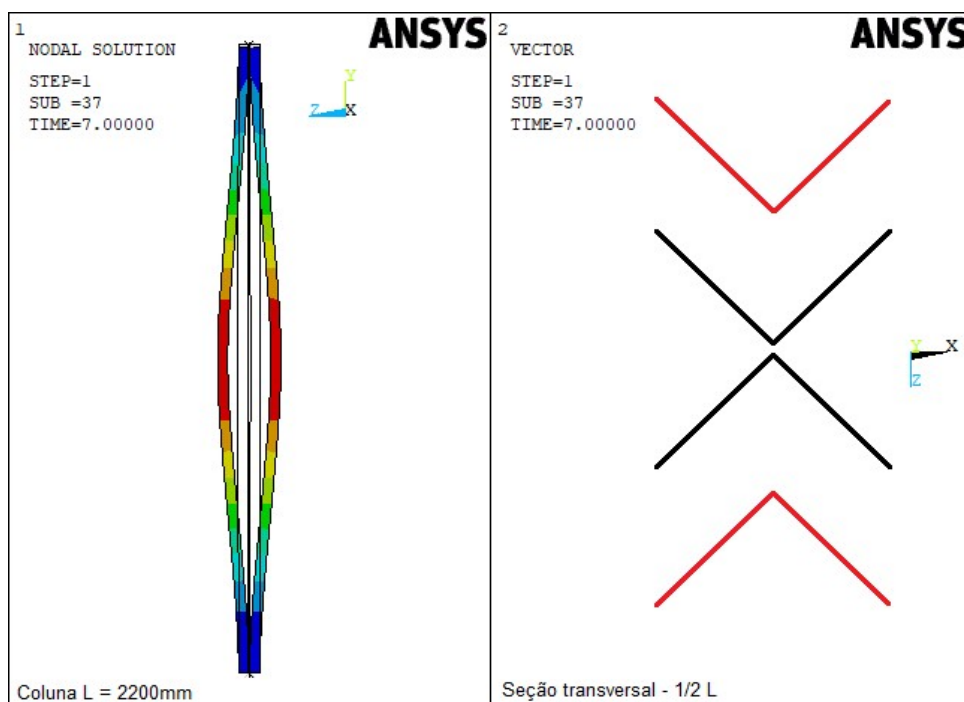


Figura D4 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 0, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 95,33\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 2200 – 1 – 1100
1º Modo de Flambagem

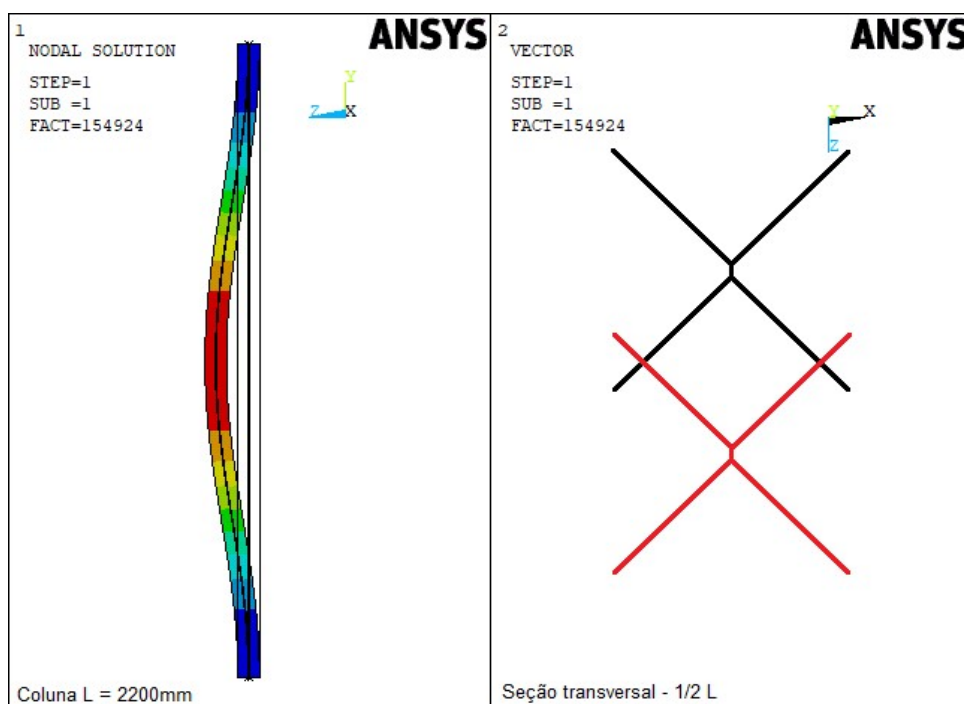


Figura D5 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 1 - 1100, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 154,92\text{kN}$.

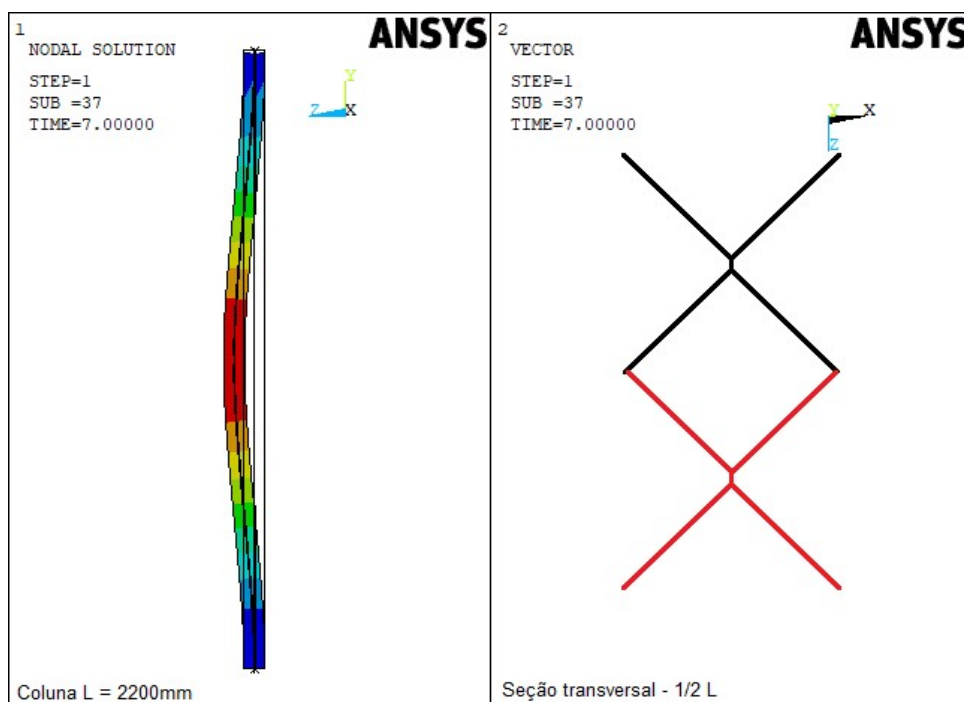


Figura D6 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 1 - 1100, imperfeição geométrica de L/1000 aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 94,43\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 2200 – 2 – 733
1º Modo de Flambagem

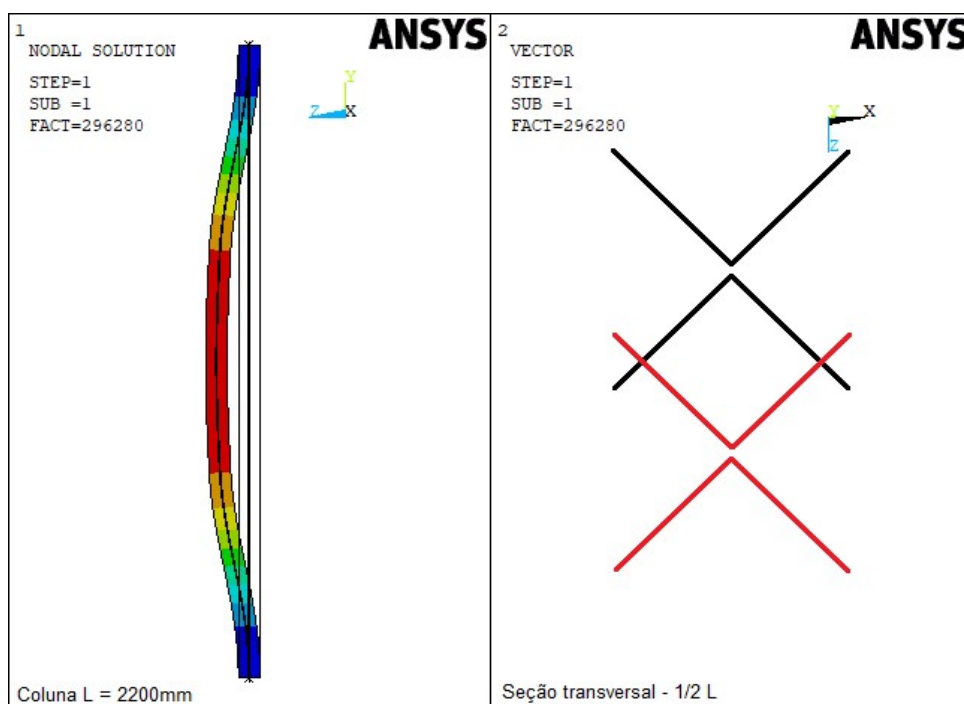


Figura D7 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 2 - 733, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 296,28\text{kN}$.

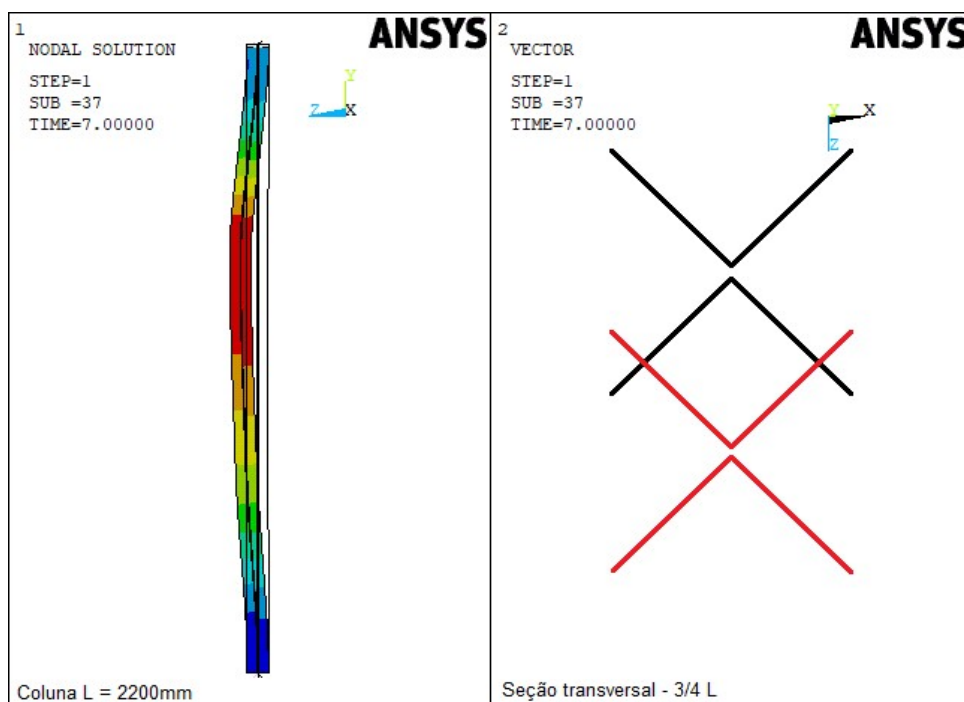


Figura D8 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 2 - 733, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 138,56\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 2200 – 3 – 550
1º Modo de Flambagem

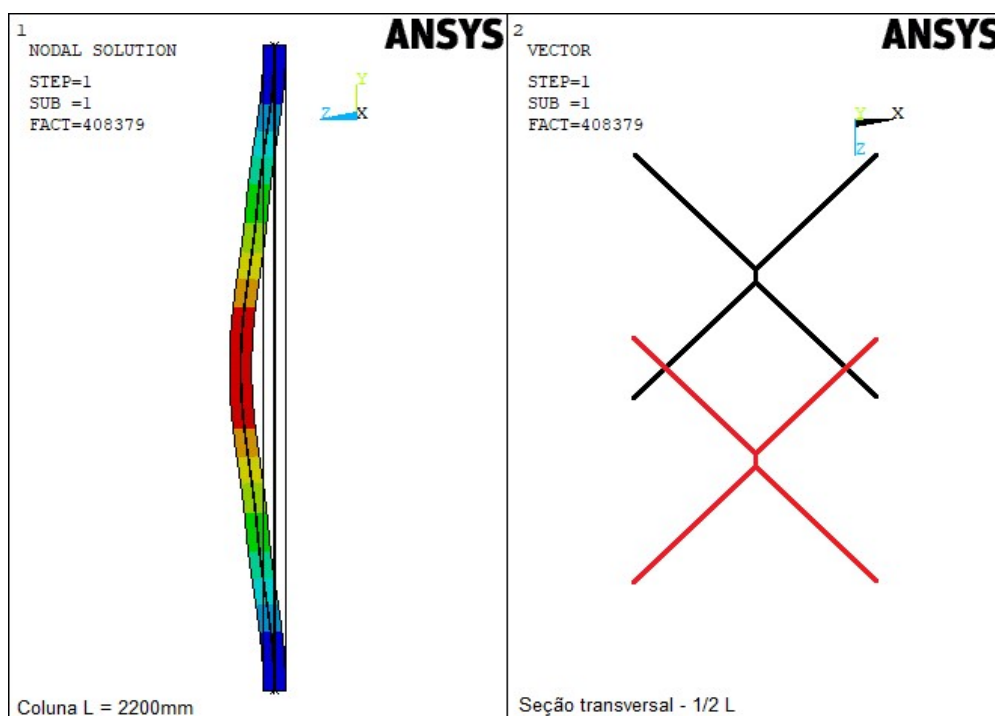


Figura D9 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 3 - 550, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 408,38\text{kN}$.

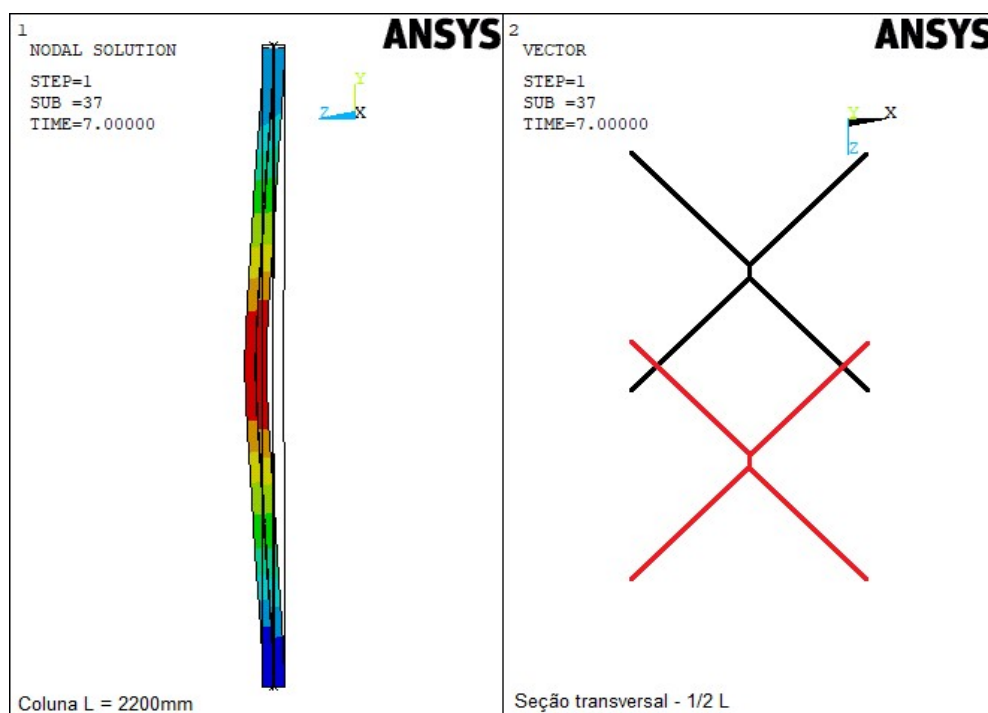


Figura D10 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 3 - 550, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 165,47\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 2200 – 4 – 440
1º Modo de Flambagem

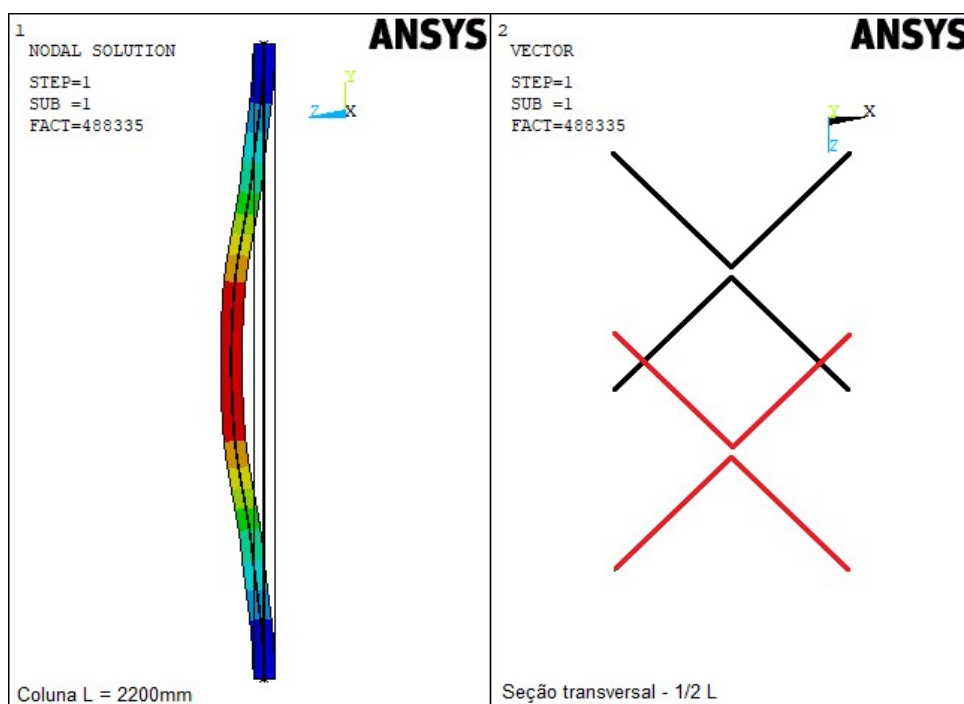


Figura D11 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 4 - 440, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 488,34\text{kN}$.

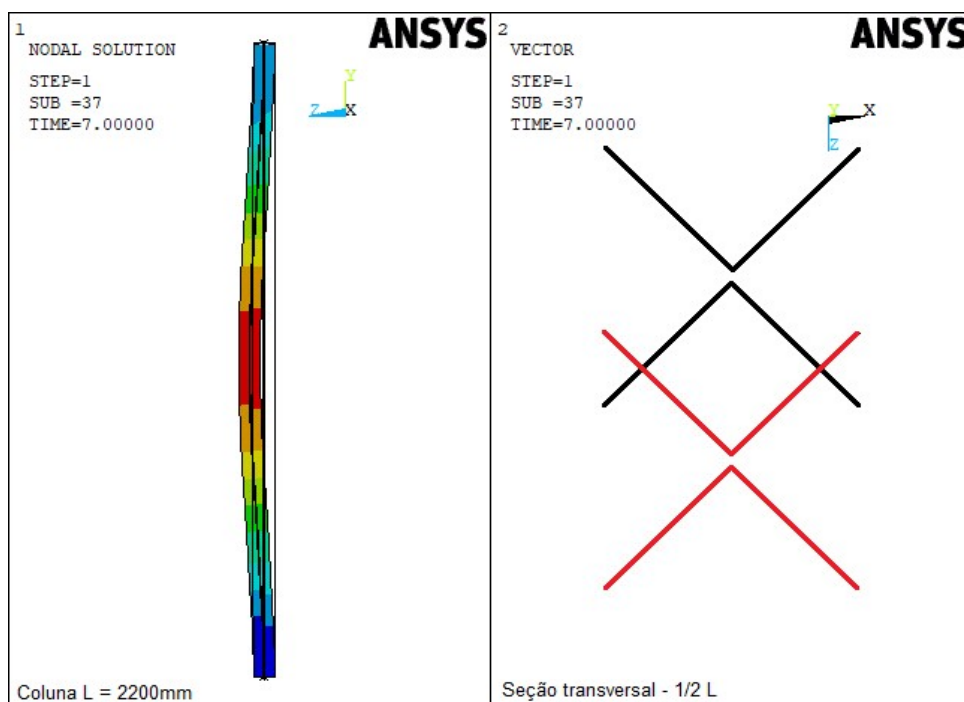


Figura D12 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 4 - 440, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 177,70\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 2200 – 5 – 367
- 1º Modo de Flambagem

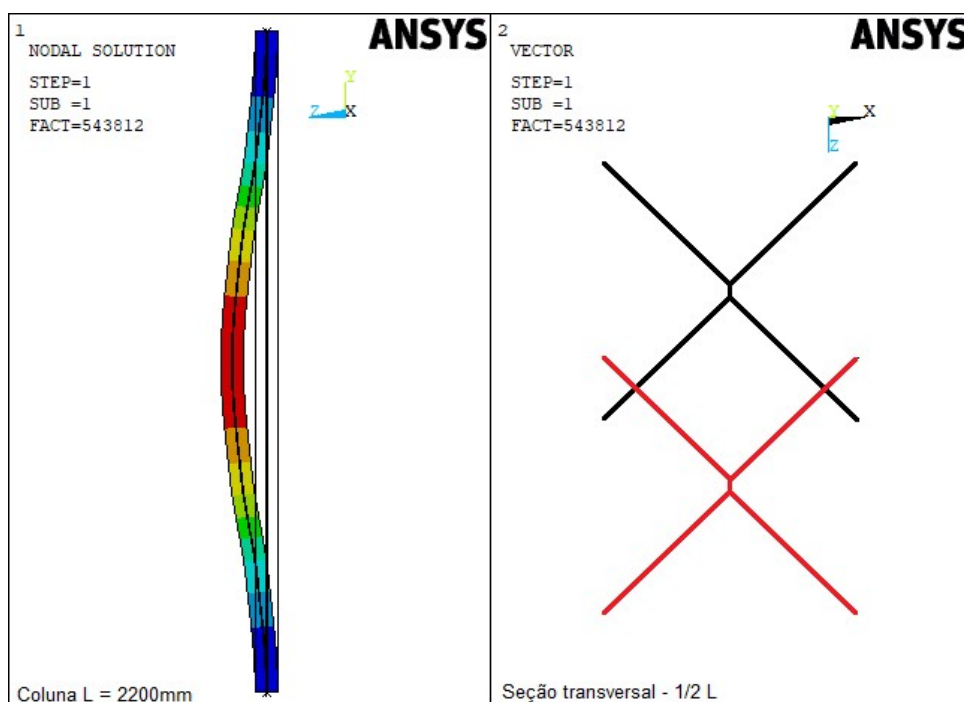


Figura D13 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 5 - 367, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 543,81\text{kN}$.

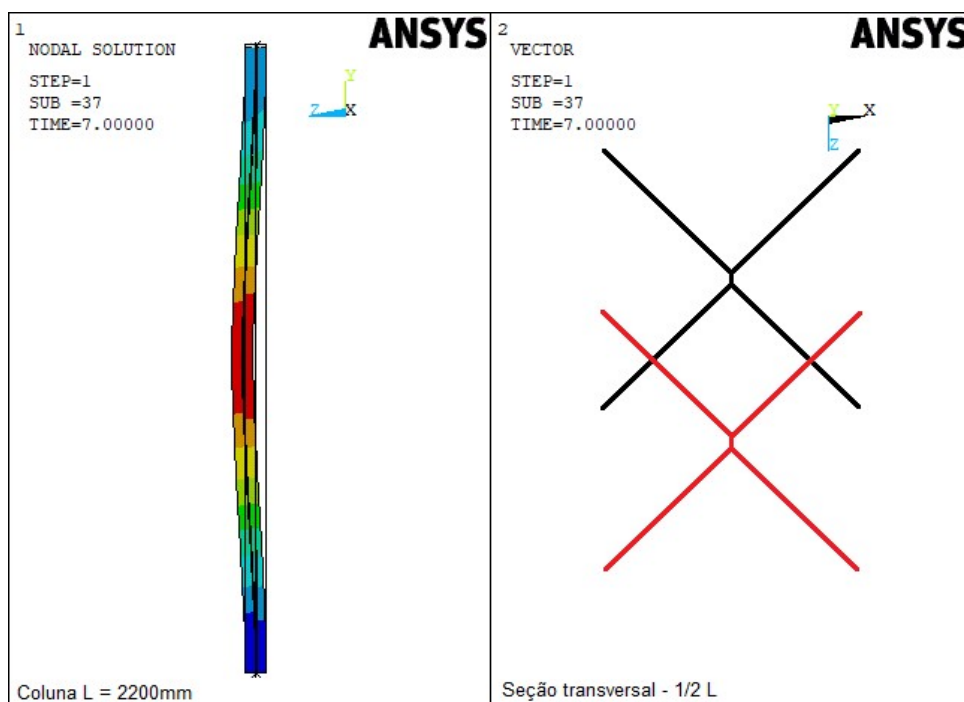


Figura D14 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 5 - 367, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 185,42\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 2200 – 6 – 314
1º Modo de Flambagem

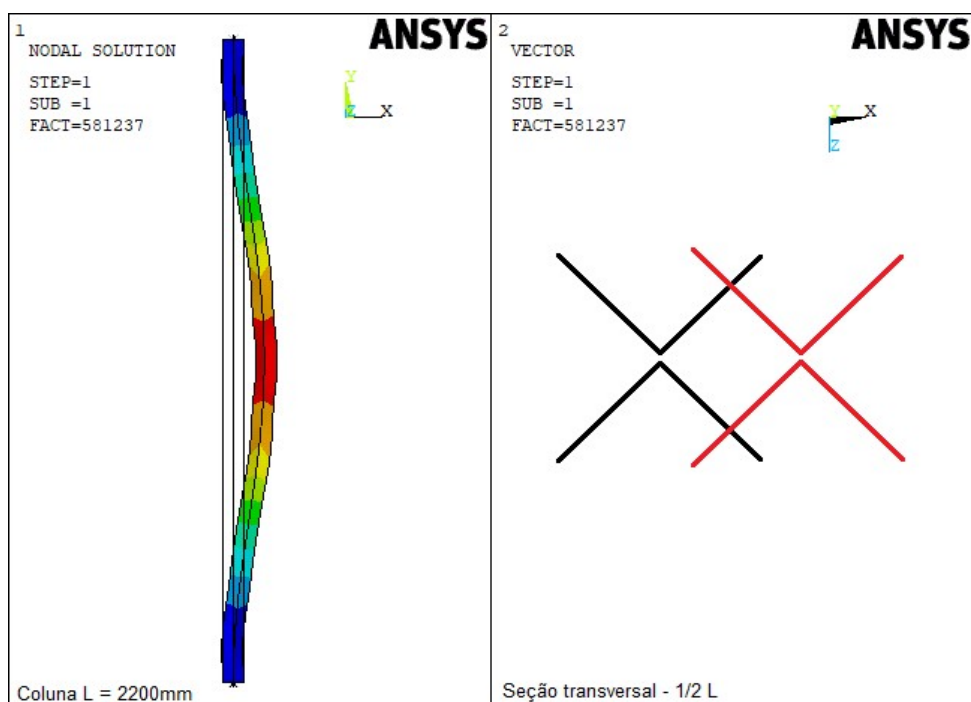


Figura D15 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 6 - 314, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 581,24\text{kN}$.

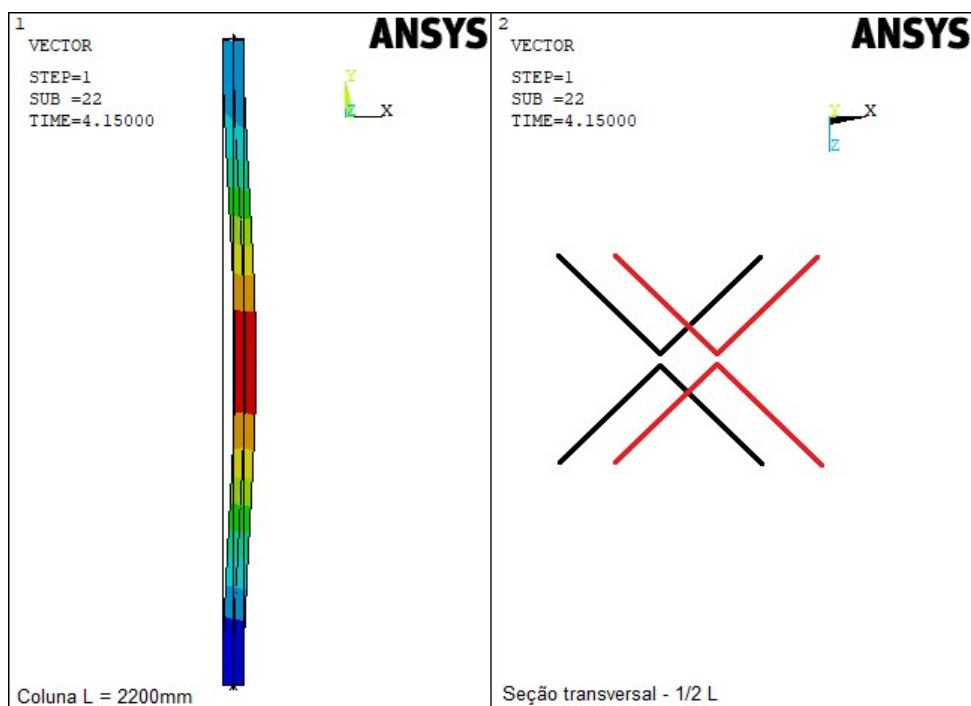


Figura D16 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 6 - 314, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 190,56\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 2200 – 7 – 275
1º Modo de Flambagem

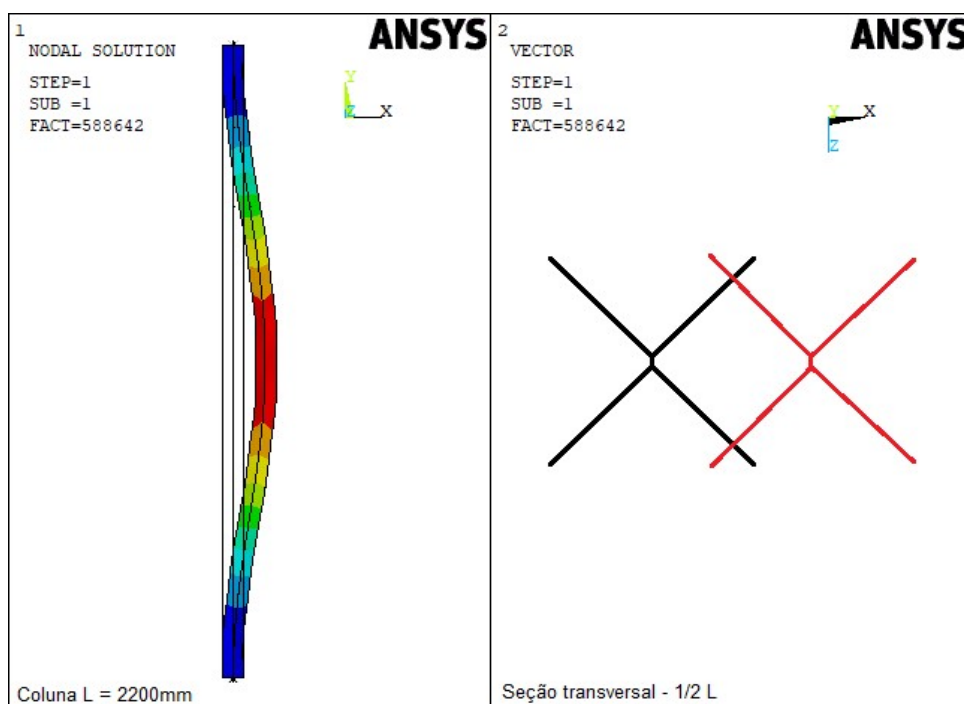


Figura D17 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 7 - 275, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 588,64\text{kN}$.

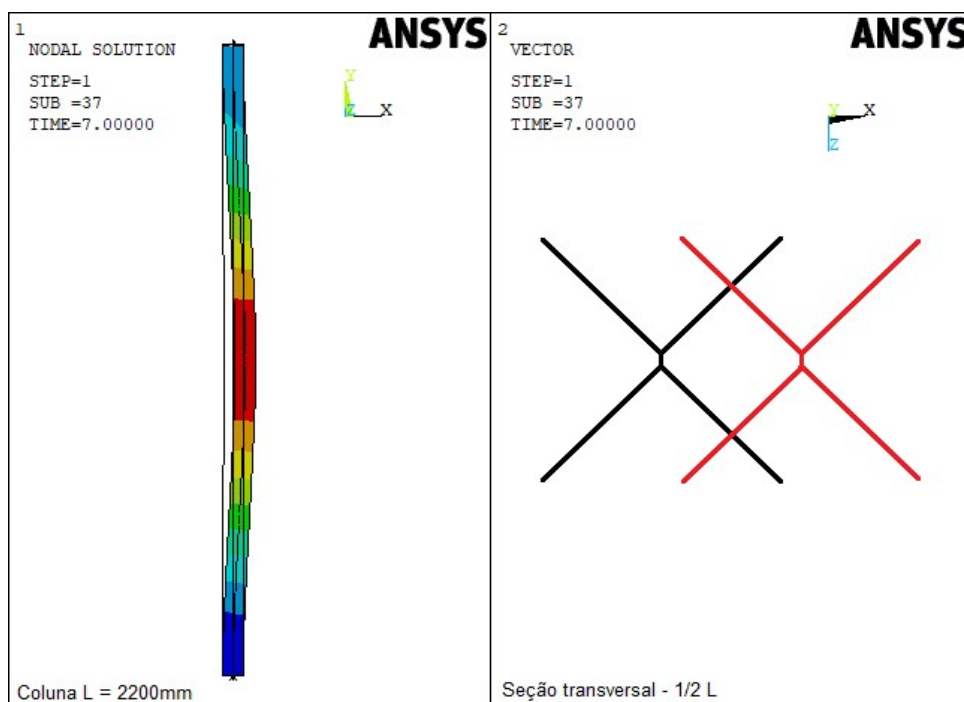


Figura D18 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 2200 - 7 - 275, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 190,34\text{kN}$.

- DL – 50,8x4,76 – 2200
1º Modo de Flambagem

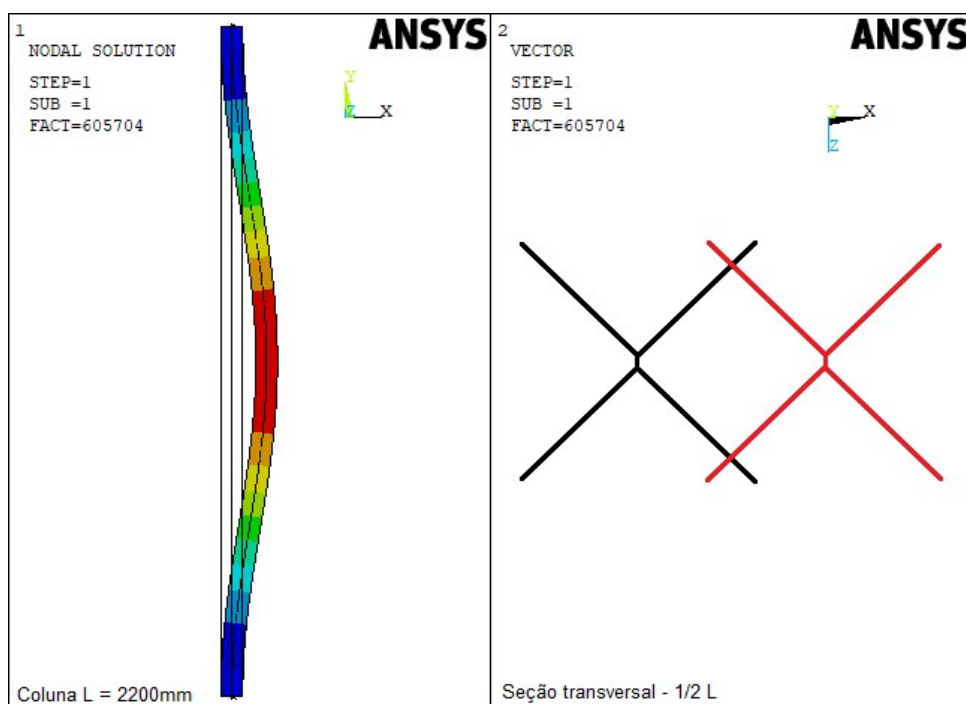


Figura D19 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x4,76 - 2200, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 605,70\text{kN}$.

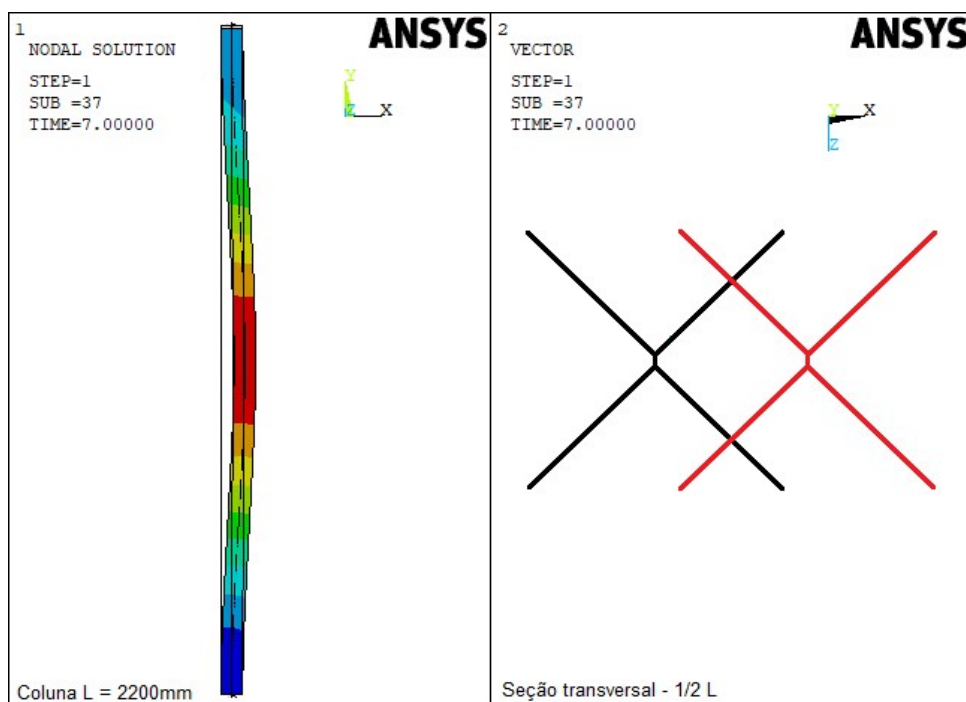


Figura D20 – Análise não linear: DL - 50,8x4,76 - 2200, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 190,49\text{kN}$.

ANEXO E

Este anexo apresenta todos os modelos numéricos, analisados neste trabalho, referentes as colunas com seção transversal formada por cantoneira com dimensões de 50,8x6,35mm e comprimento de 900mm.

- SL – 50,8x6,35 – 900
1° Modo de Flambagem

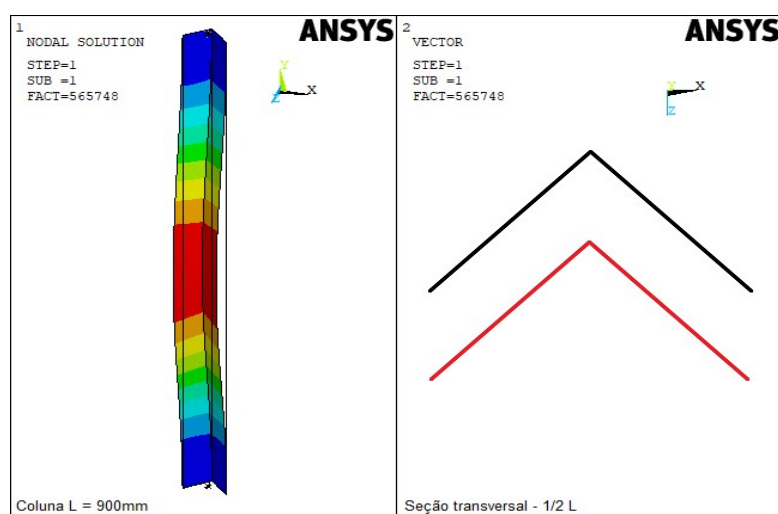


Figura E1 – Análise de flambagem elástica: SL - 50,8x6,35 - 900, 1° modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 565,75\text{kN}$.

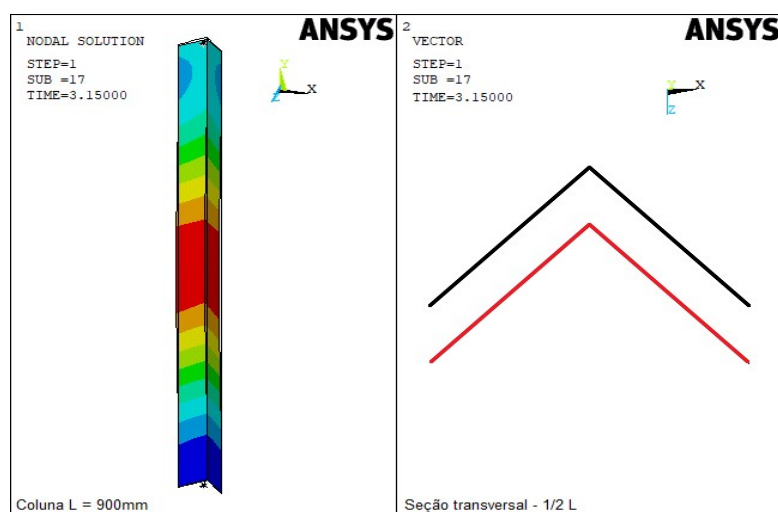


Figura E2 – Análise não linear: SL - 50,8x6,35 – 900, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1° modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 139,46\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 900 – 0
1º Modo de Flambagem

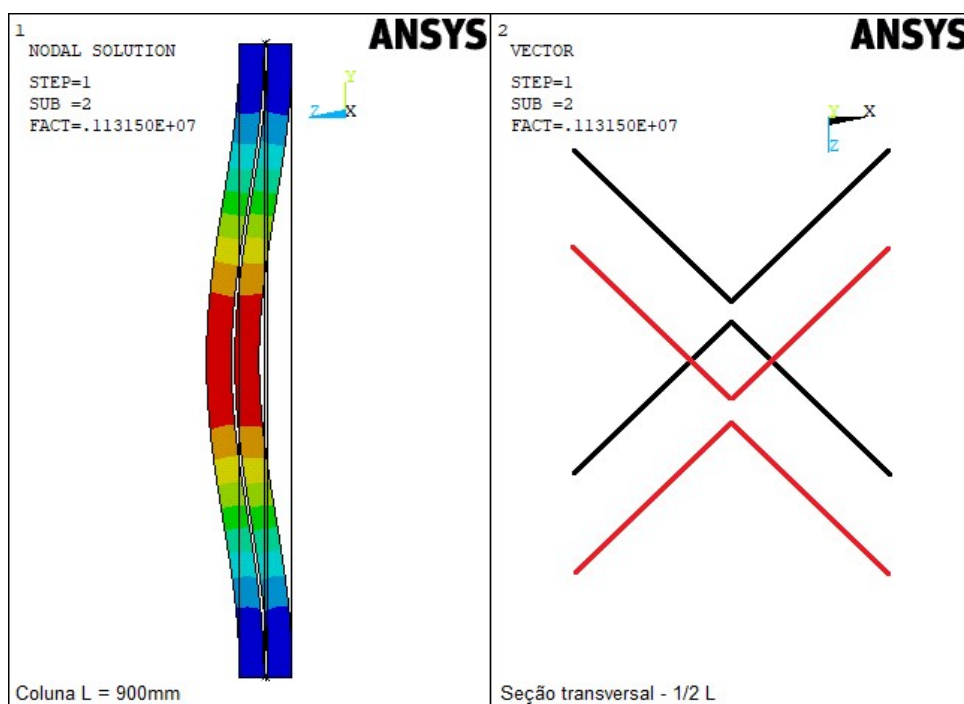


Figura E3 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 900, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1131,50\text{kN}$.

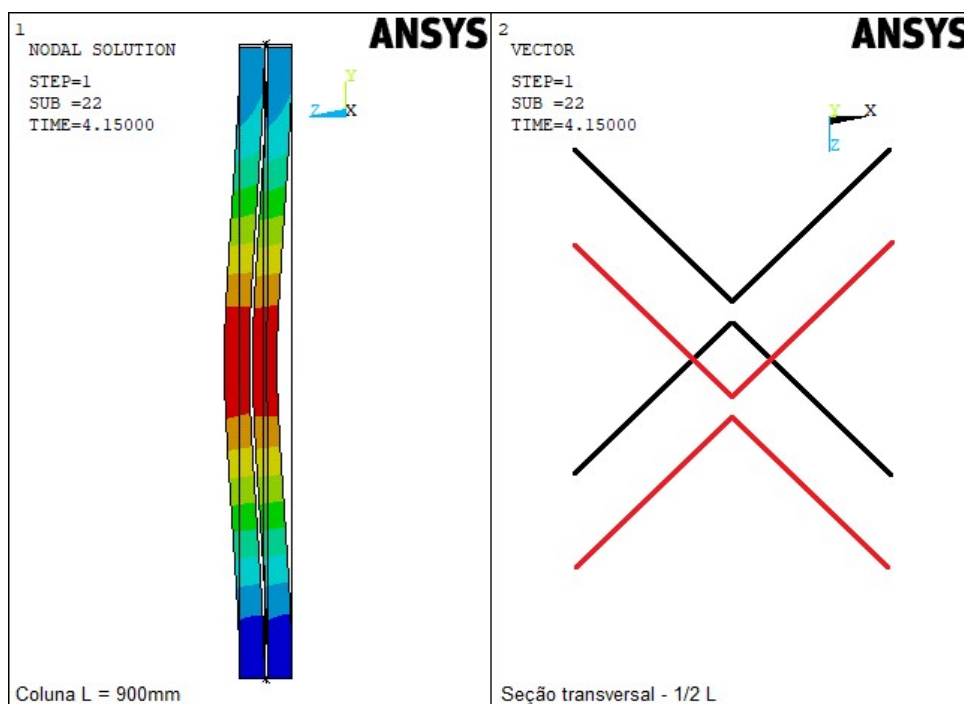


Figura E4 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 – 900, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 279,06\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 900 – 1 – 450
1º Modo de Flambagem

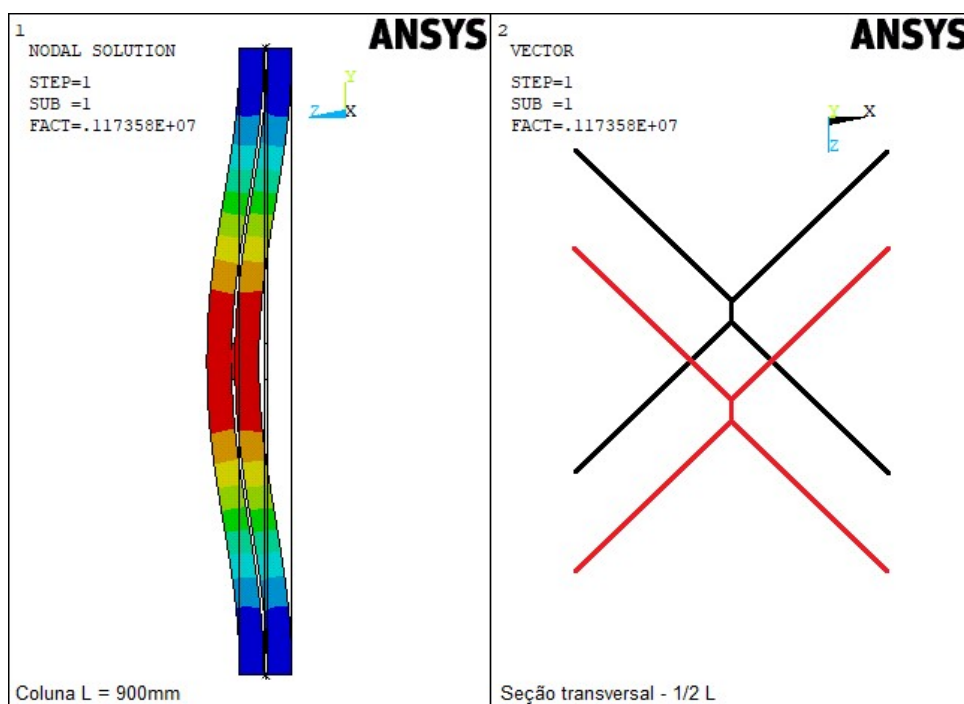


Figura E5 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 900 - 1 - 450, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1173,58\text{kN}$.

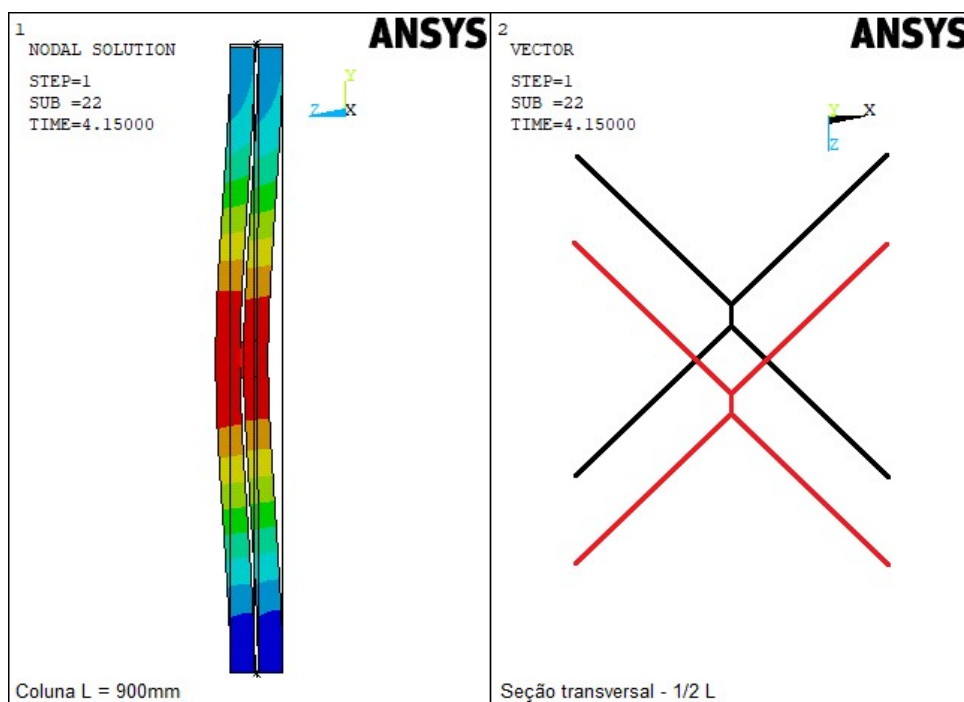


Figura E6 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 900 - 1 - 450, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 283,03\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 900 – 2 – 300
1º Modo de Flambagem

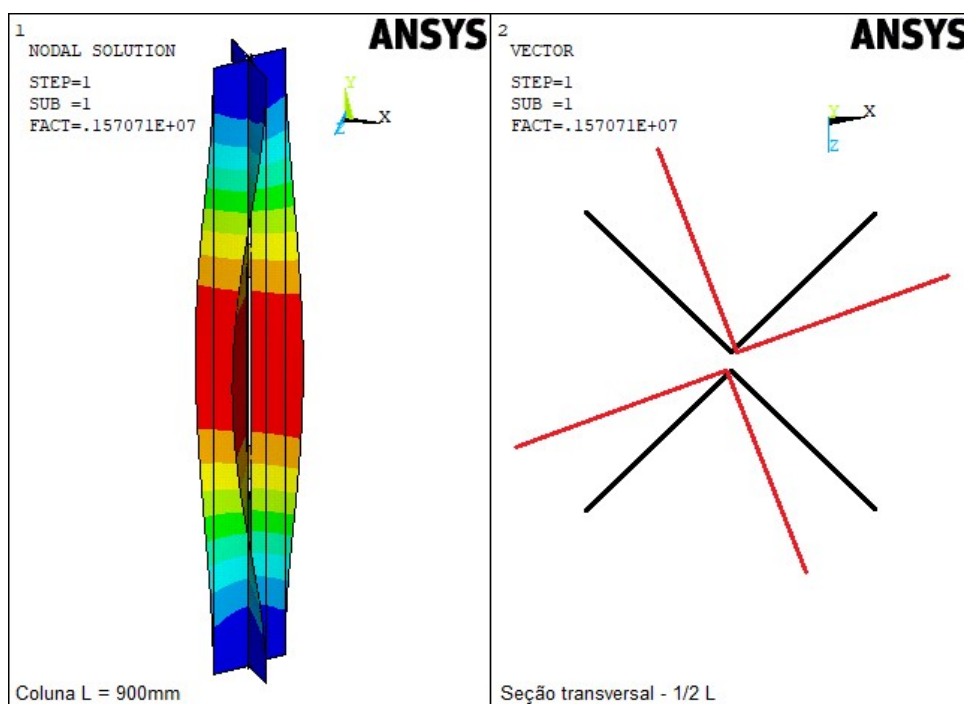


Figura E7 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 900 - 2 - 300, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1570,71kN$.

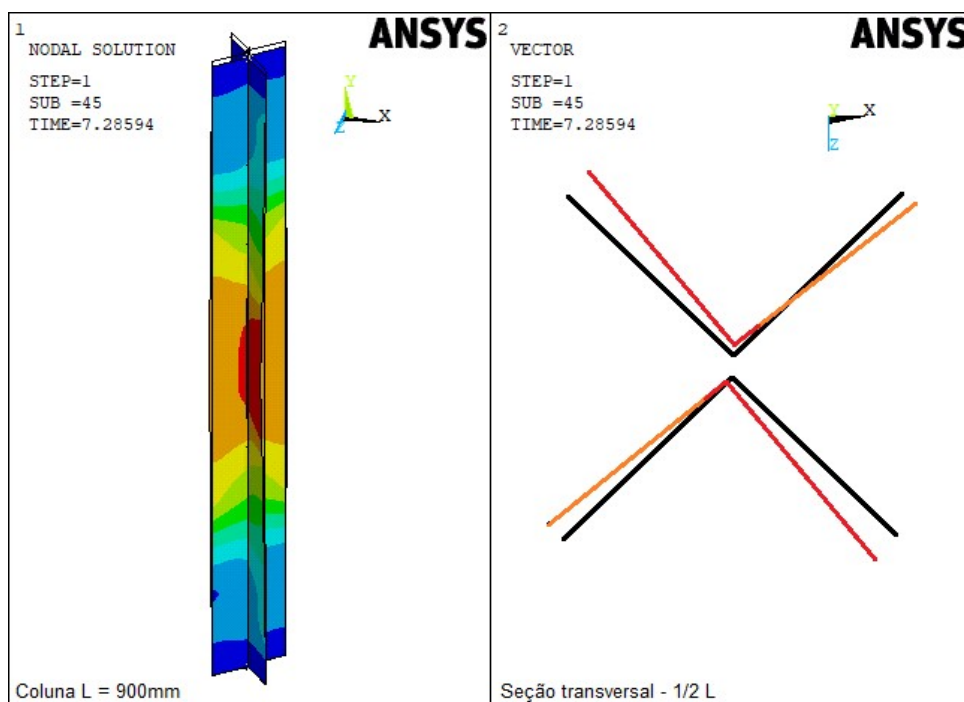


Figura E8 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 900 - 2 - 300, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 376,10kN$.

- DL – 50,8x6,35 – 900 – 3 – 225
1º Modo de Flambagem

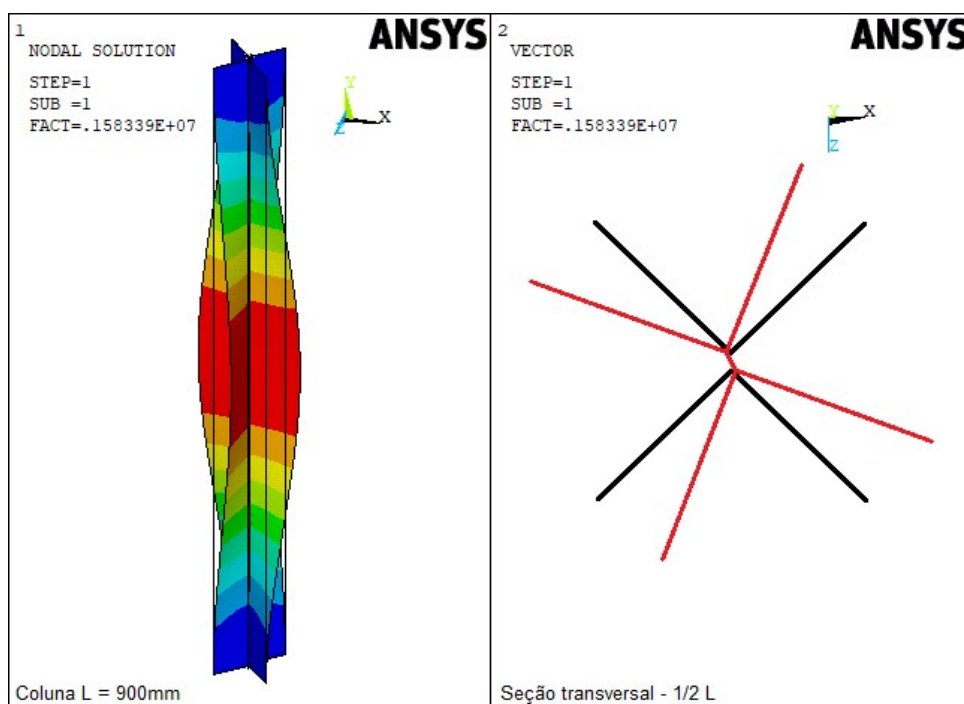


Figura E9 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 900 - 3 - 225, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1583,39\text{kN}$.

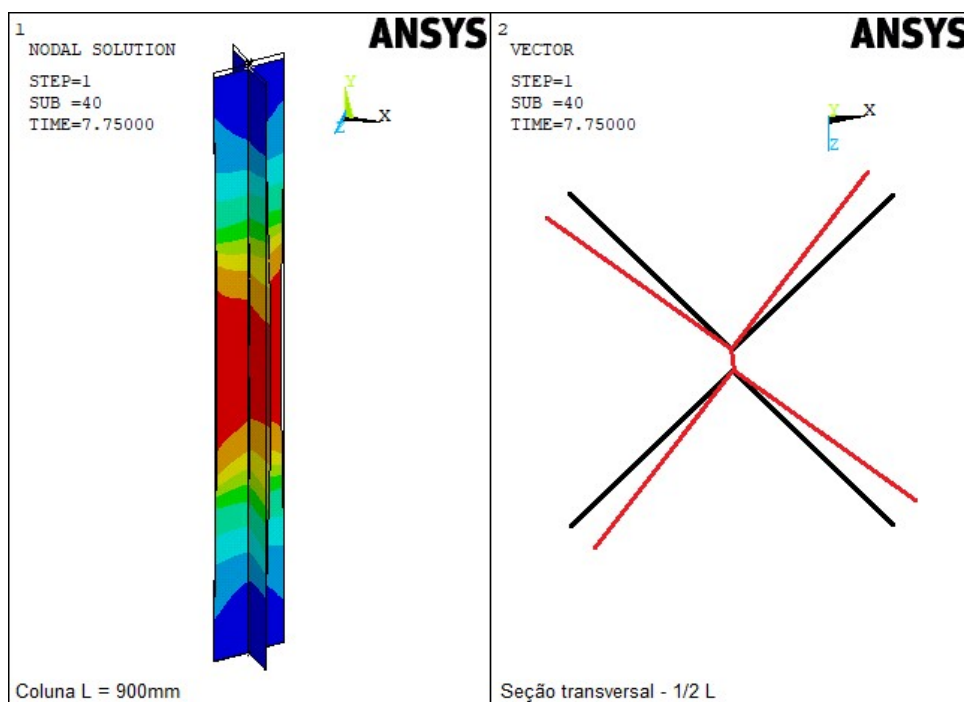


Figura E10 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 900 - 3 - 225, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 383,26\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 900 – 4 – 180
1º Modo de Flambagem

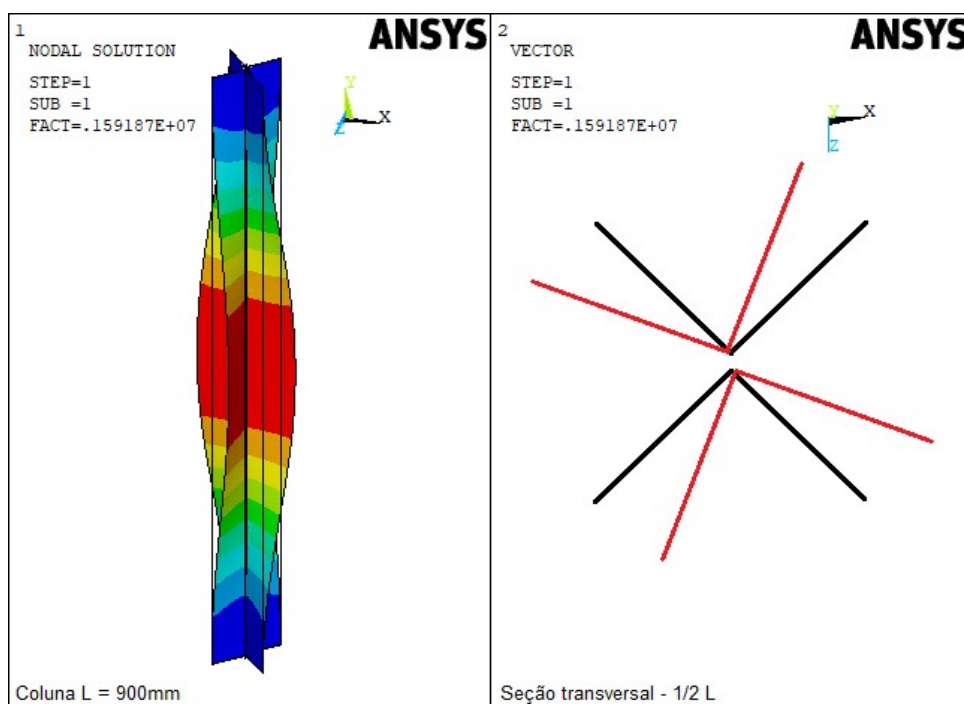


Figura E11 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 900 - 4 - 180, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1591,87\text{kN}$.

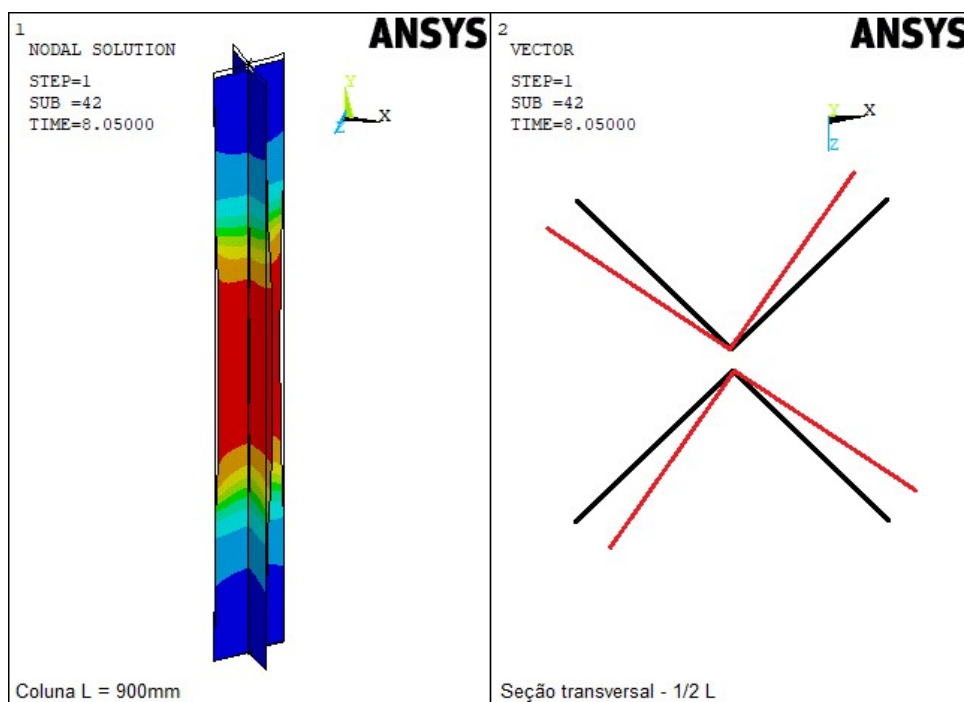


Figura E12 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 900 - 4 - 180, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 383,69\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 900 – 5 – 150
1º Modo de Flambagem

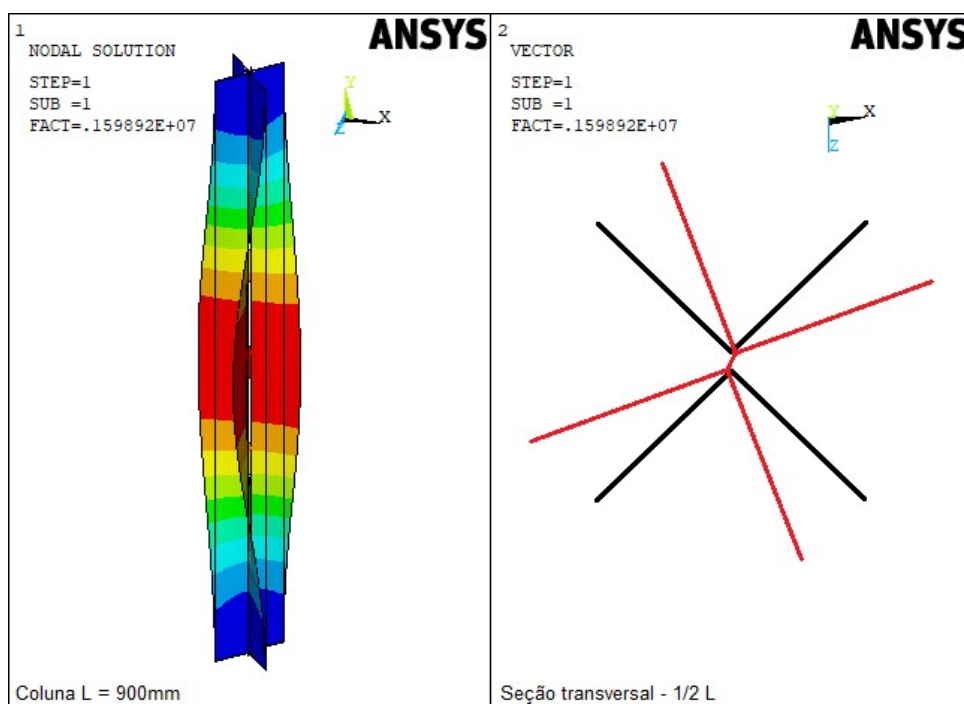


Figura E13 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 900 - 5 - 150, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1598,92\text{kN}$.

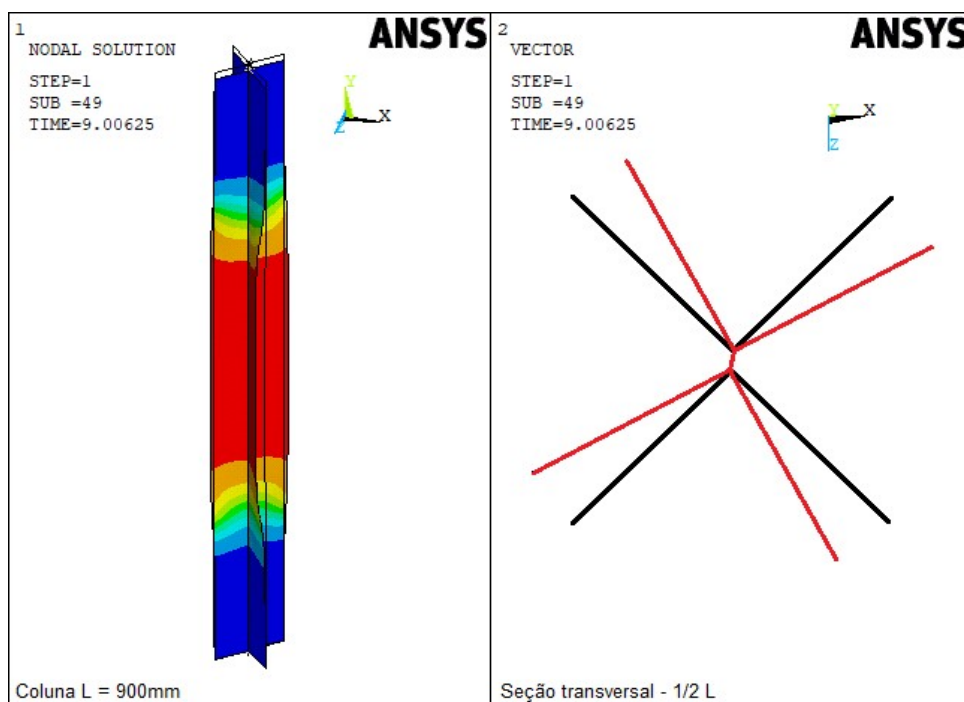


Figura E14 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 900 - 5 - 150, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 384,30\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 900 – 6 – 128
1º Modo de Flambagem

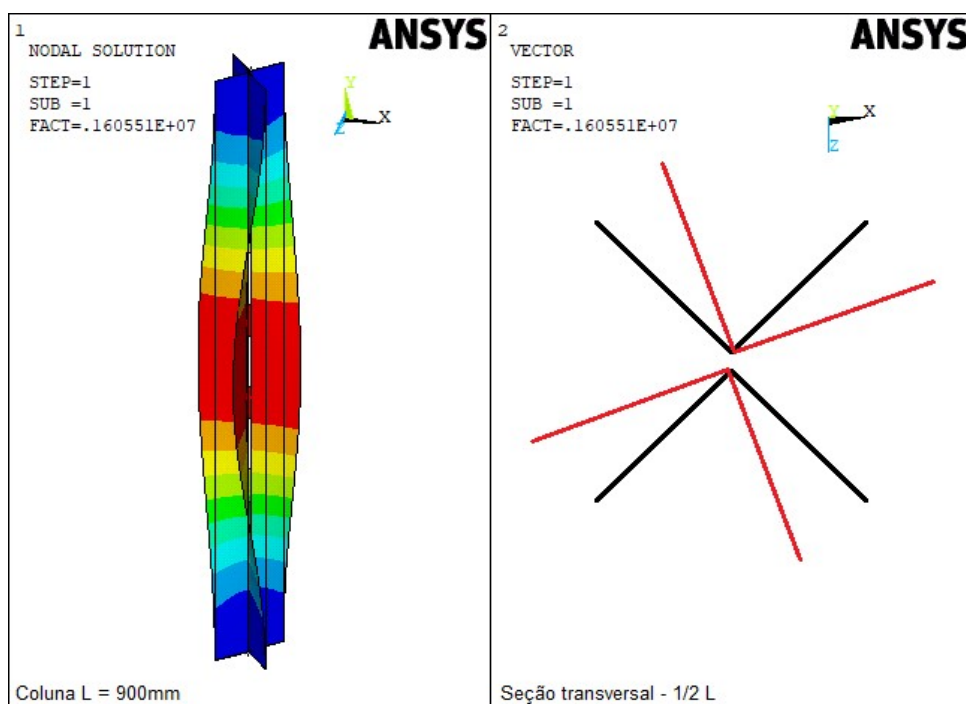


Figura E15 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 900 - 6 - 128, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1605,51\text{kN}$.

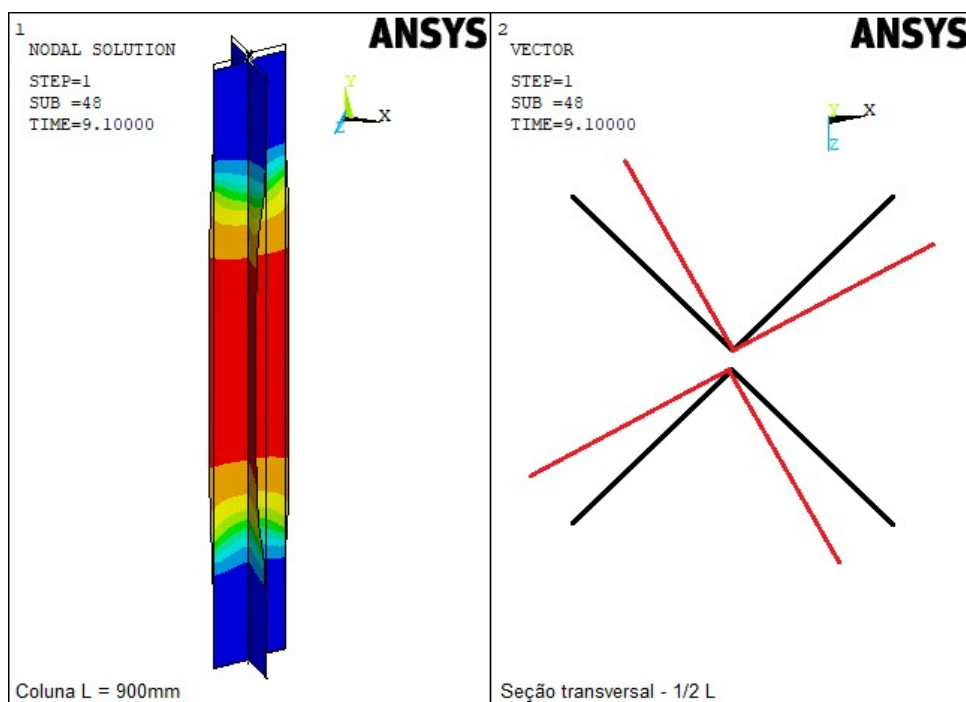


Figura E16 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 900 - 6 - 128, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 385,51\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 900 – 7 – 112
1º Modo de Flambagem

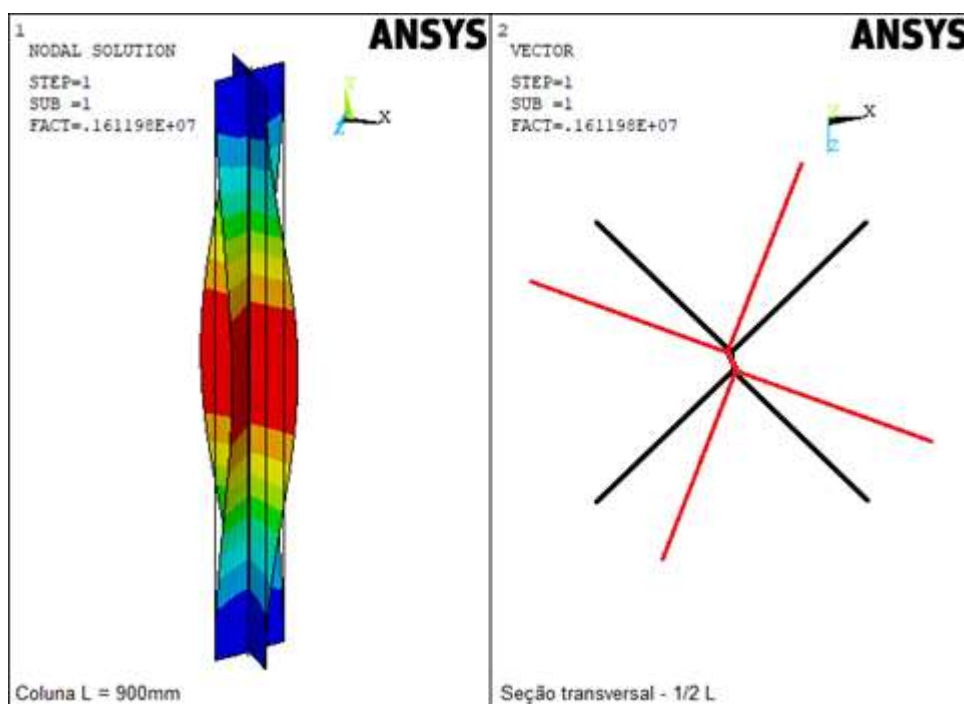


Figura E17 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 900 - 7 - 112, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1611,98\text{kN}$.

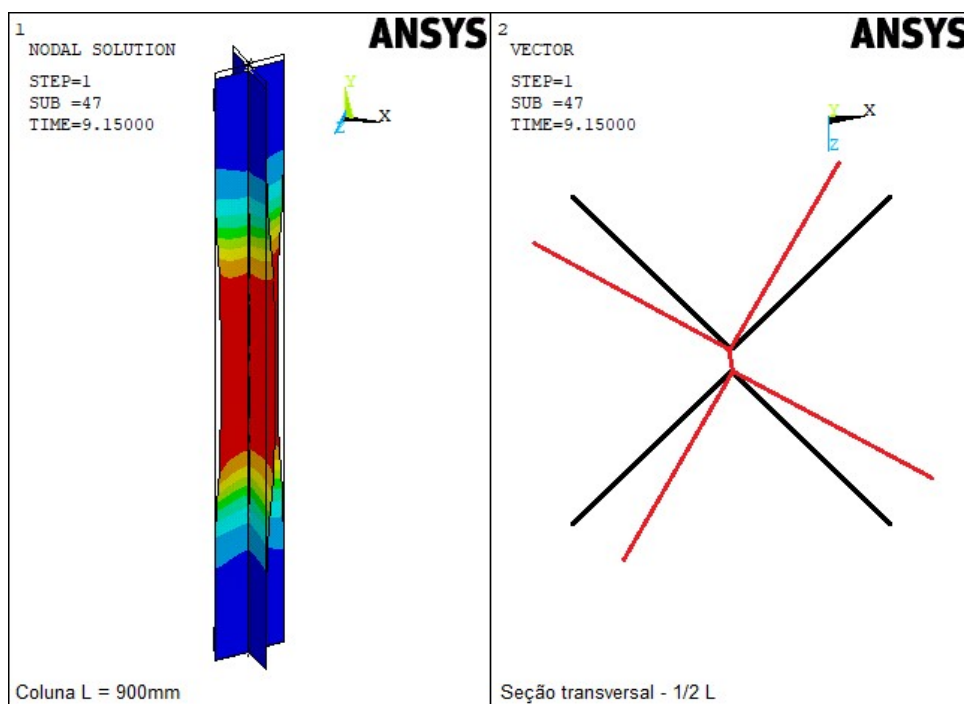


Figura E18 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 900 - 7 - 112, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 386,54\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 900
1º Modo de Flambagem

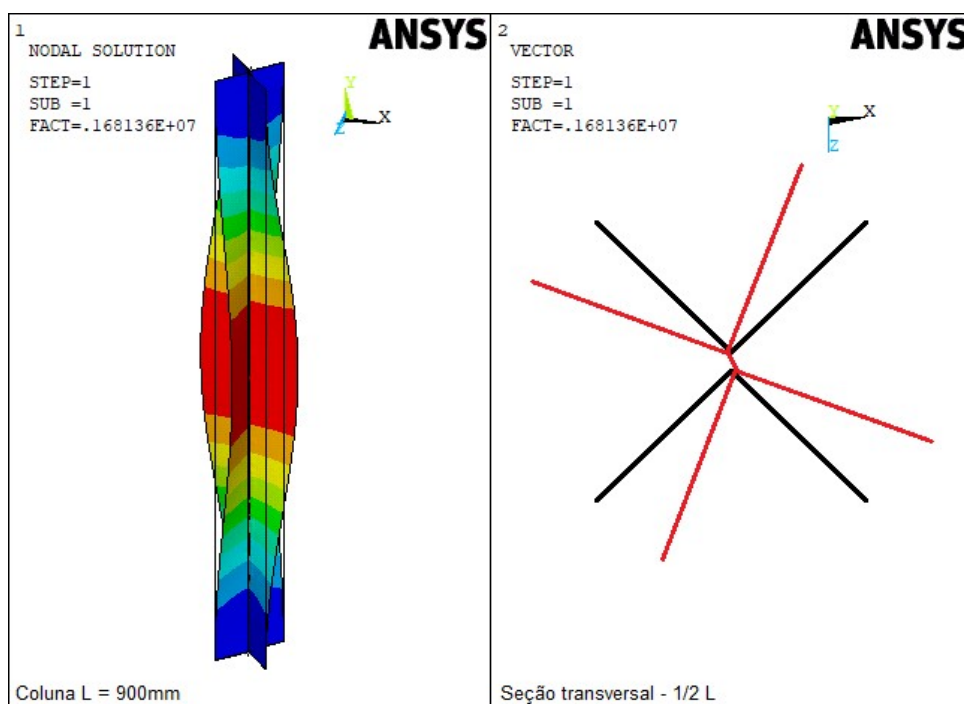


Figura E19 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 900, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1681,36\text{kN}$.

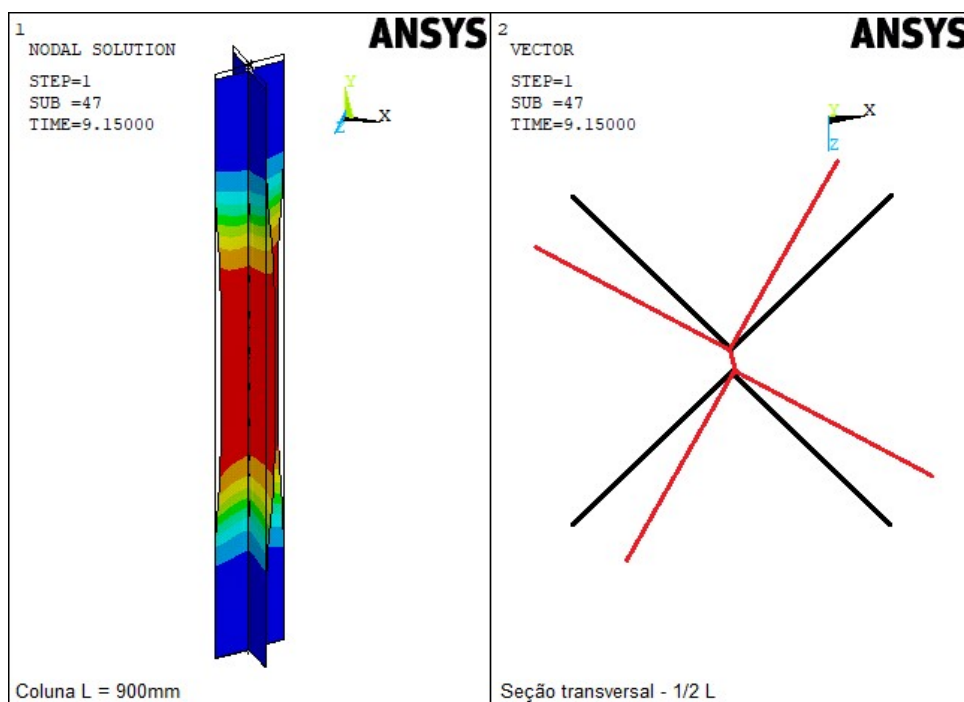


Figura E20 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 900, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 393,00\text{kN}$.

ANEXO F

Este anexo apresenta todos os modelos numéricos, analisados neste trabalho, referentes as colunas com seção transversal formada por cantoneira com dimensões de 50,8x6,35mm e comprimento de 1400mm.

- SL – 50,8x6,35 – 1400
1º Modo de Flambagem

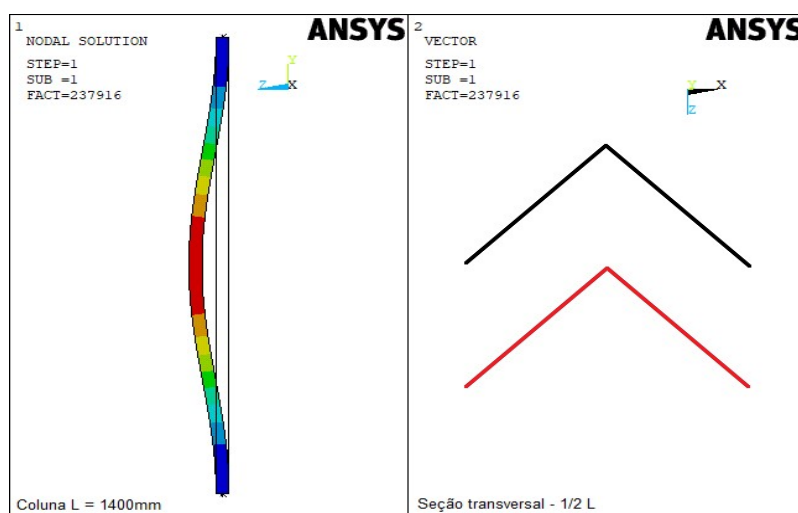


Figura F1 – Análise de flambagem elástica: SL - 50,8x6,35 - 1400, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 237,92\text{kN}$.

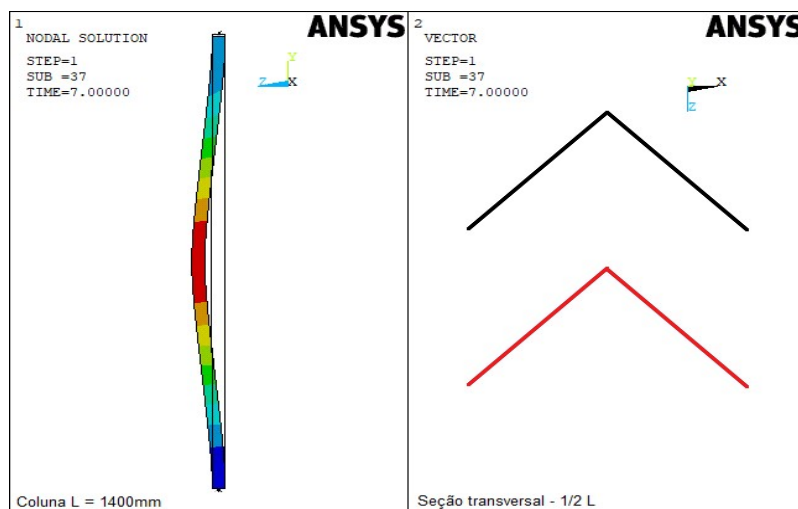


Figura F2 – Análise não linear: SL - 50,8x6,35 - 1400, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 102,29\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 1400 – 0
1º Modo de Flambagem

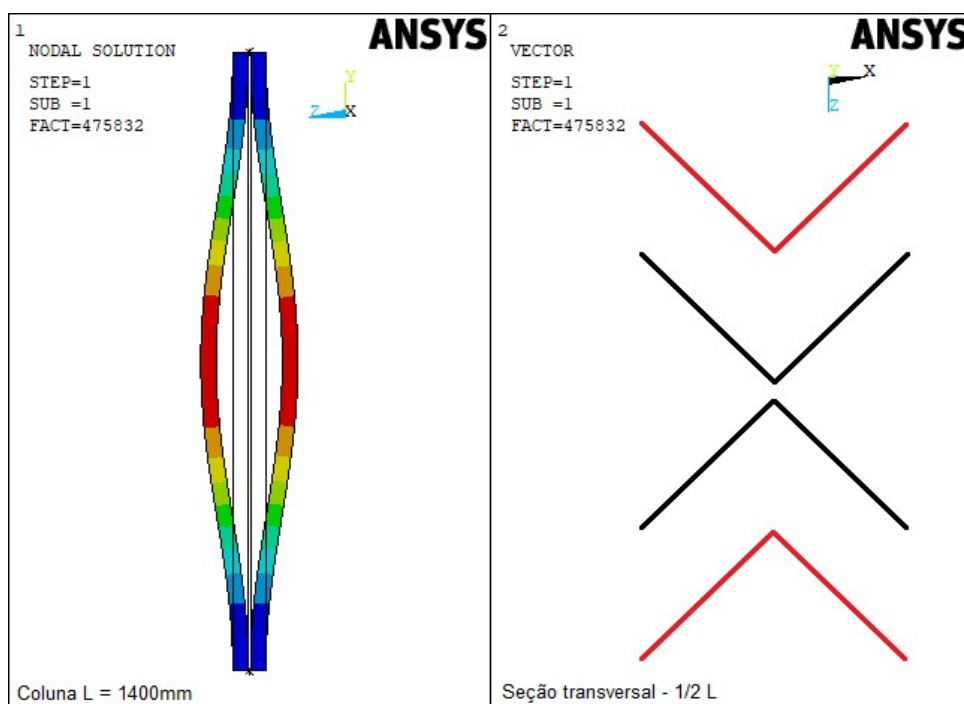


Figura F3 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 0, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 475,83\text{kN}$.

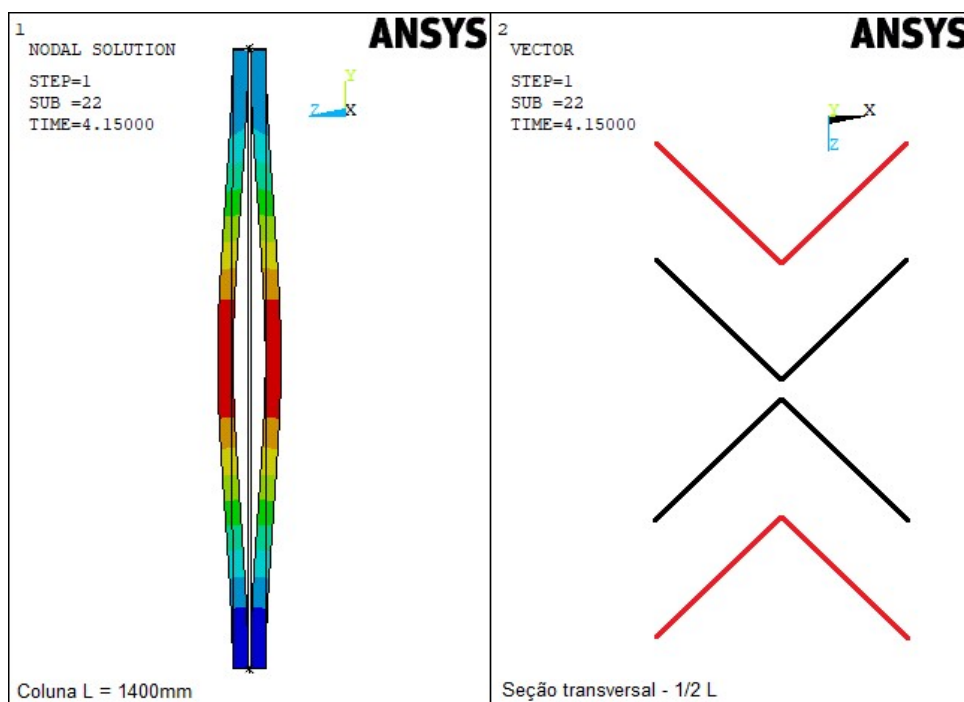


Figura F4 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 0, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 204,62\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 1400 – 1 – 700
1º Modo de Flambagem

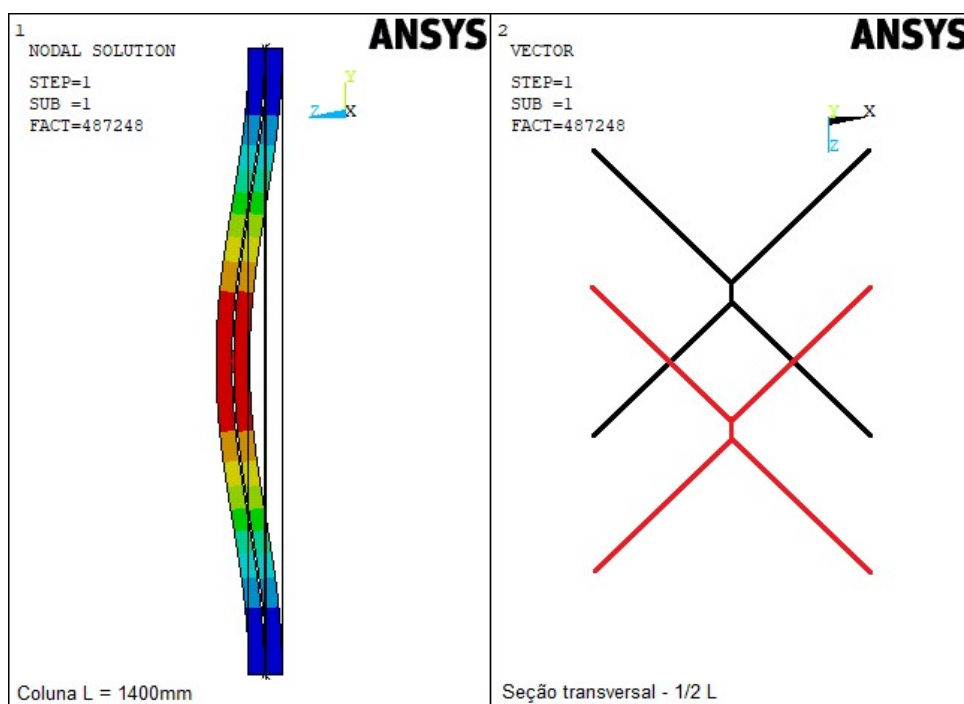


Figura F5 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 1 - 700, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 487,25\text{kN}$.

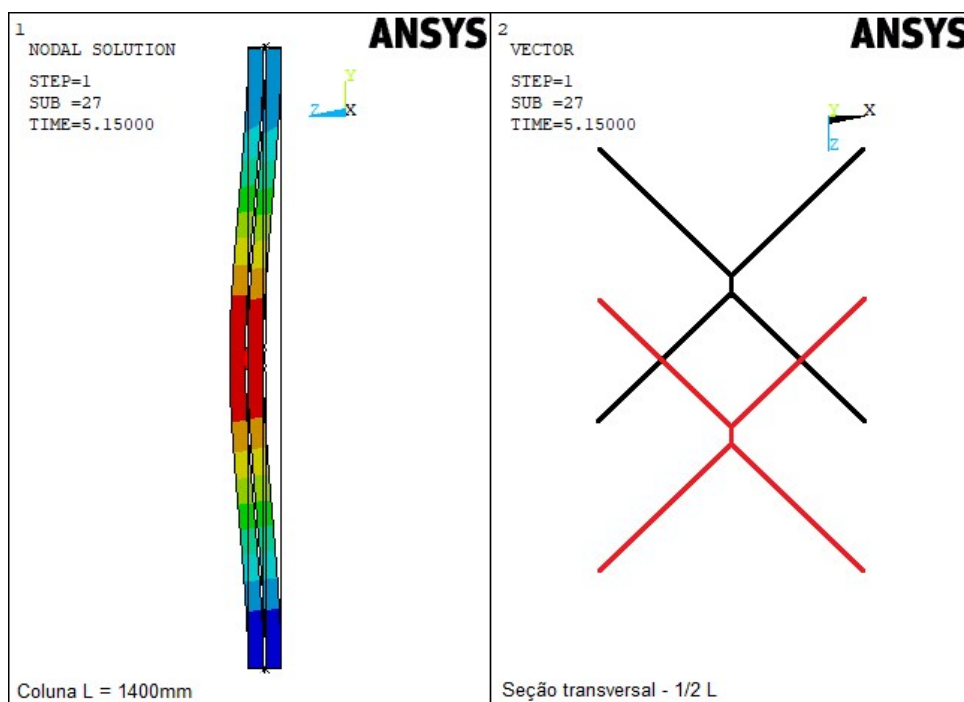


Figura F6 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 1 - 700, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 207,03\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 1400 – 2 – 466
1º Modo de Flambagem

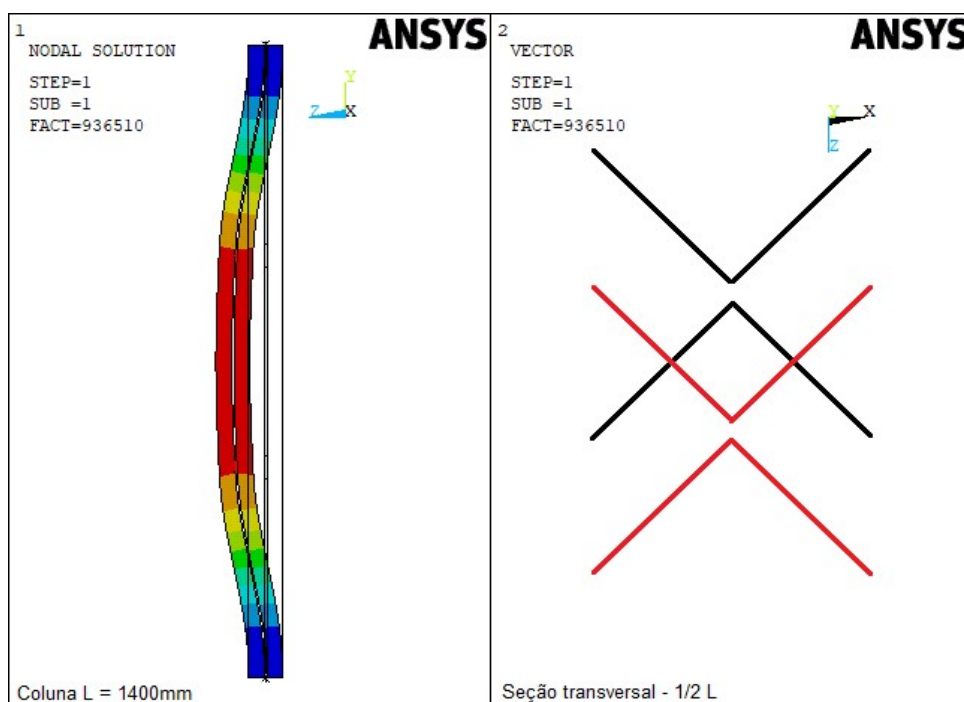


Figura F7 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 2 - 466, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 936,51\text{kN}$.

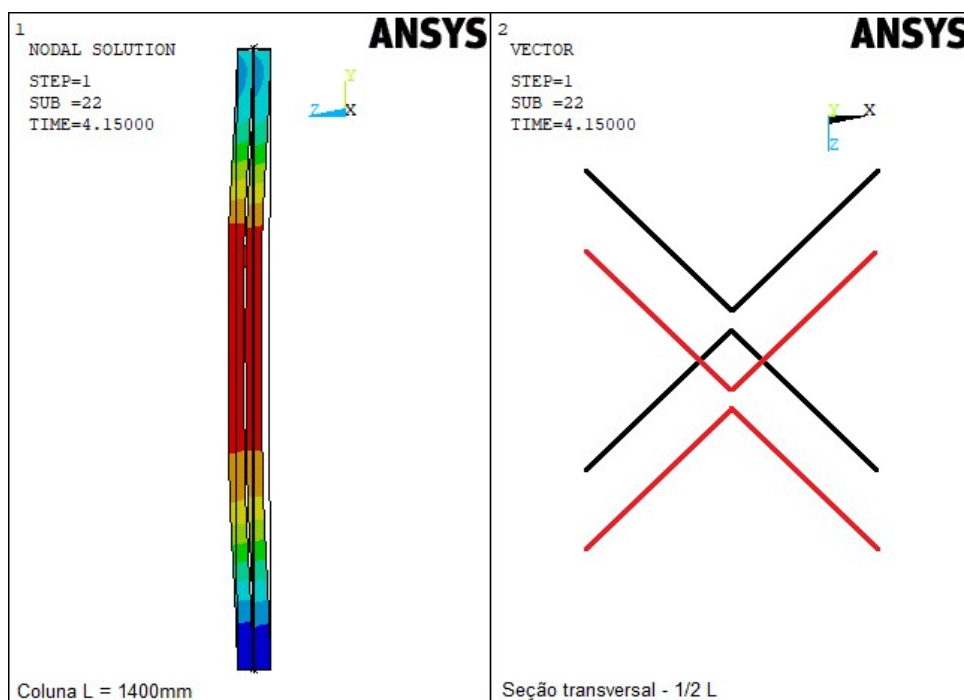


Figura F8 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 2 - 466, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 262,45\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 1400 – 3 – 350
1º Modo de Flambagem

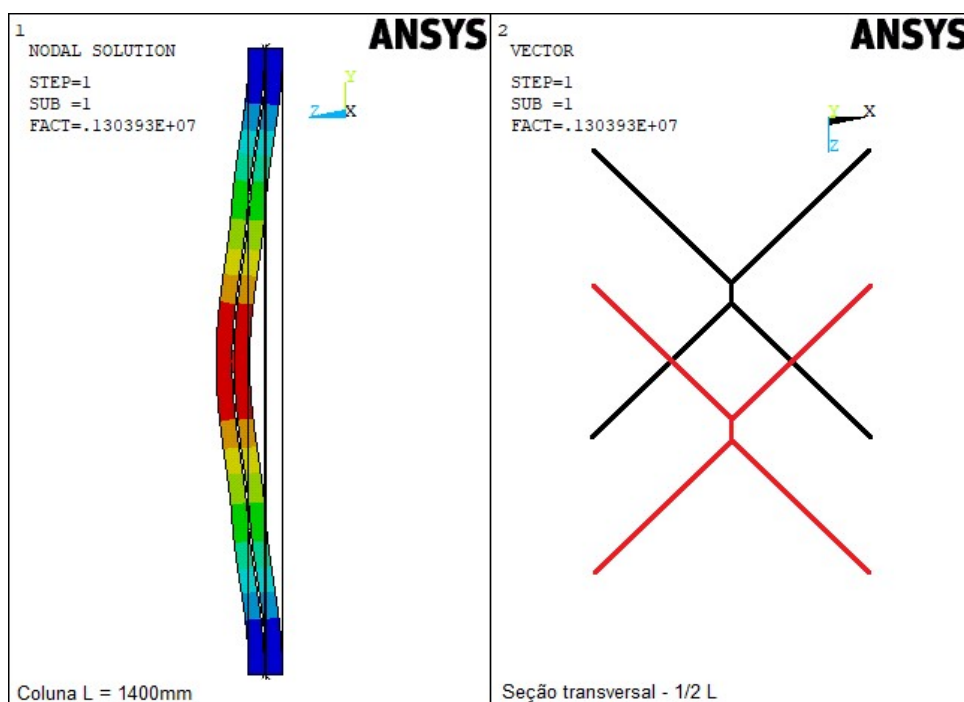


Figura F9 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 3 - 350, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1303,93\text{kN}$.

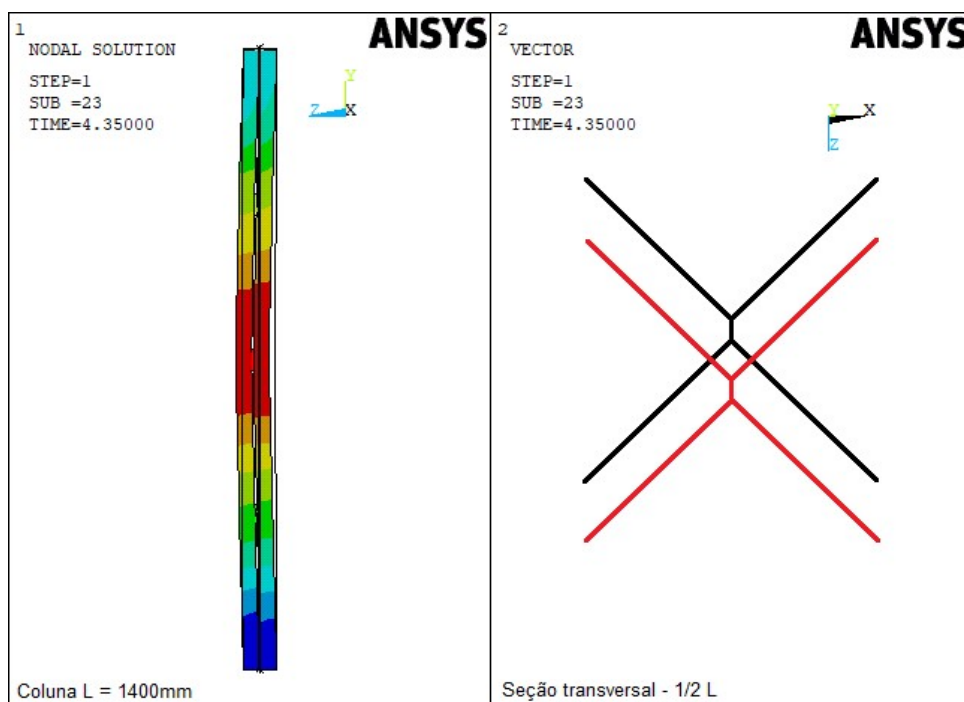


Figura F10 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 3 - 350, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 293,18\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 1400 – 4 – 280
- 1º Modo de Flambagem

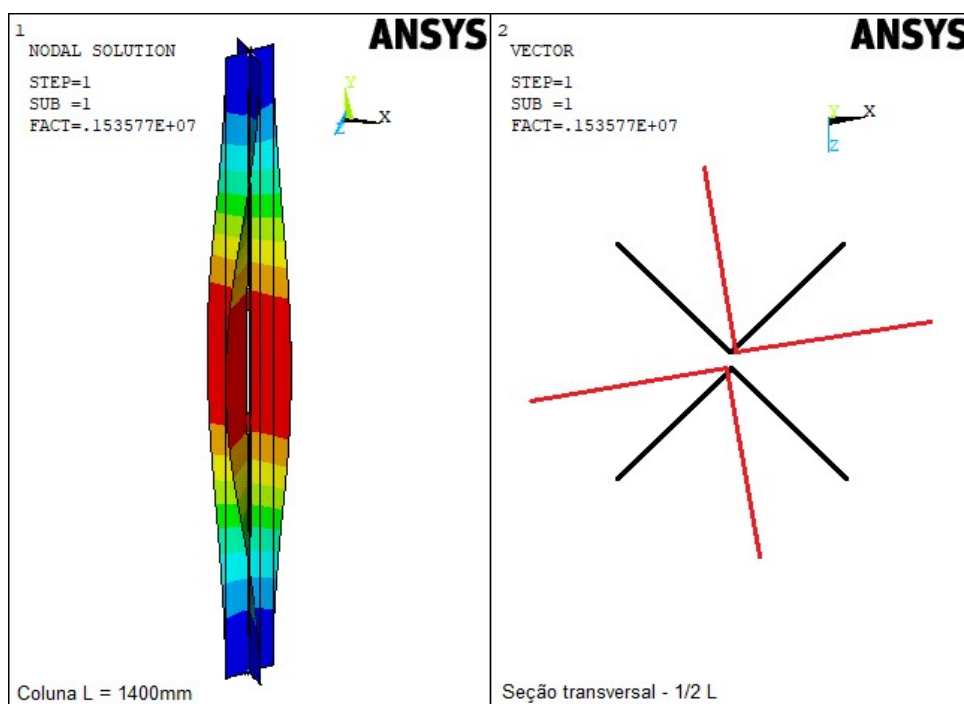


Figura F11 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 4 - 280, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1535,77\text{kN}$.

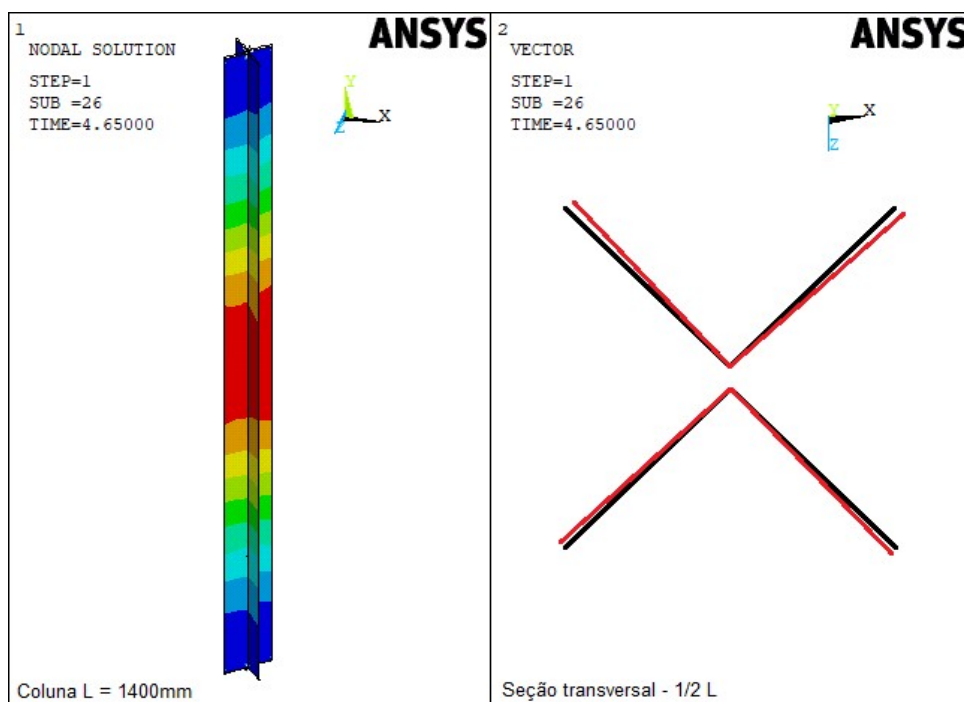


Figura F12 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 4 - 280, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 347,25\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 1400 – 5 – 233
1º Modo de Flambagem

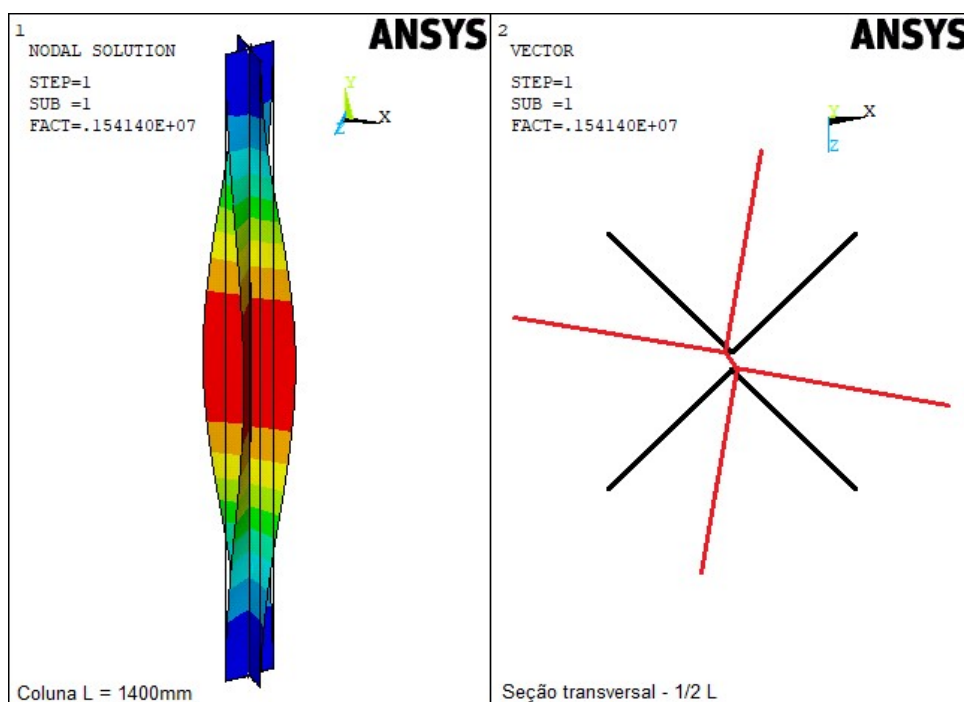


Figura F13 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 5 - 233, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1541,40\text{kN}$.

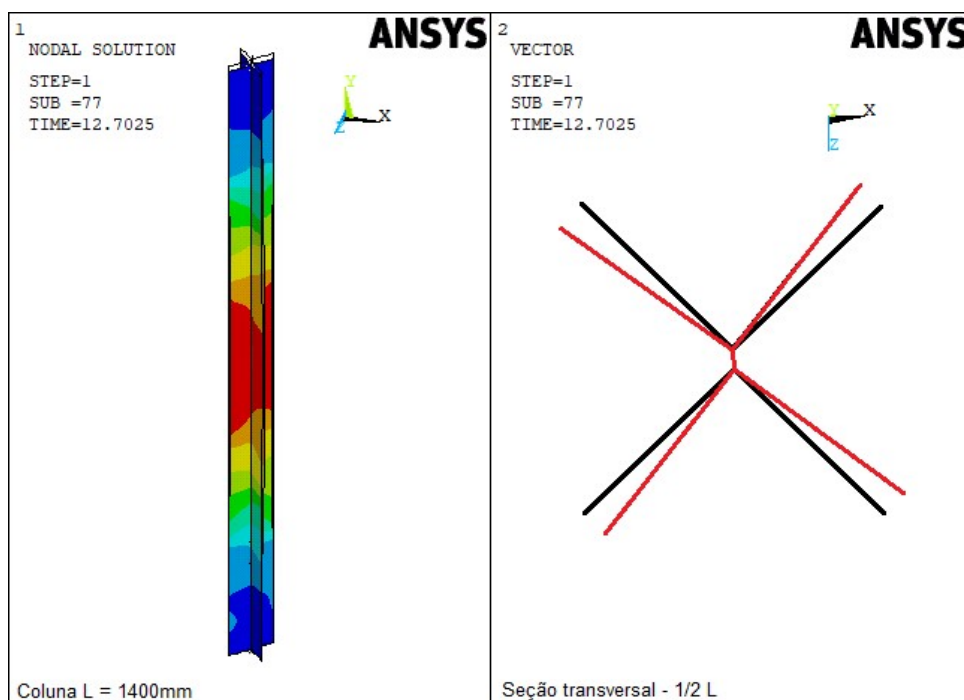


Figura F14 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 5 - 233, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 385,84\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 1400 – 6 – 200
- 1º Modo de Flambagem

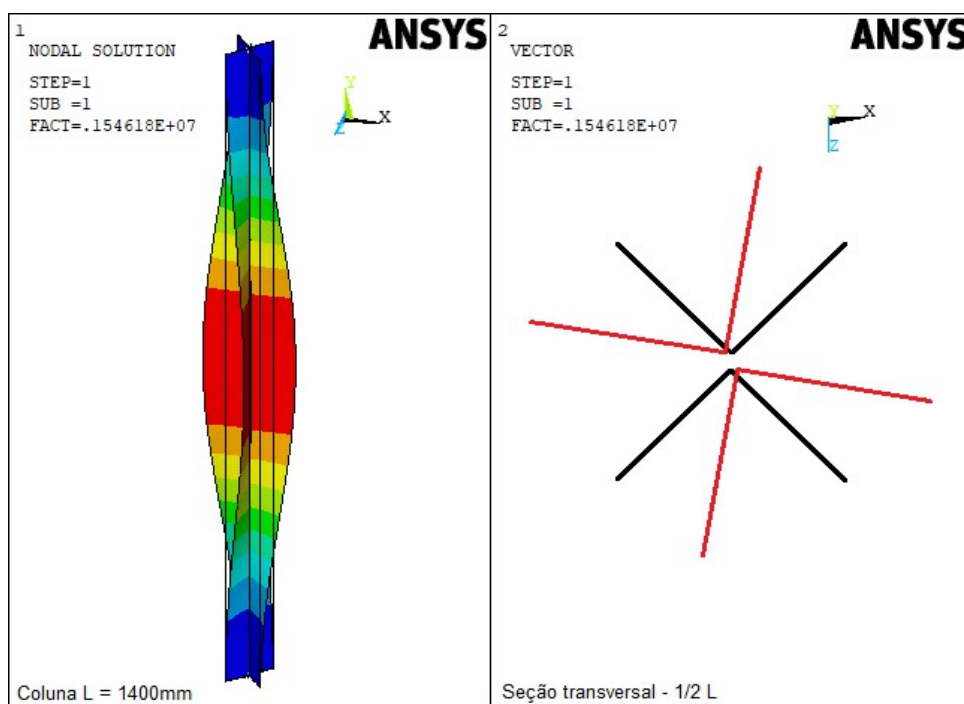


Figura F15 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 6 - 200, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1546,18\text{kN}$.

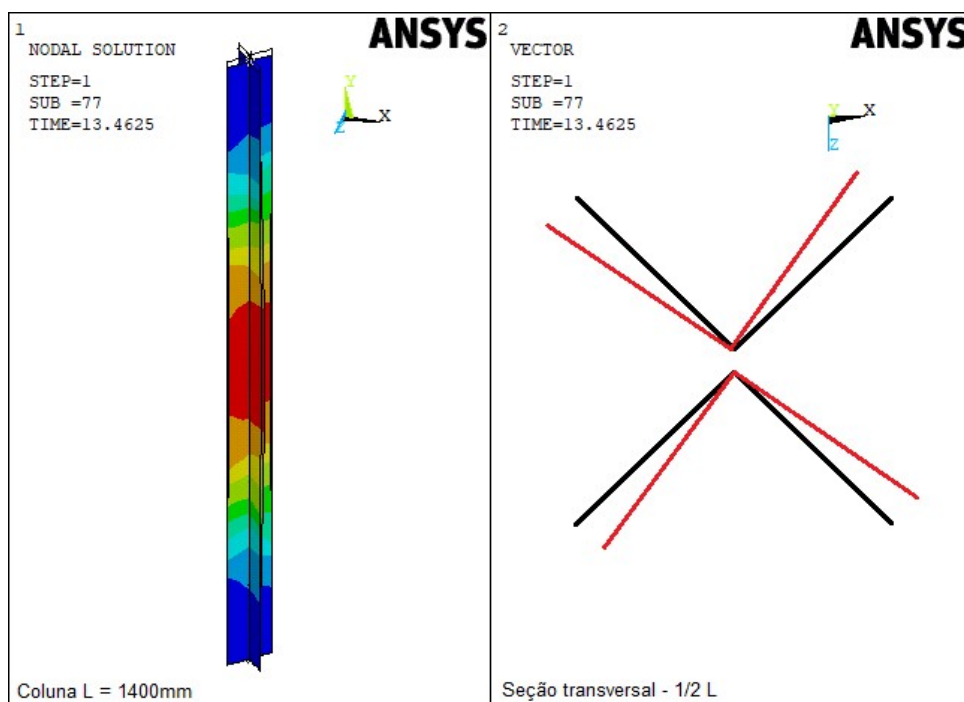


Figura F16 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 6 - 200, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 388,58\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 1400 – 7 – 175
1º Modo de Flambagem

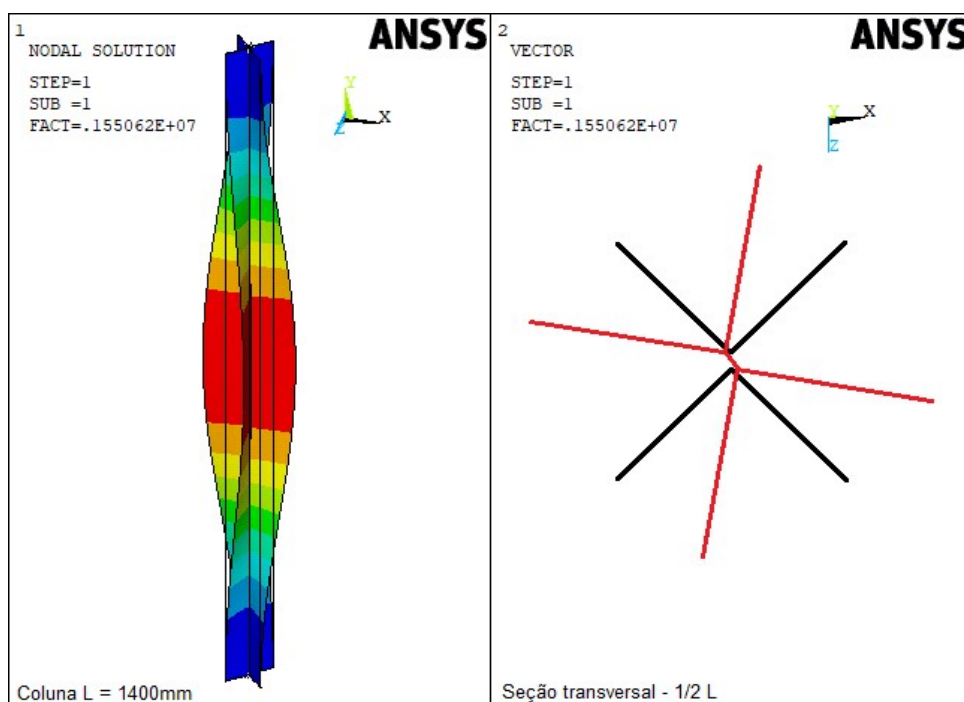


Figura F17 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 7 - 175, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1550,62\text{kN}$.

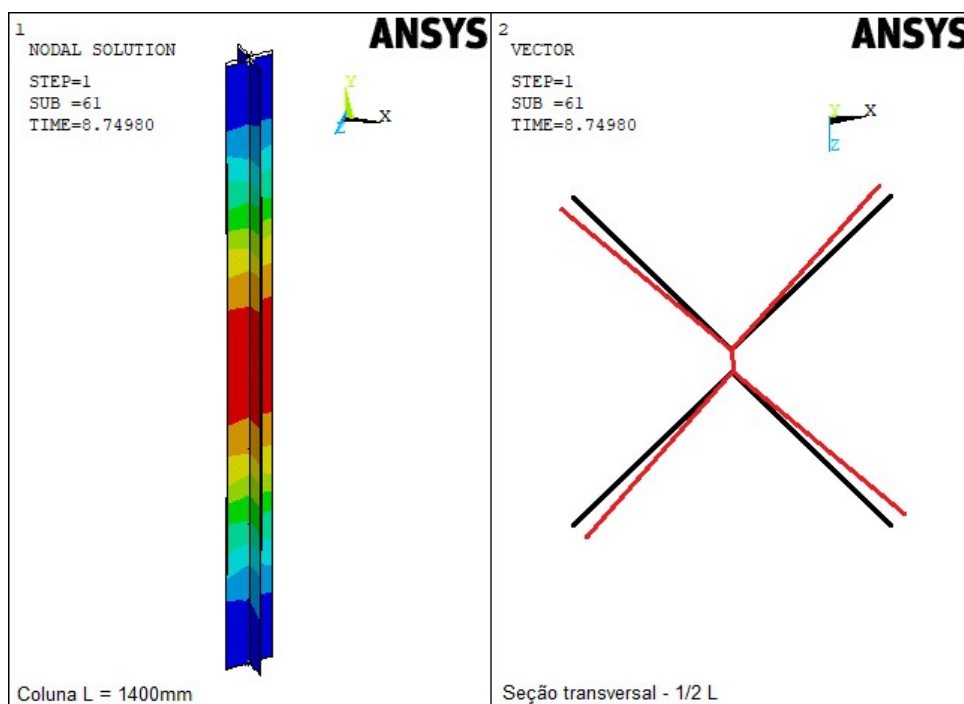


Figura F18 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 1400 - 7 - 175, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 376,07\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 1400
1º Modo de Flambagem

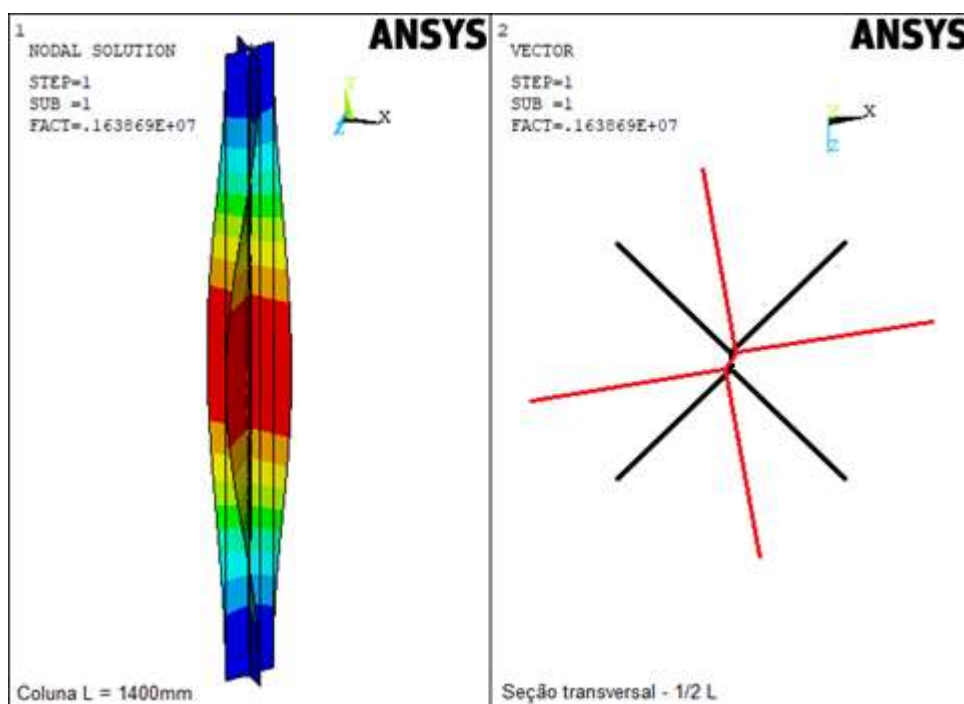


Figura F19 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 1400, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1638,69\text{kN}$.

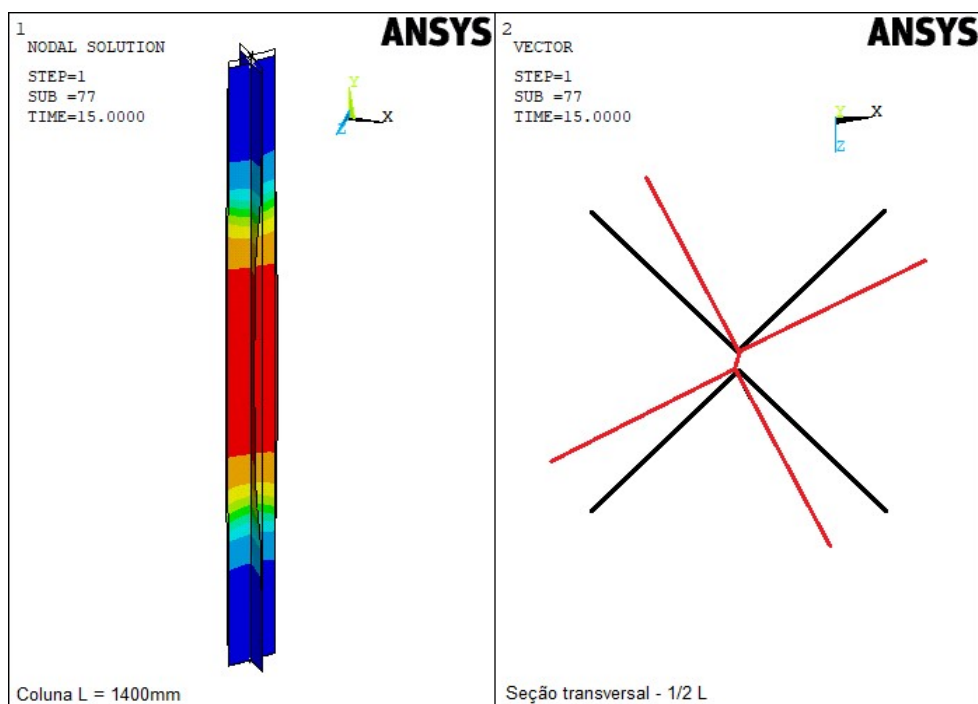


Figura F20 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 1400, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 399,22\text{kN}$.

ANEXO G

Este anexo apresenta todos os modelos numéricos, analisados neste trabalho, referentes as colunas com seção transversal formada por cantoneira com dimensões de 50,8x6,35mm e comprimento de 2200mm.

- SL – 50,8x6,35 – 2200
1º Modo de Flambagem

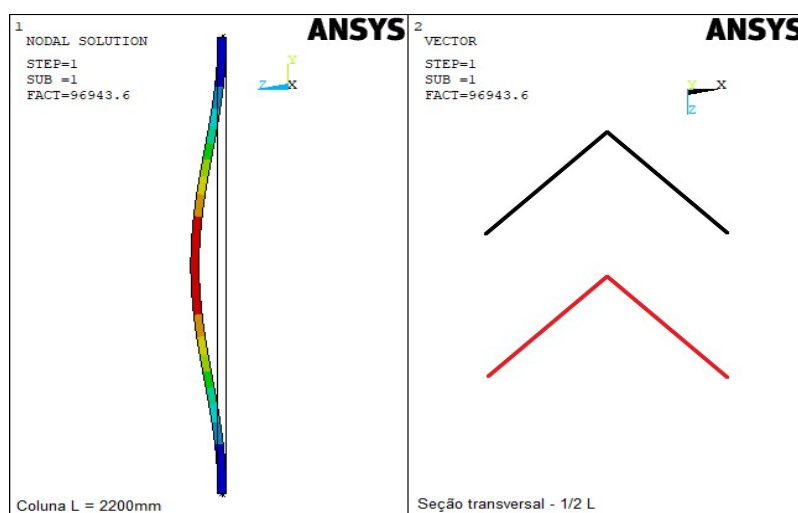


Figura G1 – Análise de flambagem elástica: SL - 50,8x6,35 - 2200, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 96,94\text{kN}$.

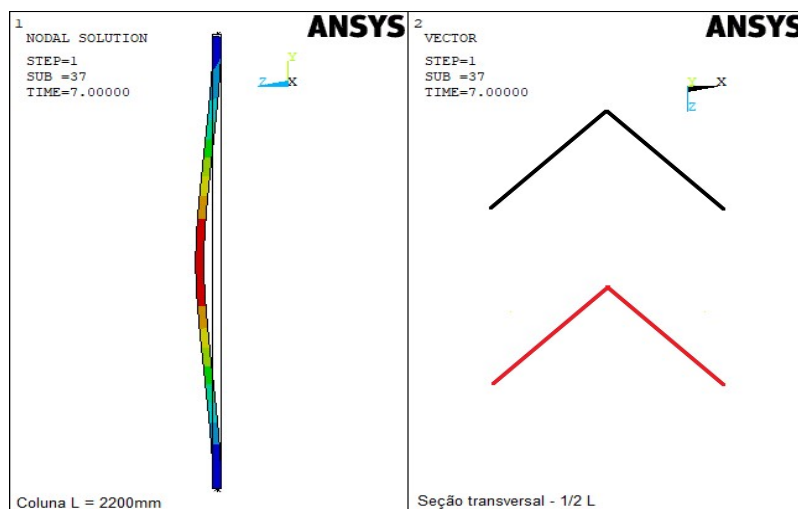


Figura G2 – Análise não linear: SL - 50,8x6,35 - 2200, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 59,93\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 2200 – 0
1º Modo de Flambagem

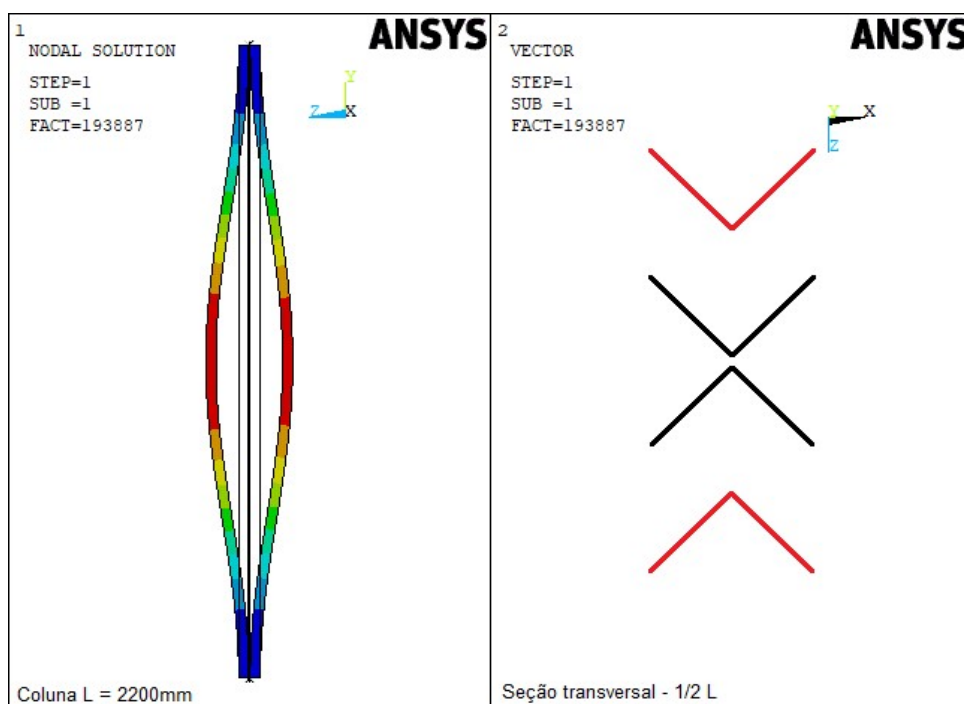


Figura G3 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 0, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 193,89\text{kN}$.

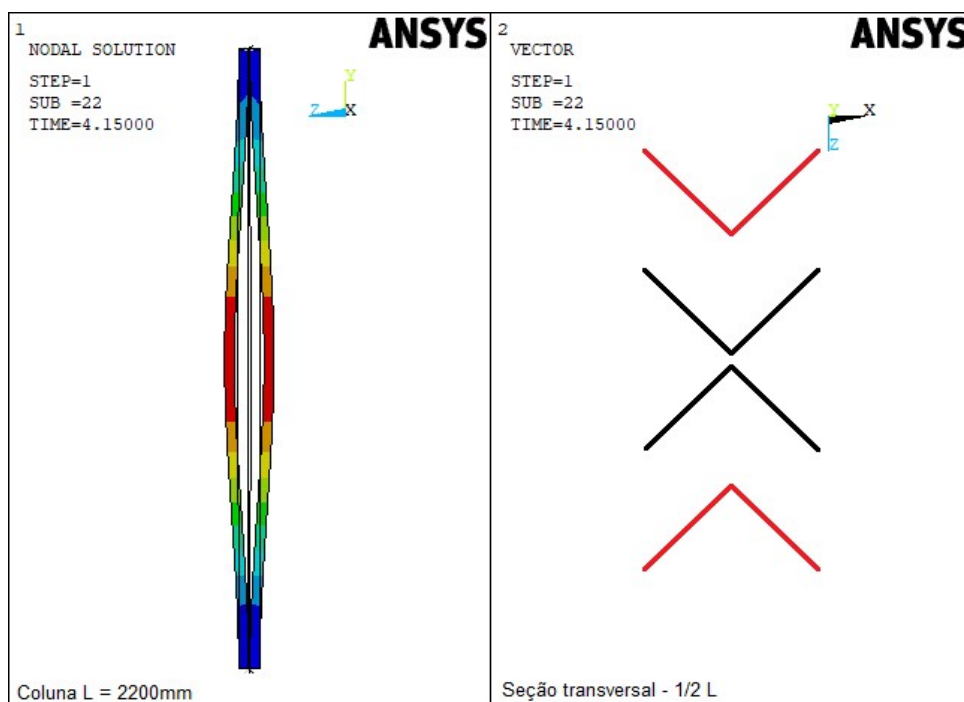


Figura G4 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 0, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 119,96\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 2200 – 1 – 1100
- 1º Modo de Flambagem

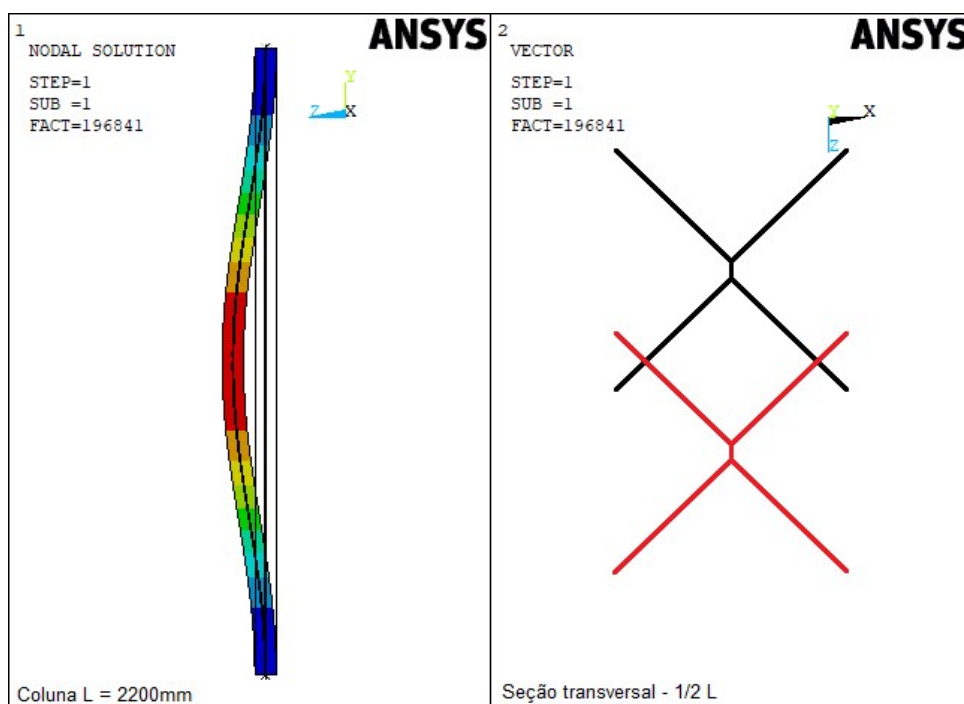


Figura G5 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 1 - 1100, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 196,84\text{kN}$.

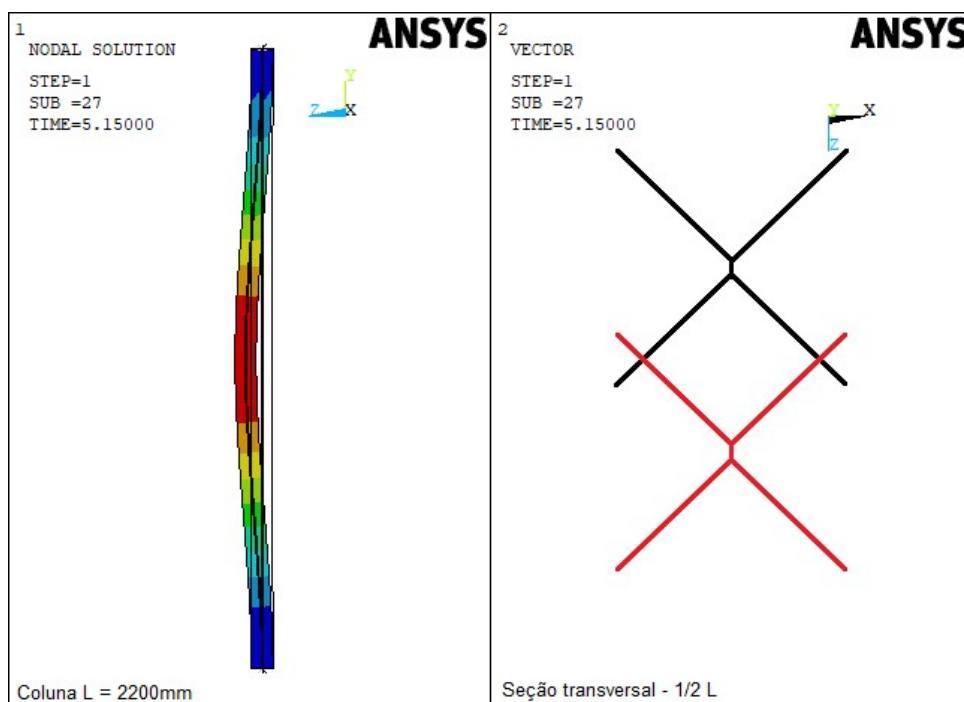


Figura G6 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 1 - 1100, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 121,17\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 2200 – 2 – 733
- 1º Modo de Flambagem

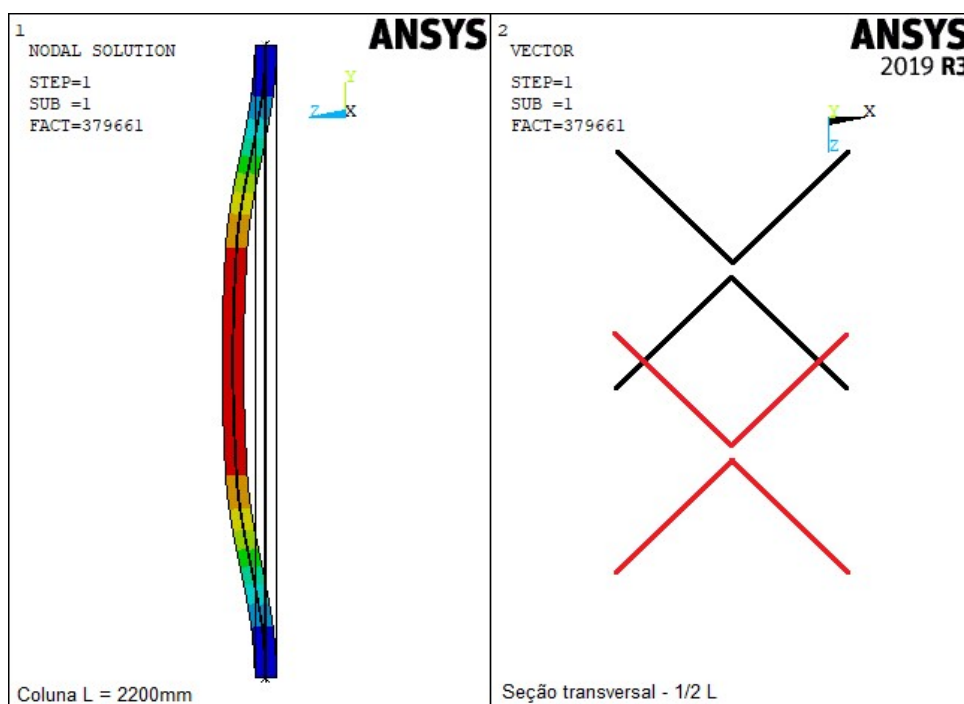


Figura G7 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 2 - 733, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 379,66\text{kN}$.

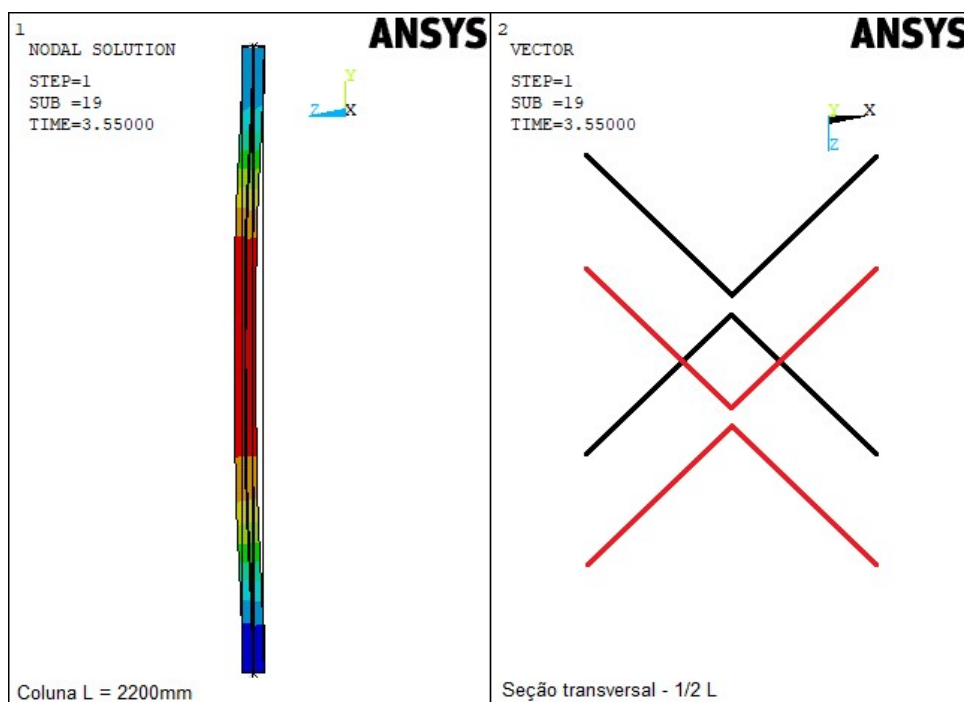


Figura G8 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 2 - 733, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 179,66\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 2200 – 3 – 550
- 1º Modo de Flambagem

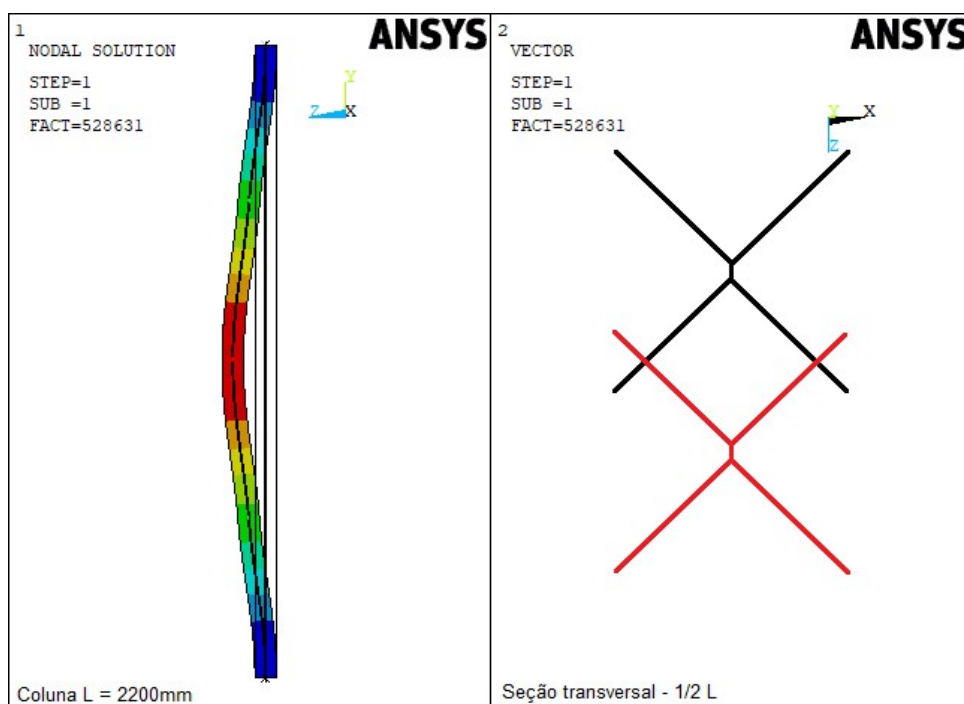


Figura G9 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 3 - 550, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 528,63\text{kN}$.

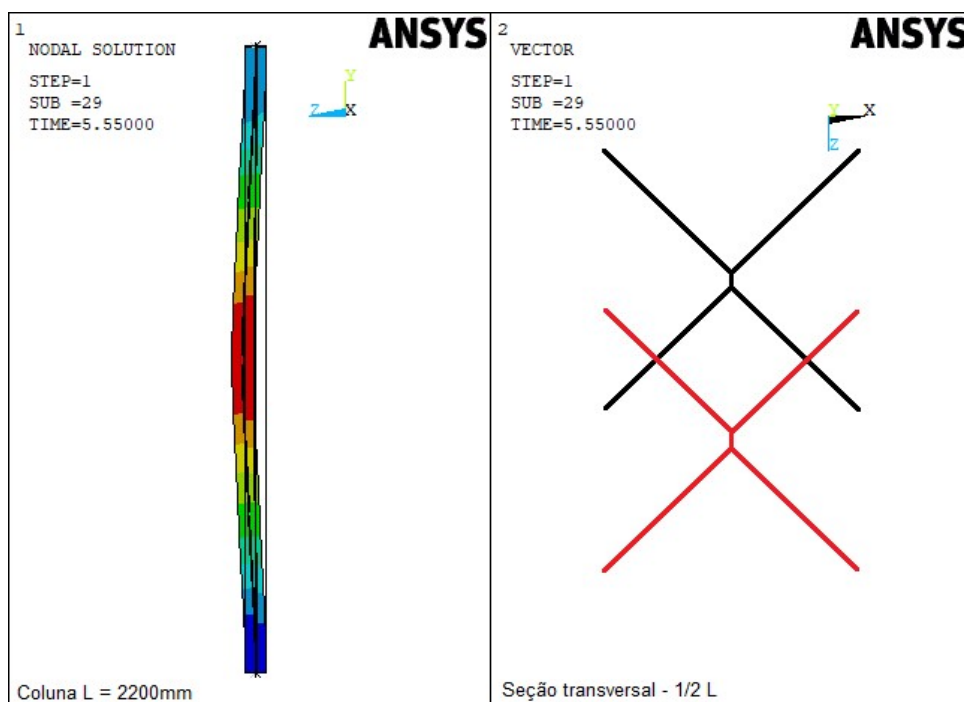


Figura G10 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 3 - 550, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 216,06\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 2200 – 4 – 440
- 1º Modo de Flambagem

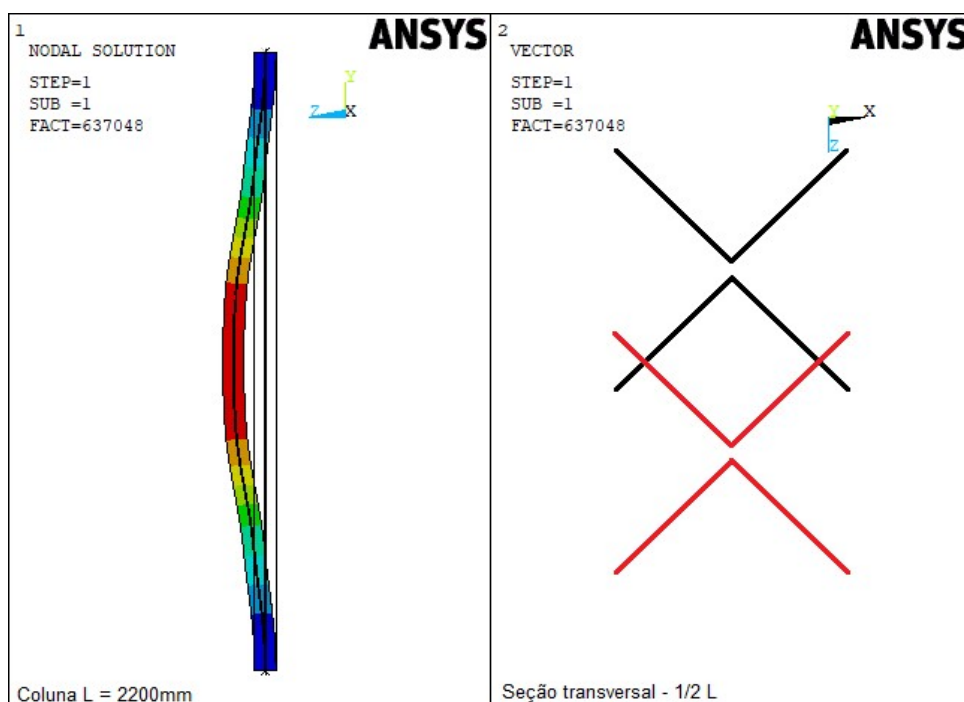


Figura G11 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 4 - 440, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 637,05\text{kN}$.

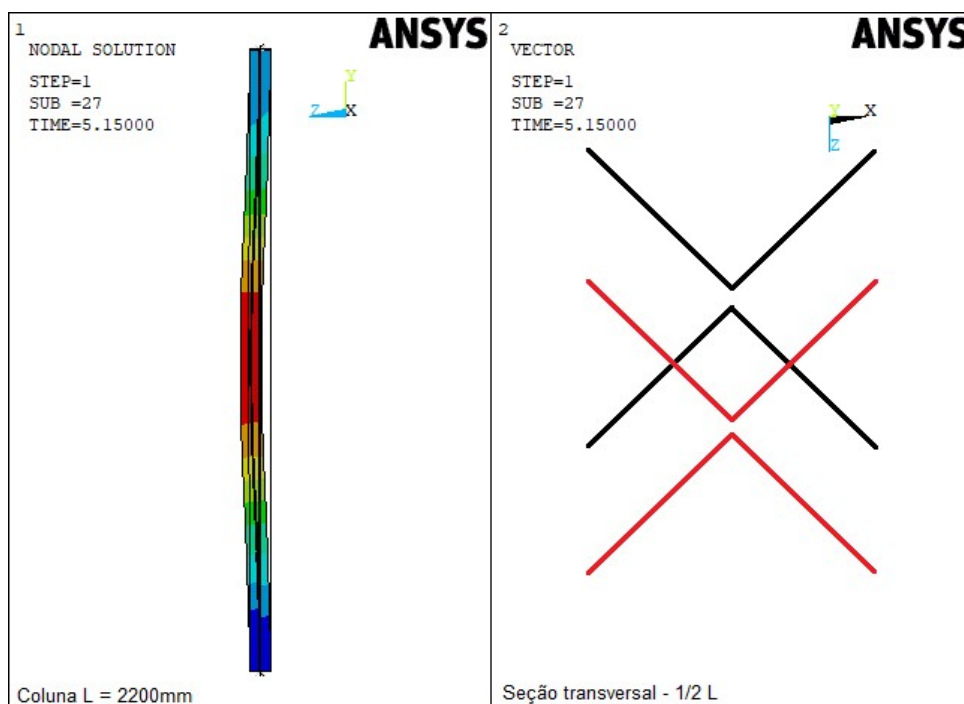


Figura G12 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 4 - 440, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 232,85\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 2200 – 5 – 367
- 1º Modo de Flambagem

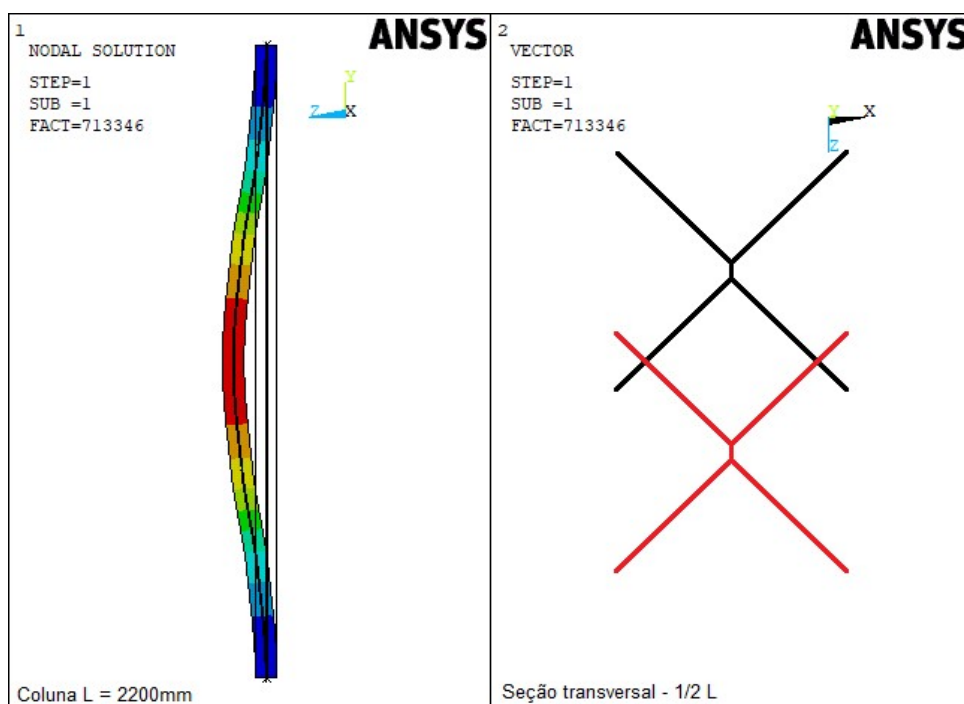


Figura G13 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 5 - 367, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 713,35\text{kN}$.

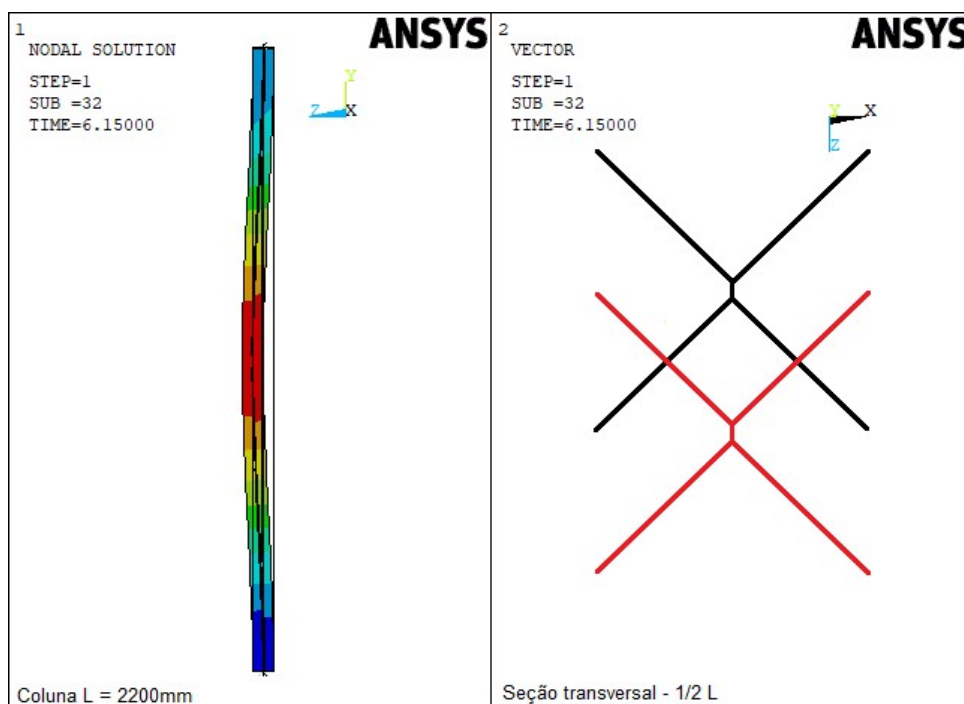


Figura G14 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 5 - 367, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 243,47\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 2200 – 6 – 314
1º Modo de Flambagem

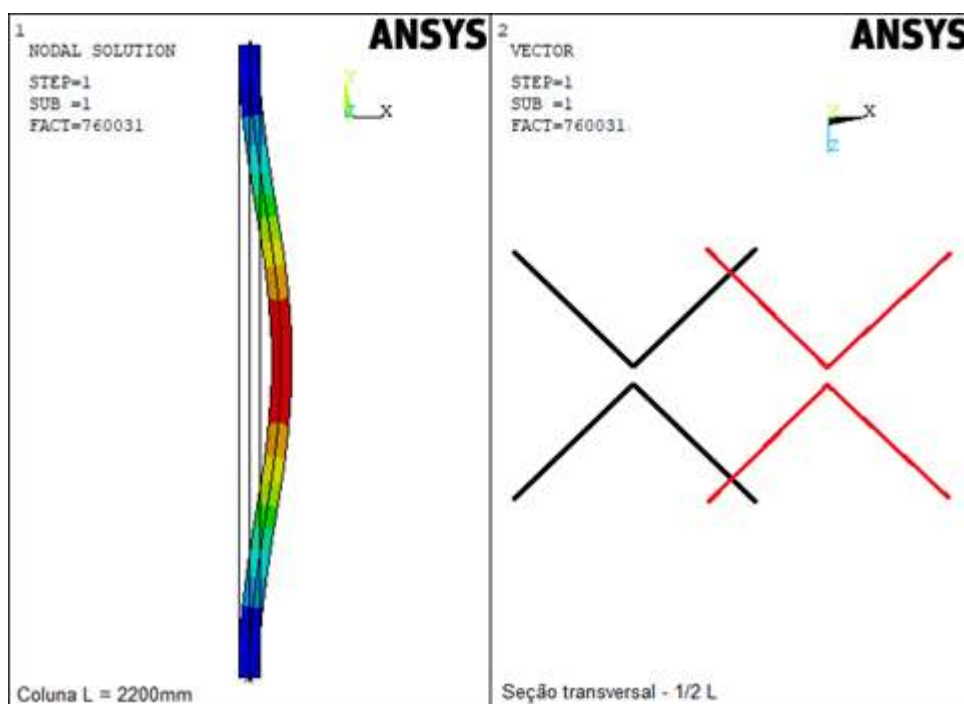


Figura G15 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 6 - 314, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 760,03\text{kN}$.

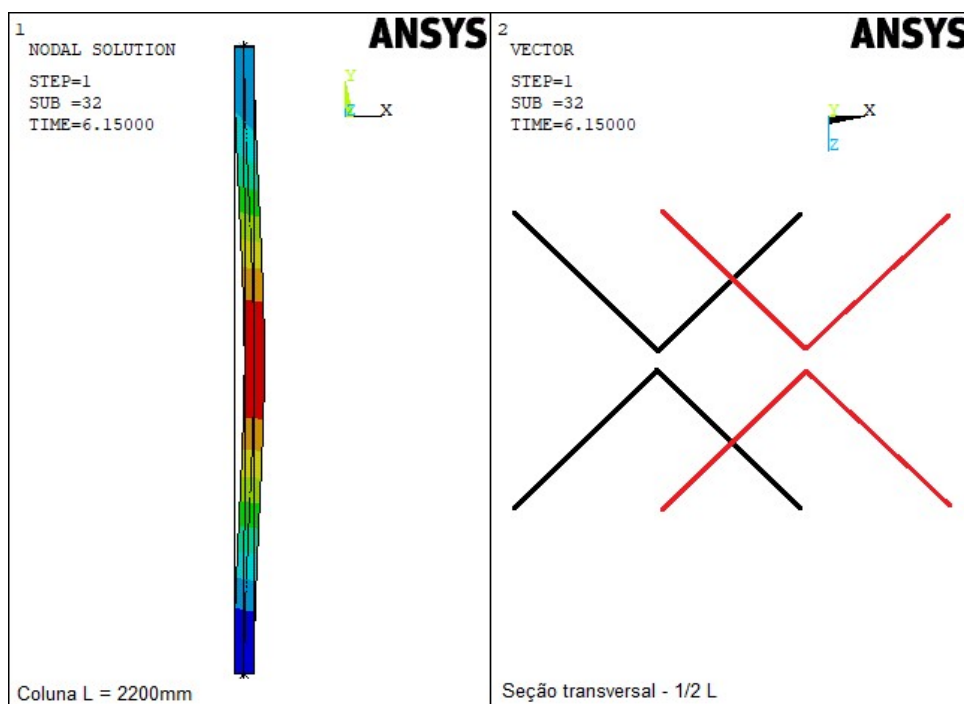


Figura G16 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 6 - 314, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 247,81\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 2200 – 7 – 275
1º Modo de Flambagem

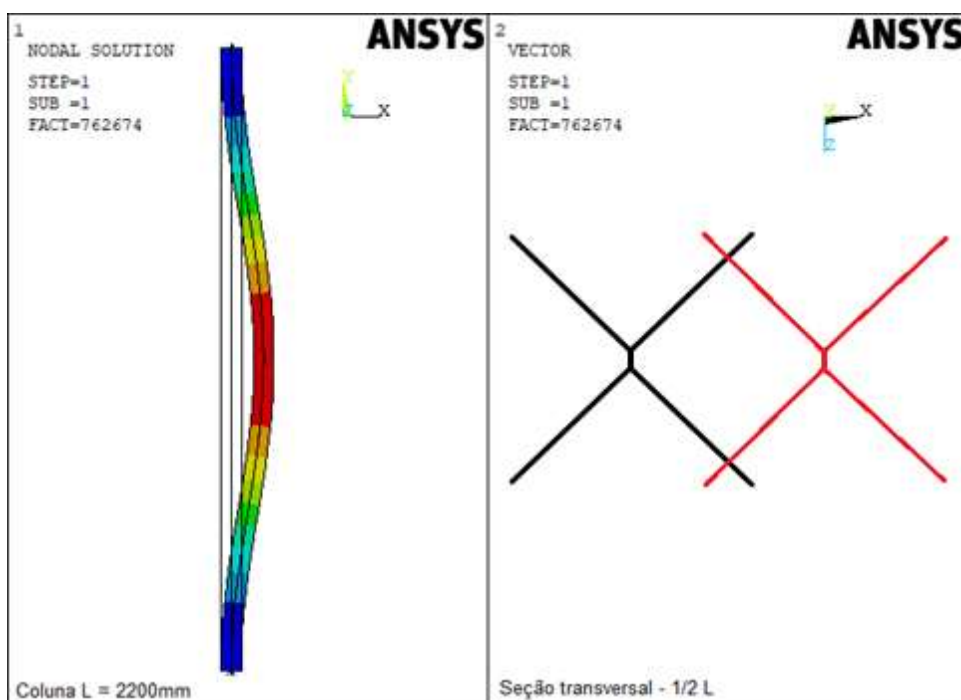


Figura G17 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 7 - 275, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 762,67\text{kN}$.

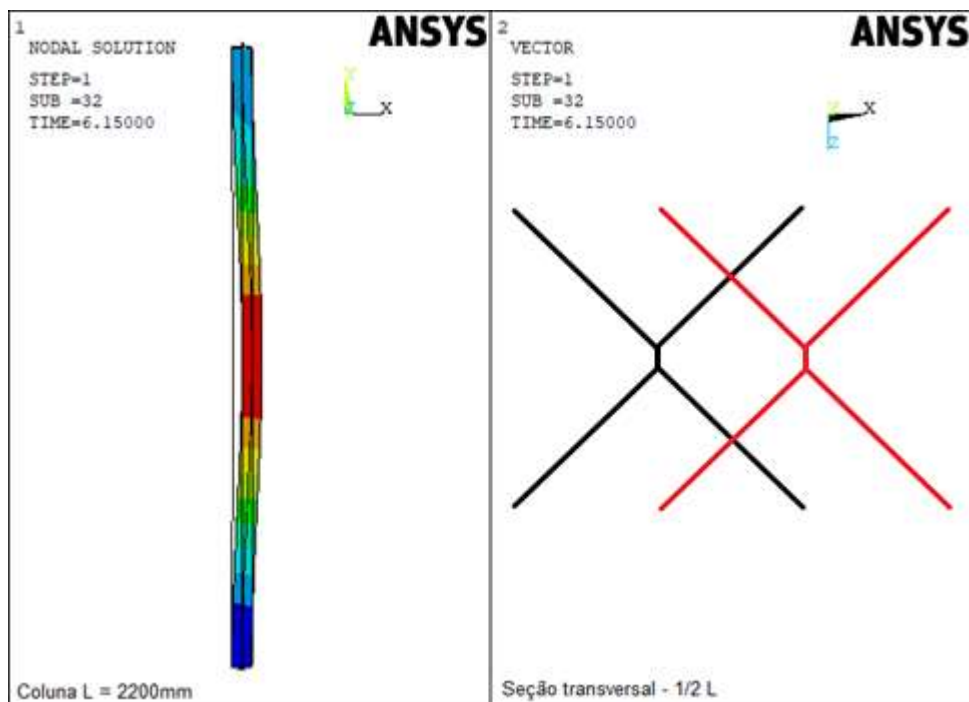


Figura G18 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 2200 - 7 - 275, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 247,77\text{kN}$.

- DL – 50,8x6,35 – 2200
1º Modo de Flambagem

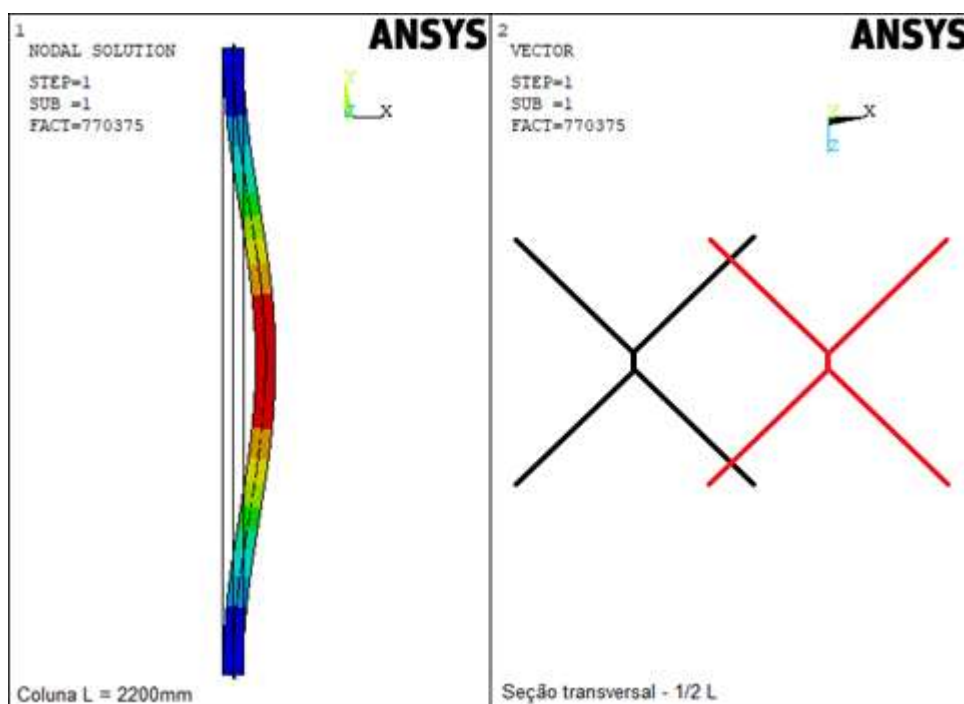


Figura G19 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x6,35 - 2200, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 770,38\text{kN}$.

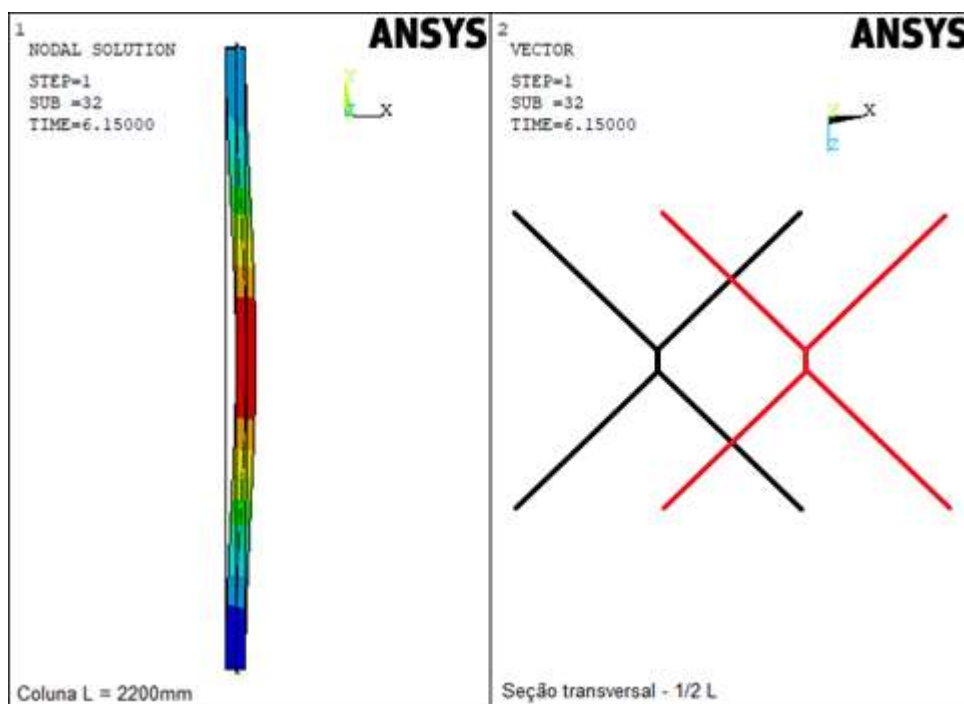


Figura G20 – Análise não linear: DL - 50,8x6,35 - 2200, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 252,16\text{kN}$.

ANEXO H

Este anexo apresenta todos os modelos numéricos, analisados neste trabalho, referentes as colunas com seção transversal formada por cantoneira com dimensões de 50,8x7,93mm e comprimento de 900mm.

- SL – 50,8x7,93 – 900
1º Modo de Flambagem

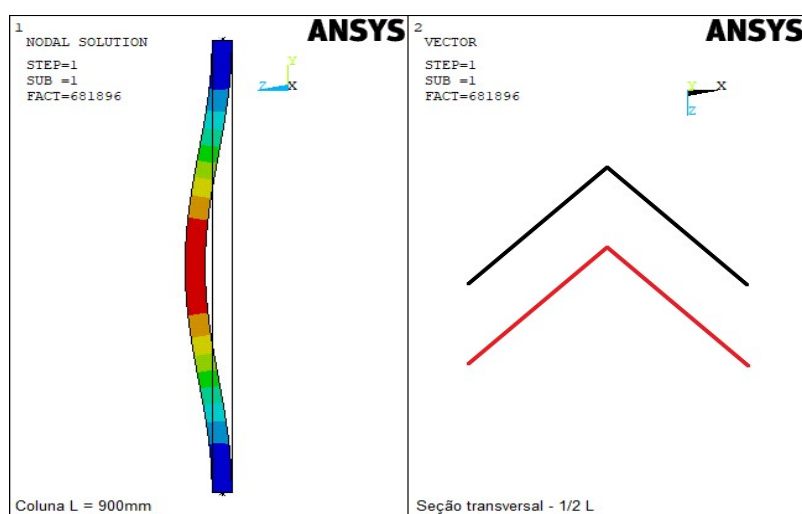


Figura H1 – Análise de flambagem elástica: SL - 50,8x7,93 - 900, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 681,89\text{kN}$.

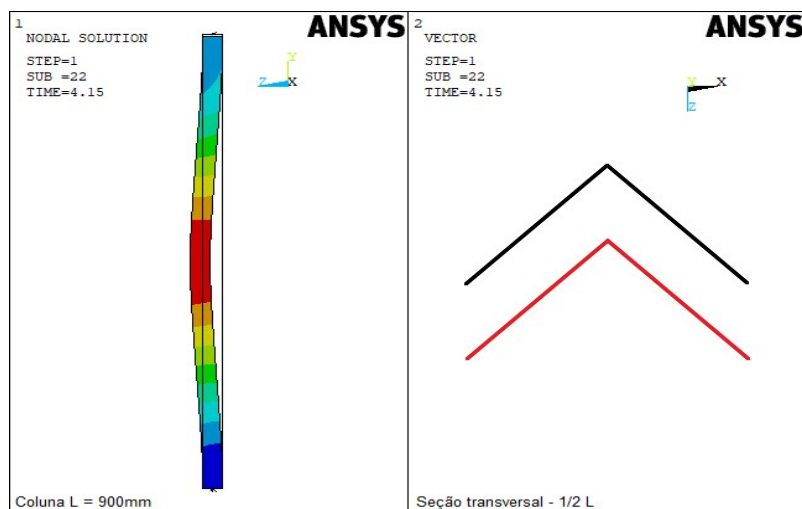


Figura H2 – Análise não linear: SL - 50,8x7,93 - 900, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 170,56\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 900 – 0
1º Modo de Flambagem

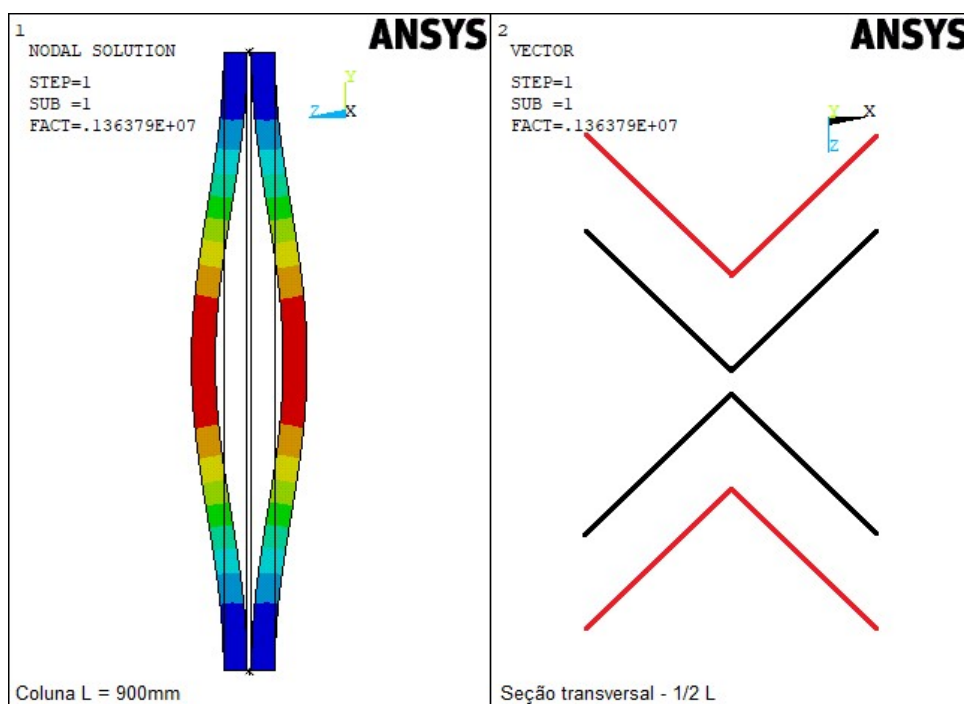


Figura H3 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 900 - 0, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1363,79\text{kN}$.

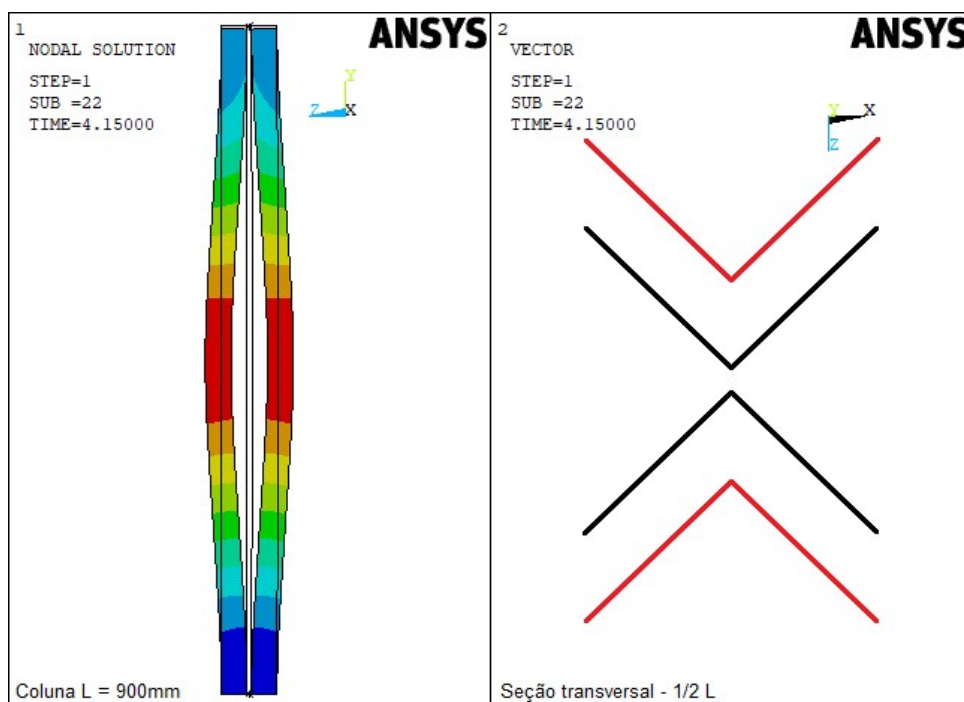


Figura H4 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 900 - 0, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 341,14\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 900 – 1 – 450
1º Modo de Flambagem

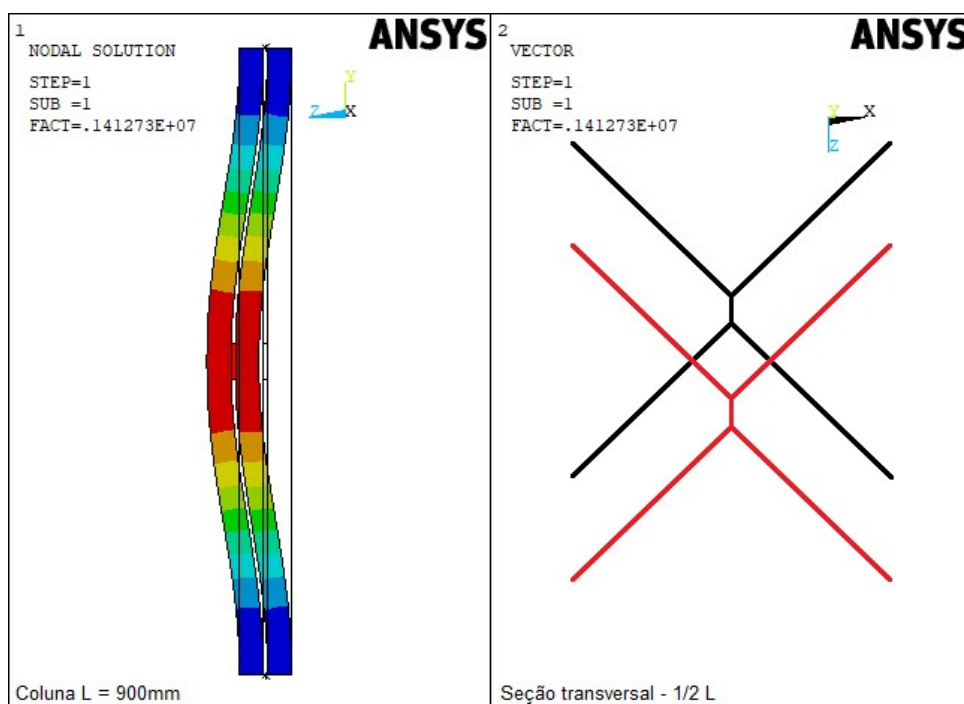


Figura H5 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 900 - 1 - 450, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1412,73\text{kN}$.

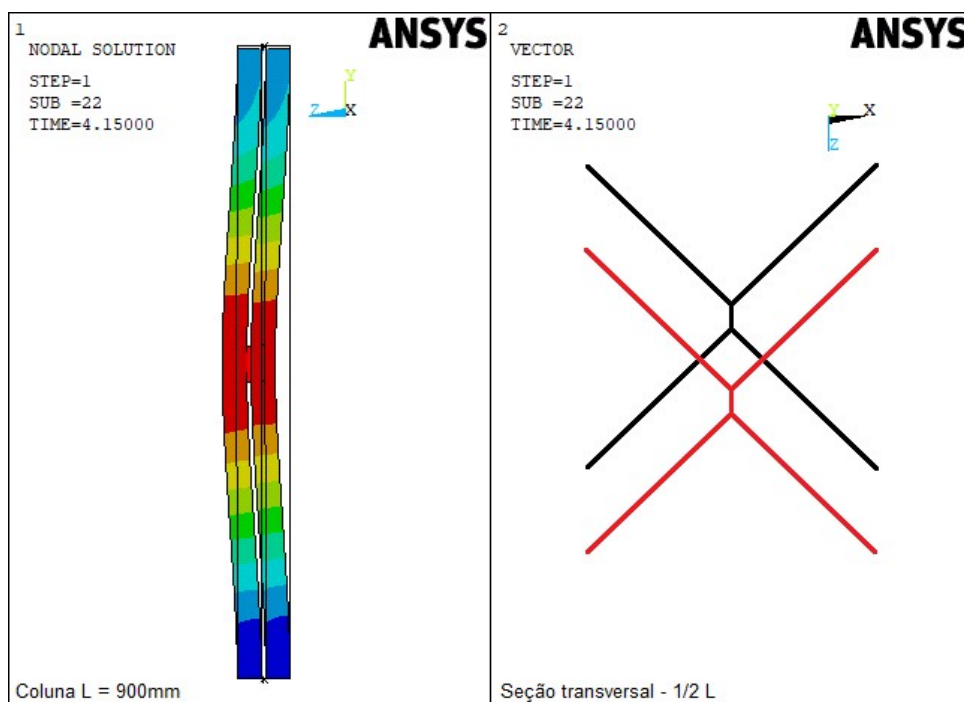


Figura H6 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 900 - 1 - 450, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 345,74\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 900 – 2 – 300
1º Modo de Flambagem

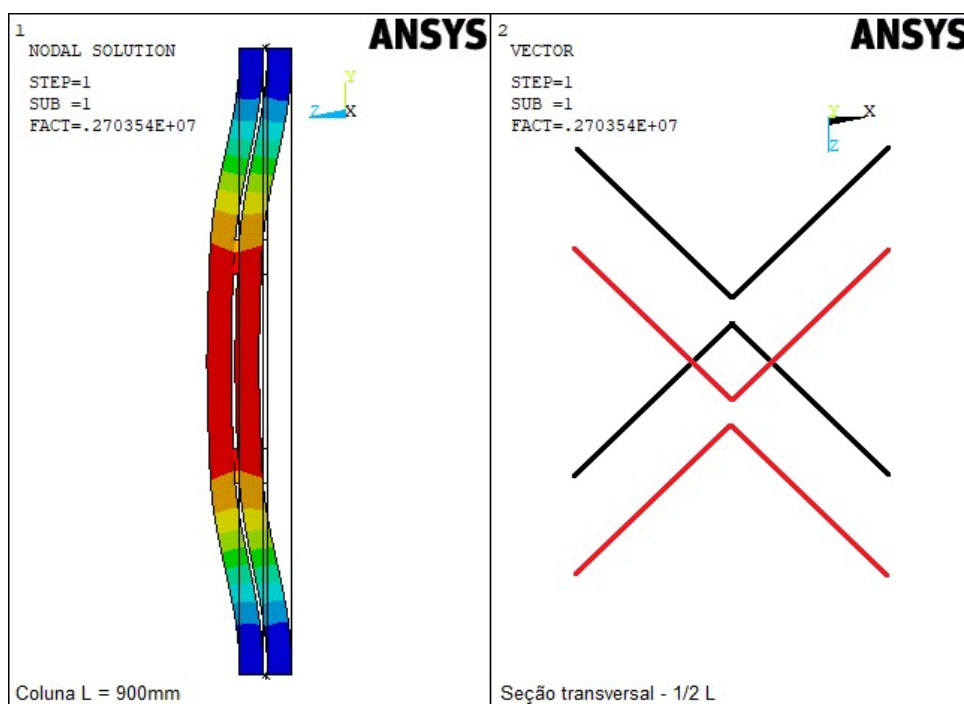


Figura H7 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 900 - 2 - 300, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 2703,54\text{kN}$.

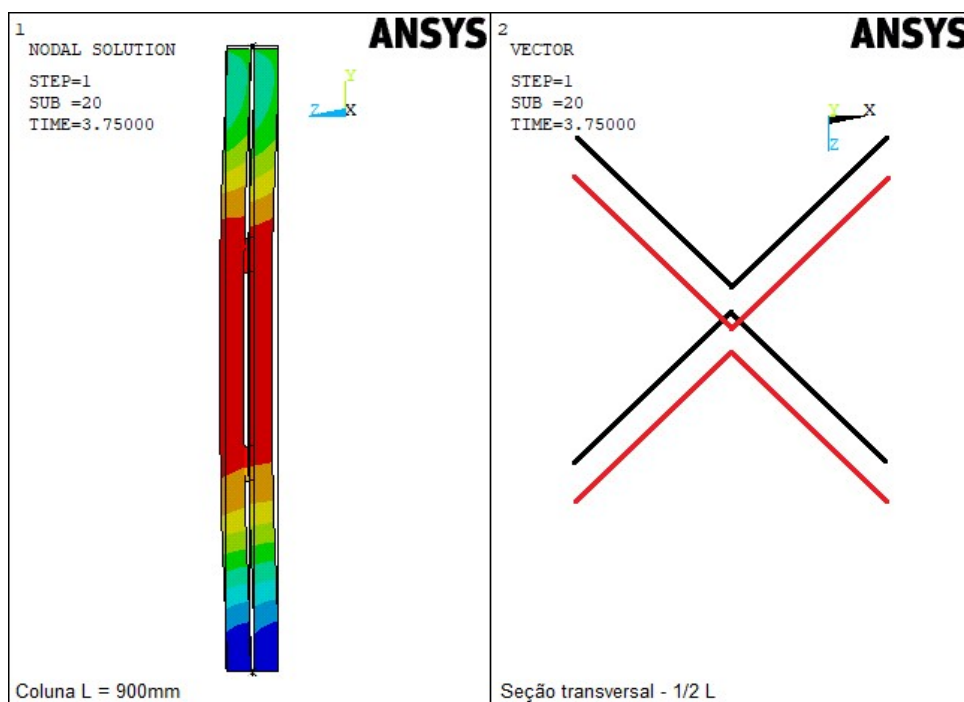


Figura H8 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 900 - 2 - 300, imperfeição geométrica de $h/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 393,14\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 900 – 3 – 225
1º Modo de Flambagem

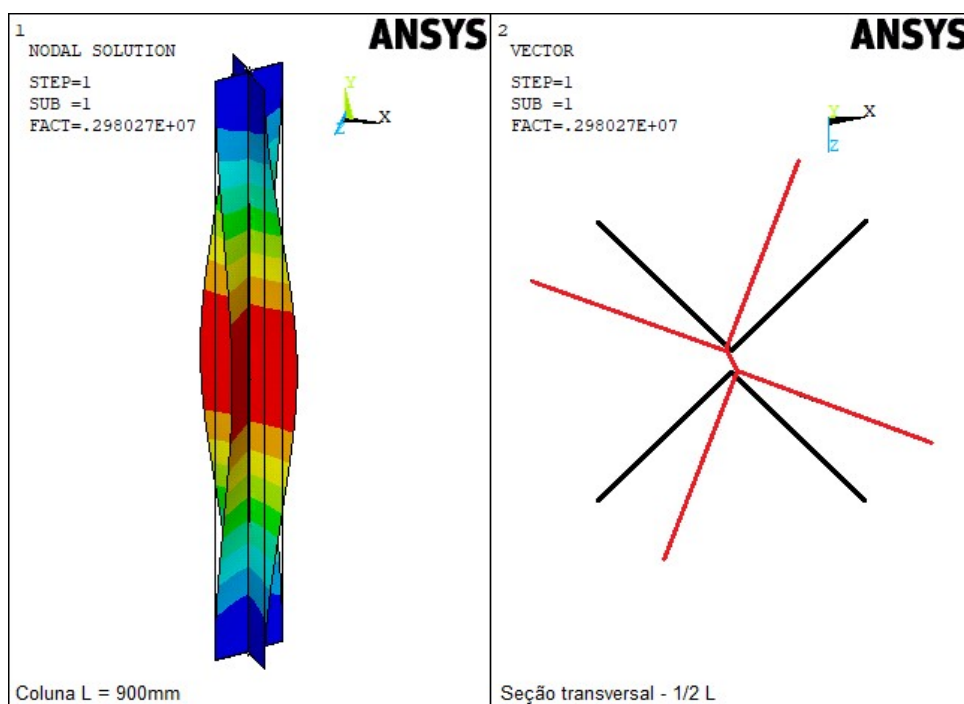


Figura H9 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 900 - 3 - 225, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 2980,27\text{kN}$.

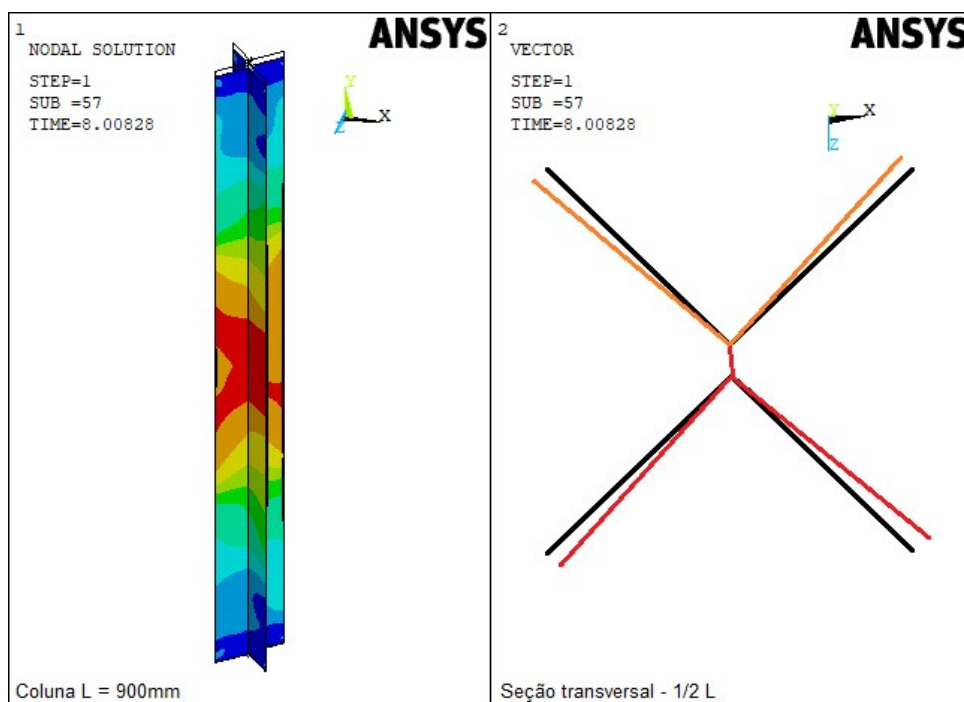


Figura H10 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 900 - 3 - 225, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 475,91\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 900 – 4 – 180
1º Modo de Flambagem

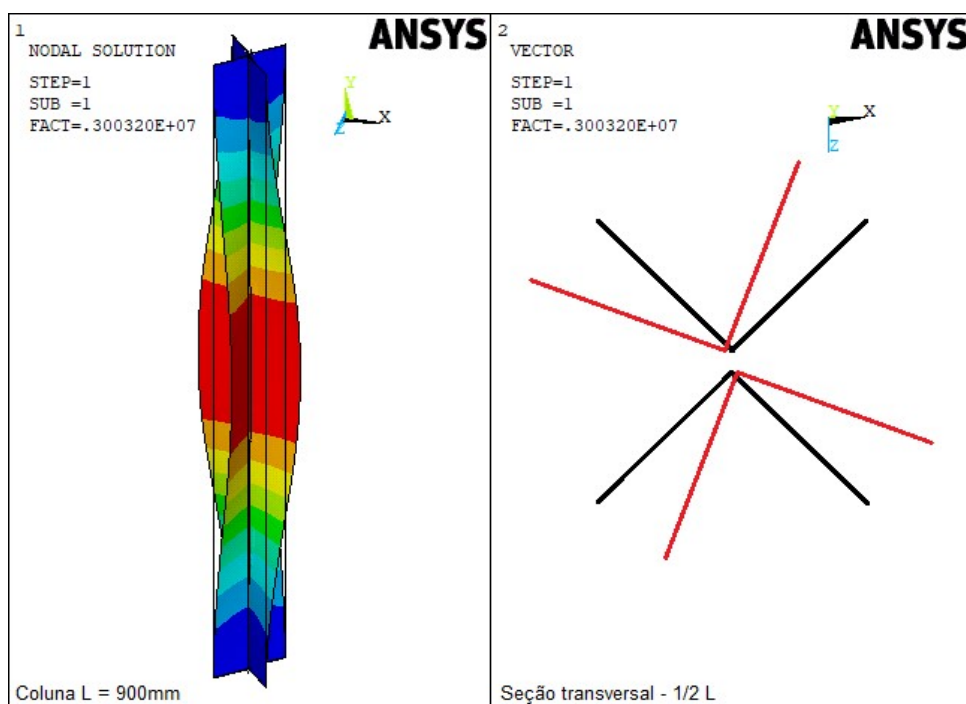


Figura H11 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 900 - 4 - 180, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 3003,20\text{kN}$.

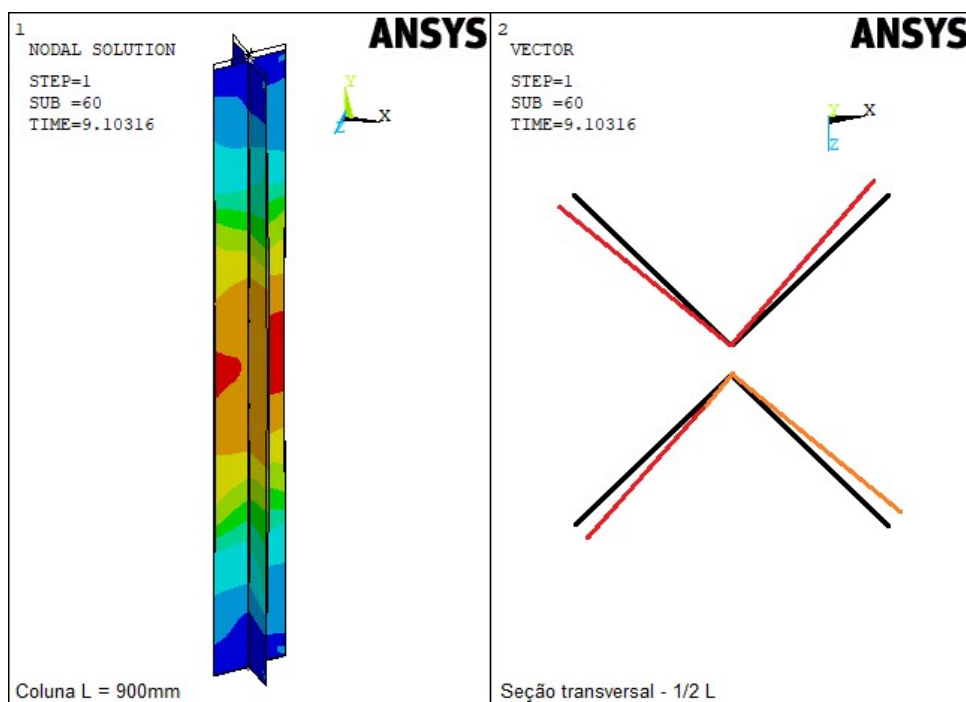


Figura H12 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 900 - 4 - 180, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 482,84\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 900 – 5 – 150
1º Modo de Flambagem

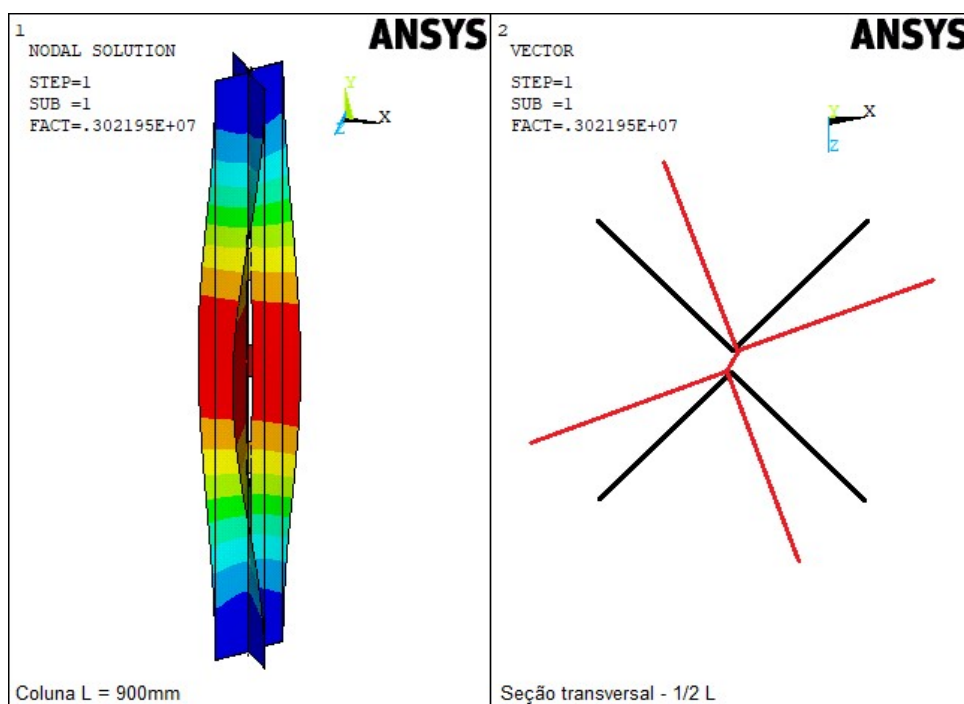


Figura H13 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 900 - 5 - 150, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 3021,95\text{kN}$.

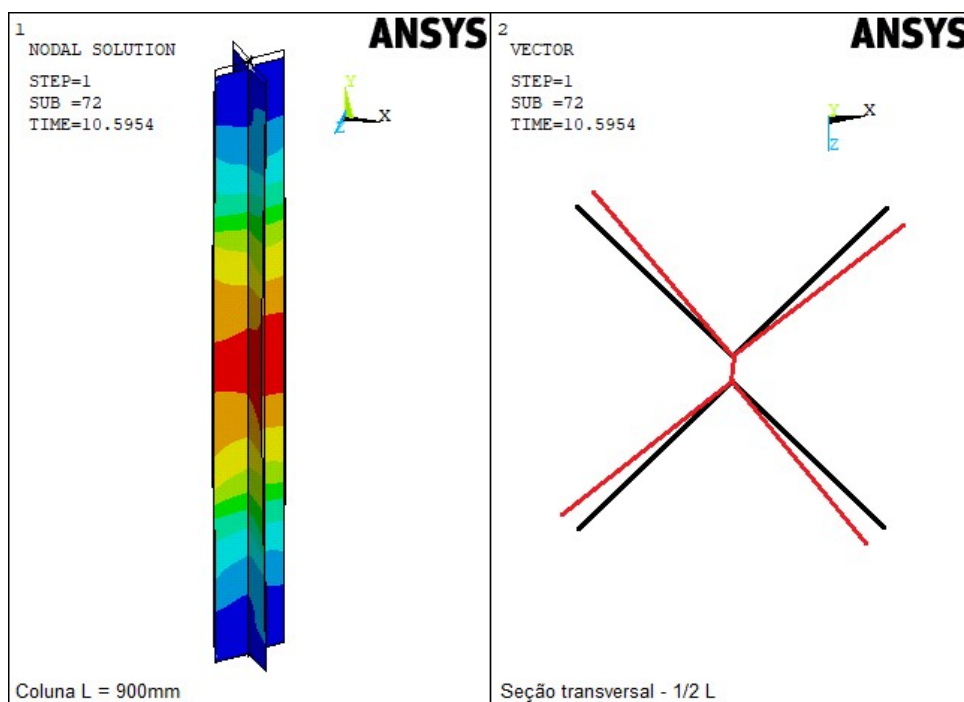


Figura H14 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 900 - 5 - 150, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 490,98\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 900 – 6 – 128
1º Modo de Flambagem

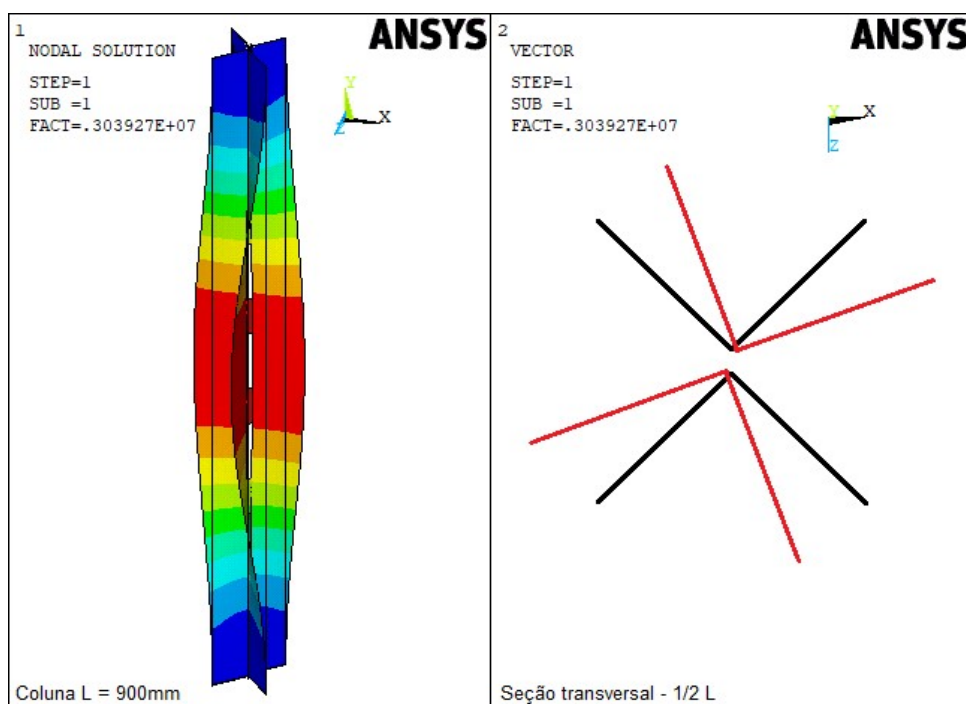


Figura H15 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 900 - 6 - 128, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 3039,27\text{kN}$.

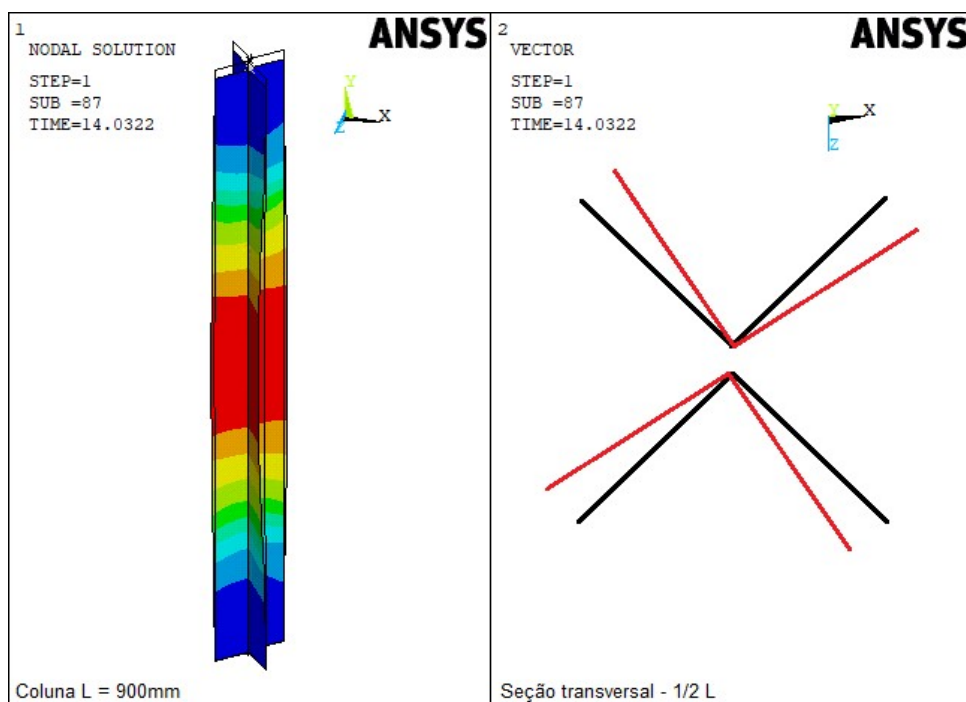


Figura H16 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 900 - 6 - 128, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 501,96\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 900 – 7 – 112
1º Modo de Flambagem

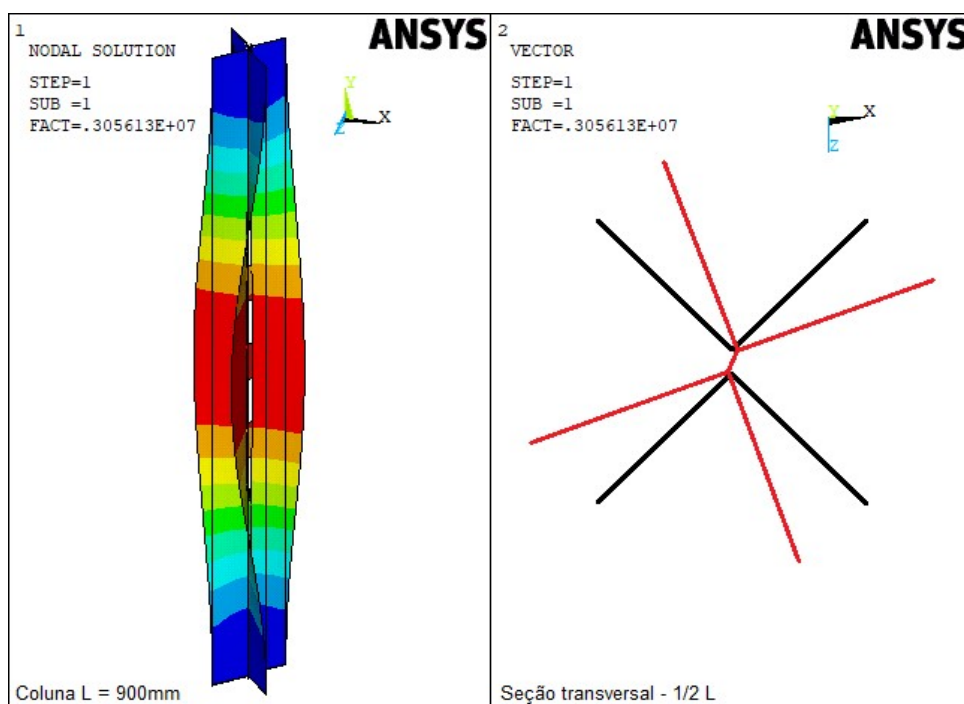


Figura H17 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 900 - 7 - 112, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 3056,13\text{kN}$.

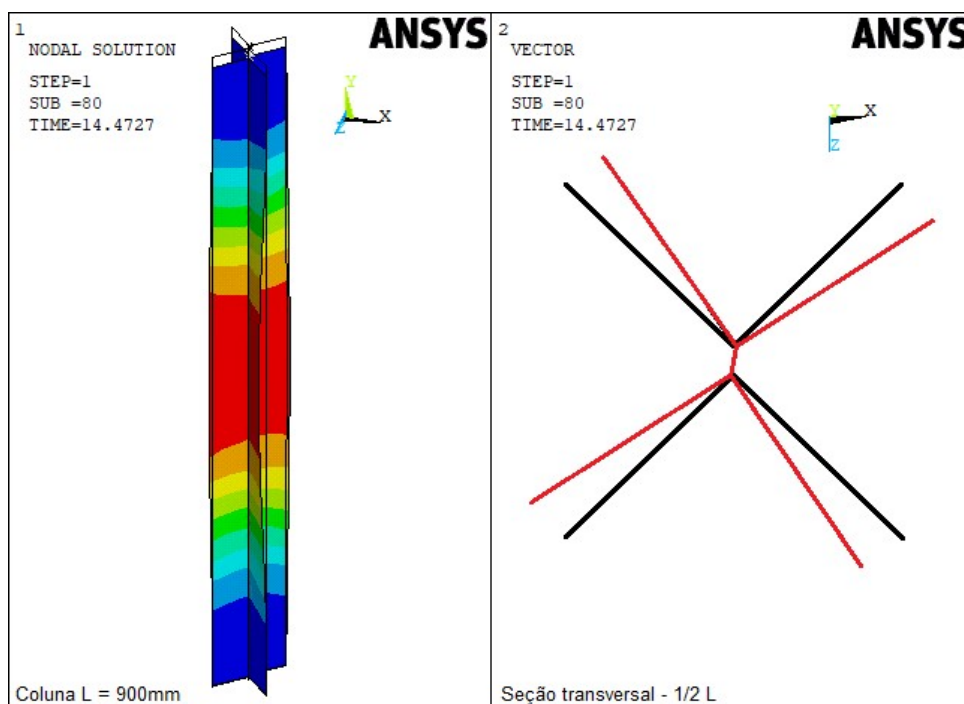


Figura H18 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 900 - 7 - 112, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 505,53\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 900
1º Modo de Flambagem

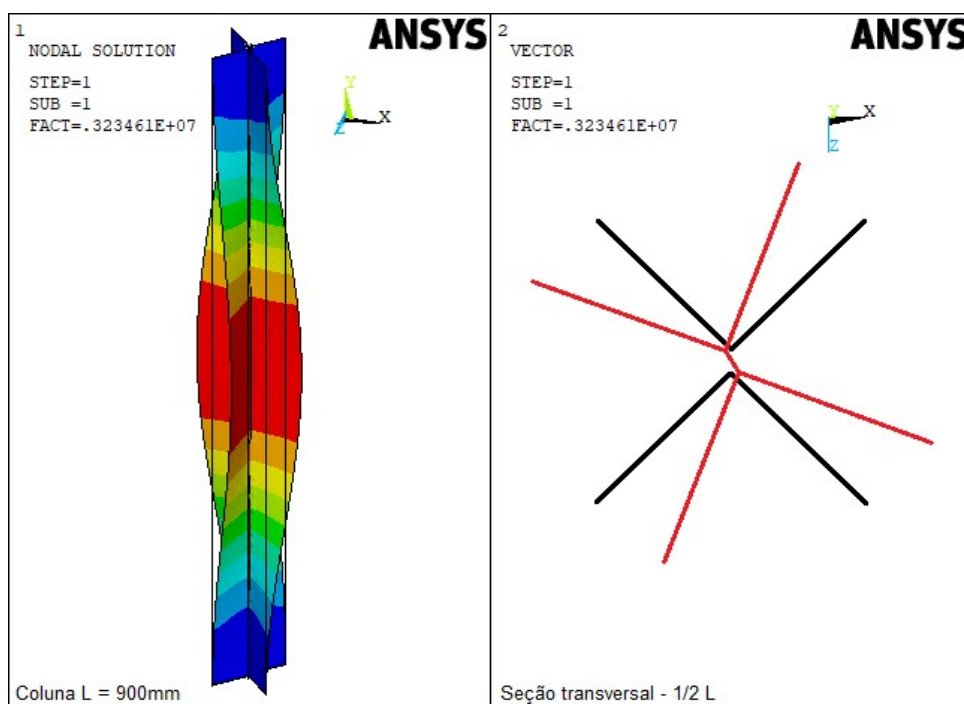


Figura H19 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 900, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 3234,61\text{kN}$.

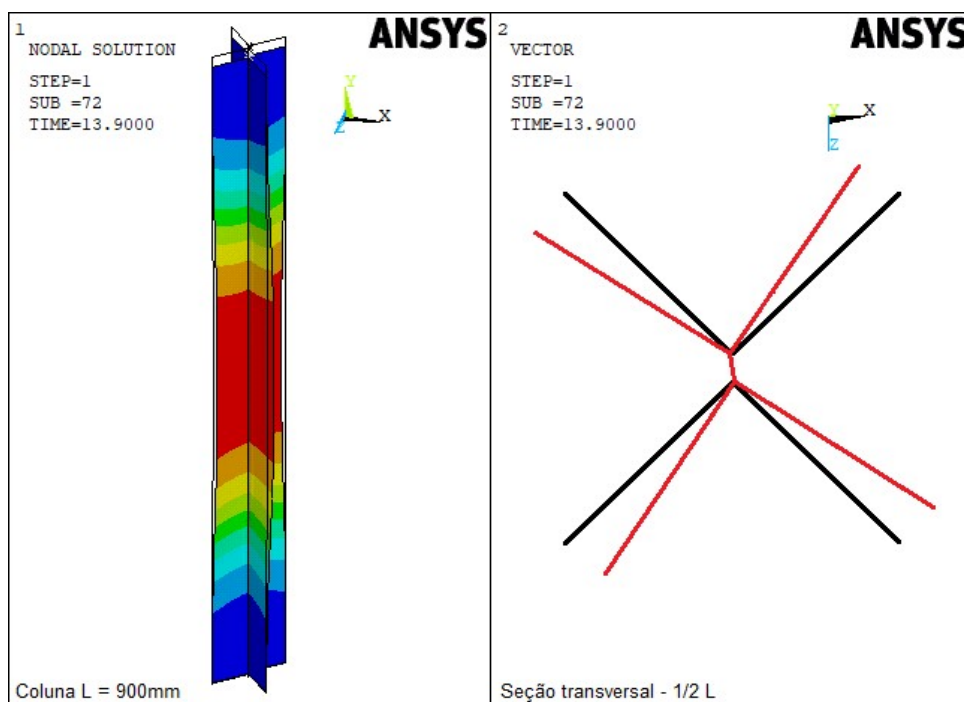


Figura H20 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 900, imperfeição geométrica de $t/10$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 513,88\text{kN}$.

ANEXO I

Este anexo apresenta todos os modelos numéricos, analisados neste trabalho, referentes as colunas com seção transversal formada por cantoneira com dimensões de 50,8x7,93mm e comprimento de 1400mm.

- SL – 50,8x7,93 – 1400
1º Modo de Flambagem

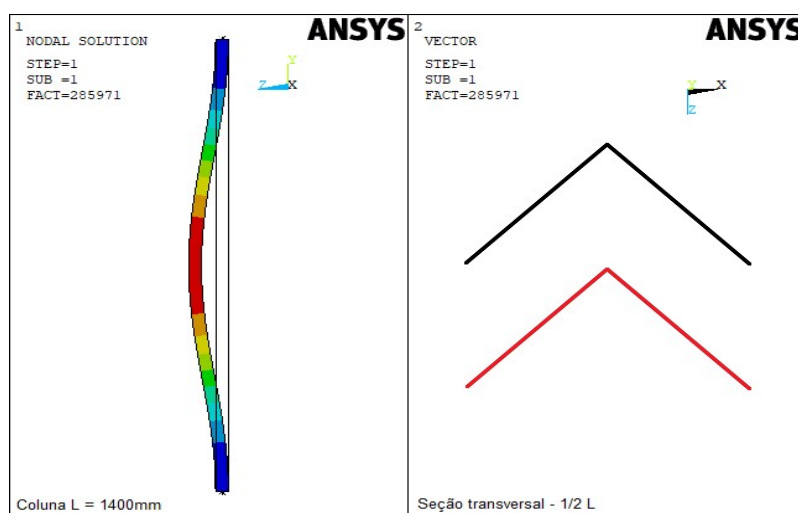


Figura I1 – Análise de flambagem elástica: SL - 50,8x7,93 - 1400, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 285,97\text{kN}$.

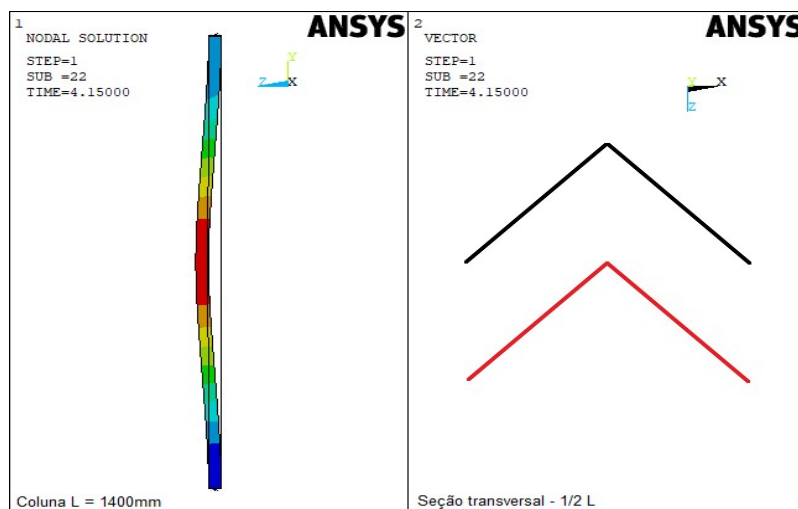


Figura I2 – Análise não linear: SL - 50,8x7,93 - 1400, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 124,40\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 1400 – 0
1º Modo de Flambagem

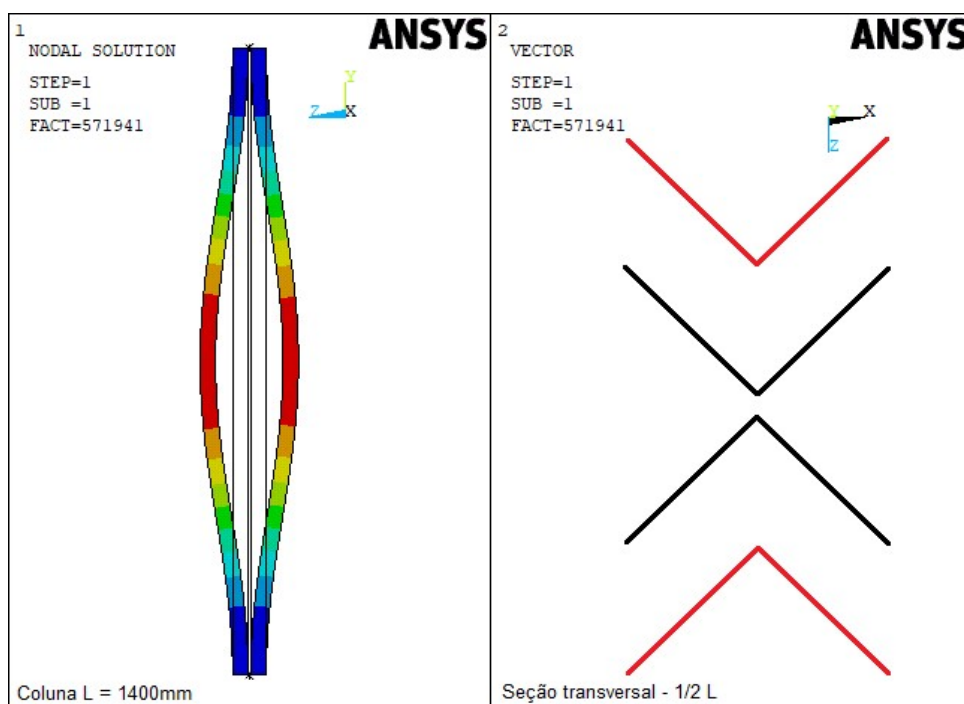


Figura I3 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 0, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 571,94\text{kN}$.

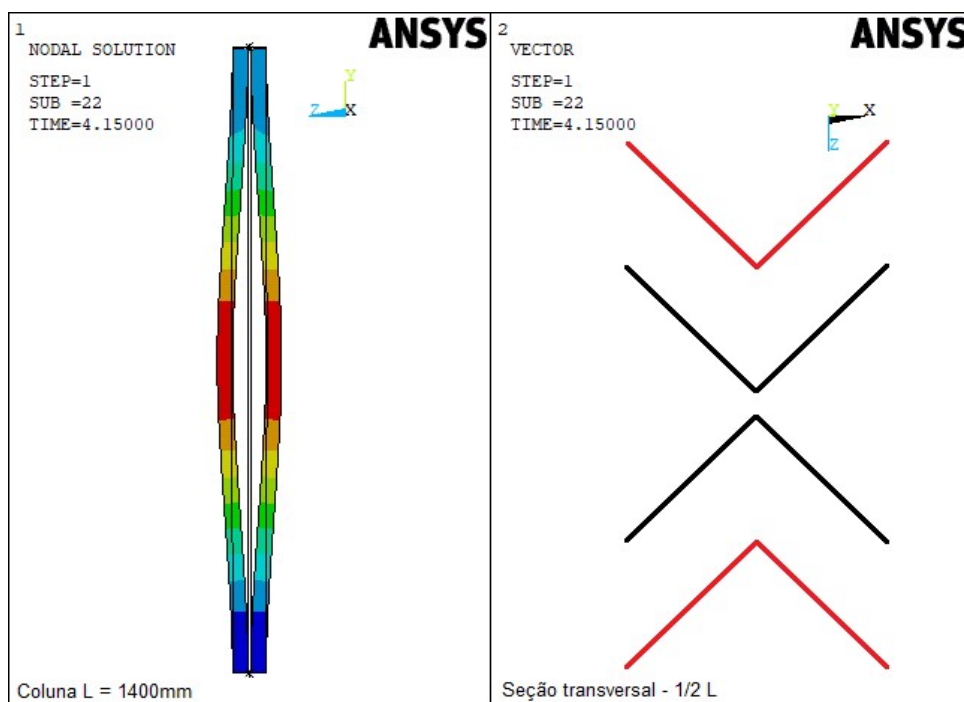


Figura I4 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 0, imperfeição geométrica de L/1000 aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 248,91\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 1400 – 1 – 700
1º Modo de Flambagem

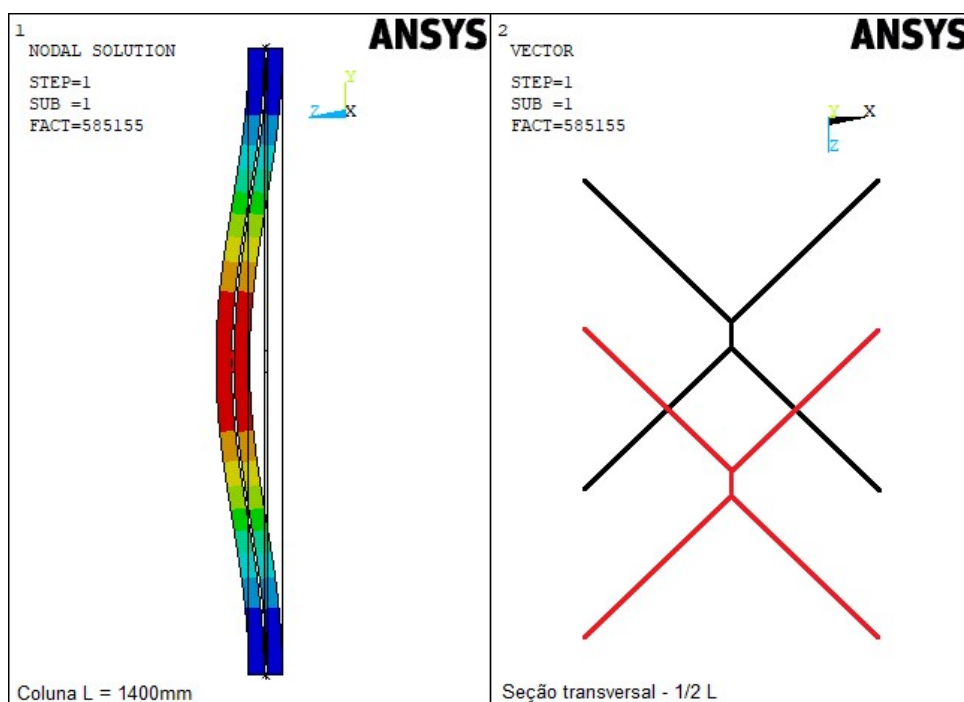


Figura I5 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 1 - 700, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 585,16\text{kN}$.

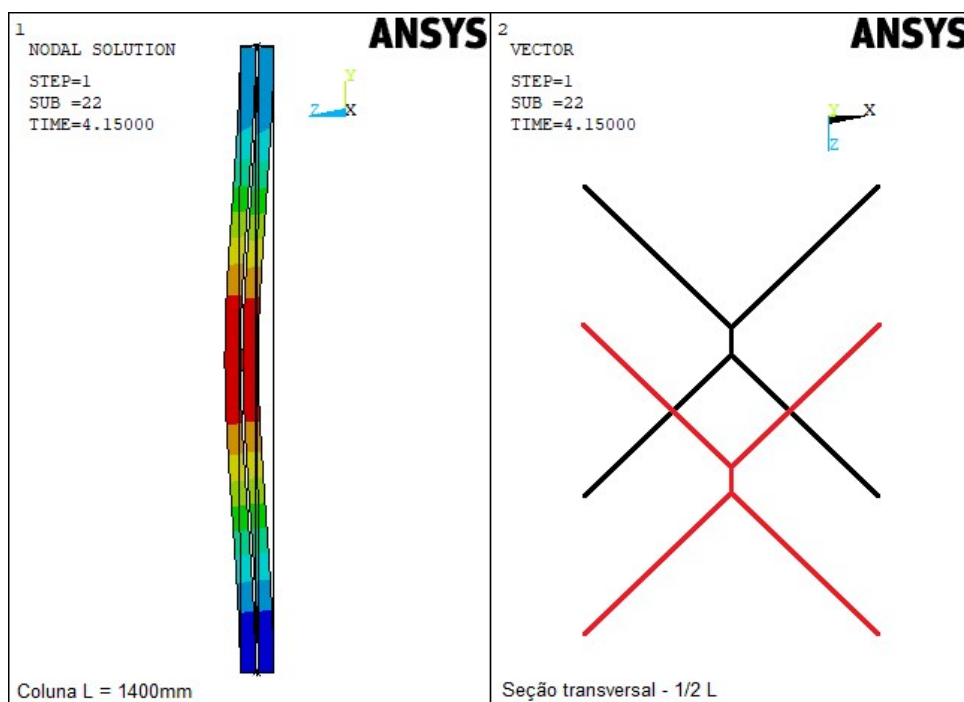


Figura I6 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 1 - 700, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 251,89\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 1400 – 2 – 466
1º Modo de Flambagem

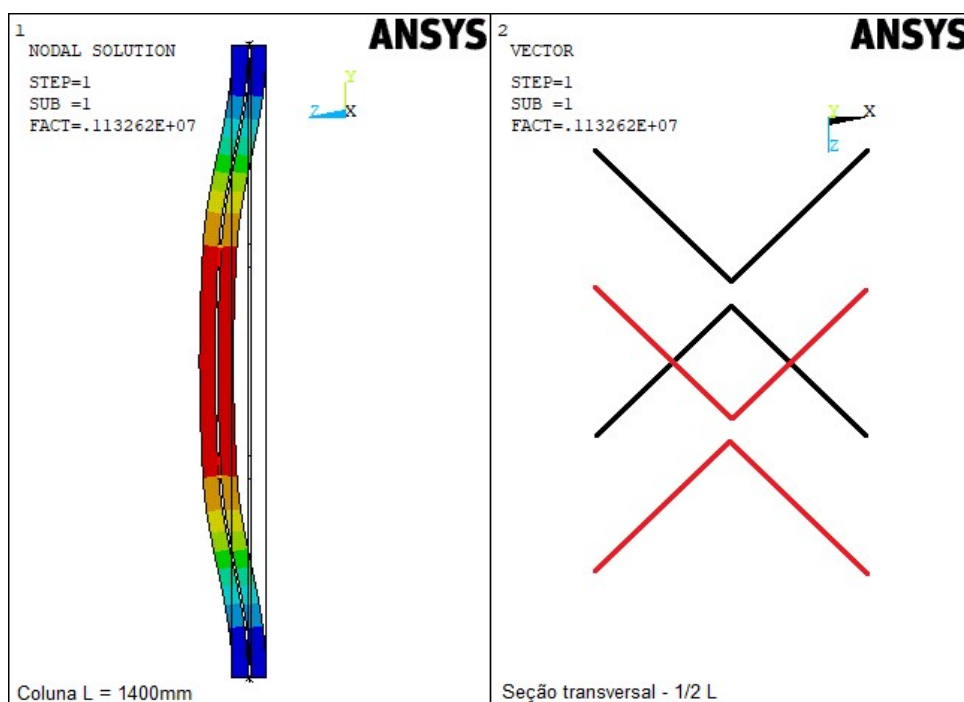


Figura I7 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 2 - 466, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1132,62\text{kN}$.

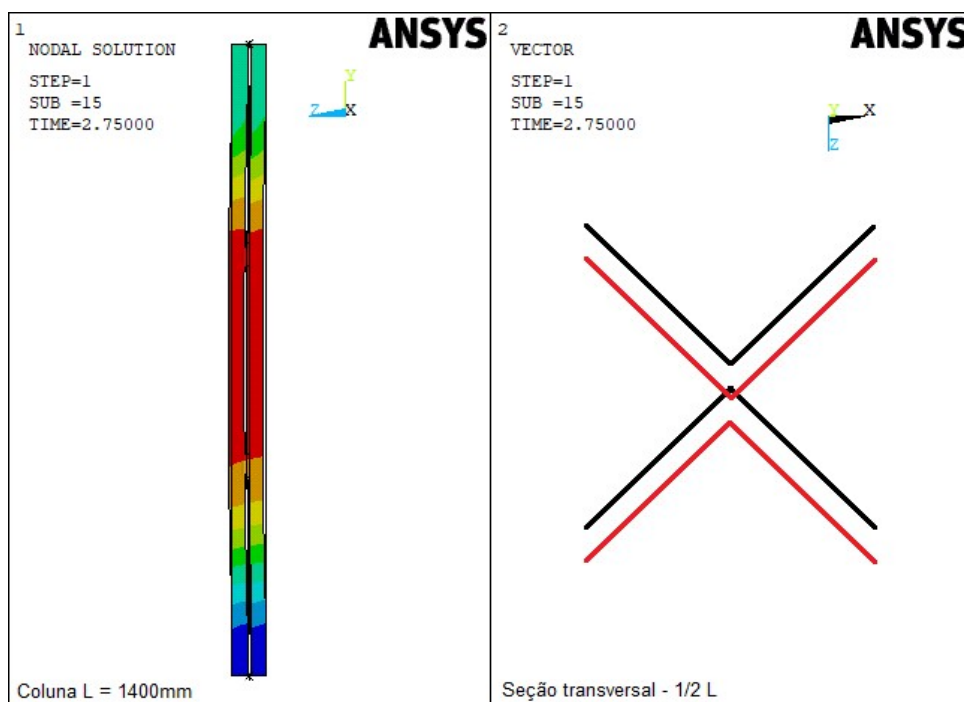


Figura I8 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 2 - 466, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 321,09\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 1400 – 3 – 350
1º Modo de Flambagem

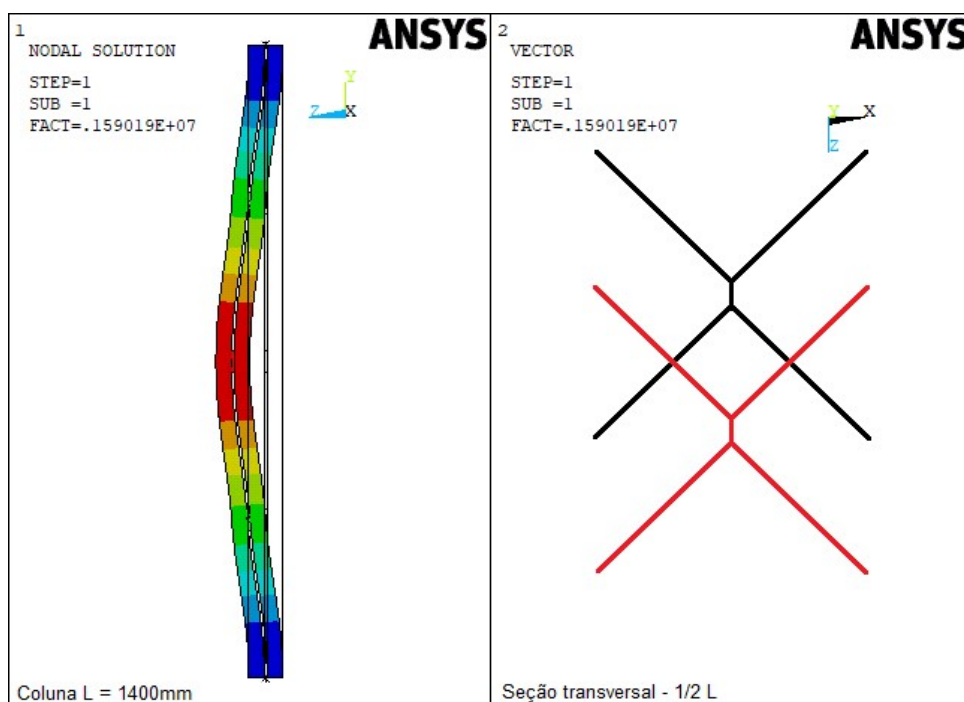


Figura I9 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 3 - 350, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1590,19\text{kN}$.

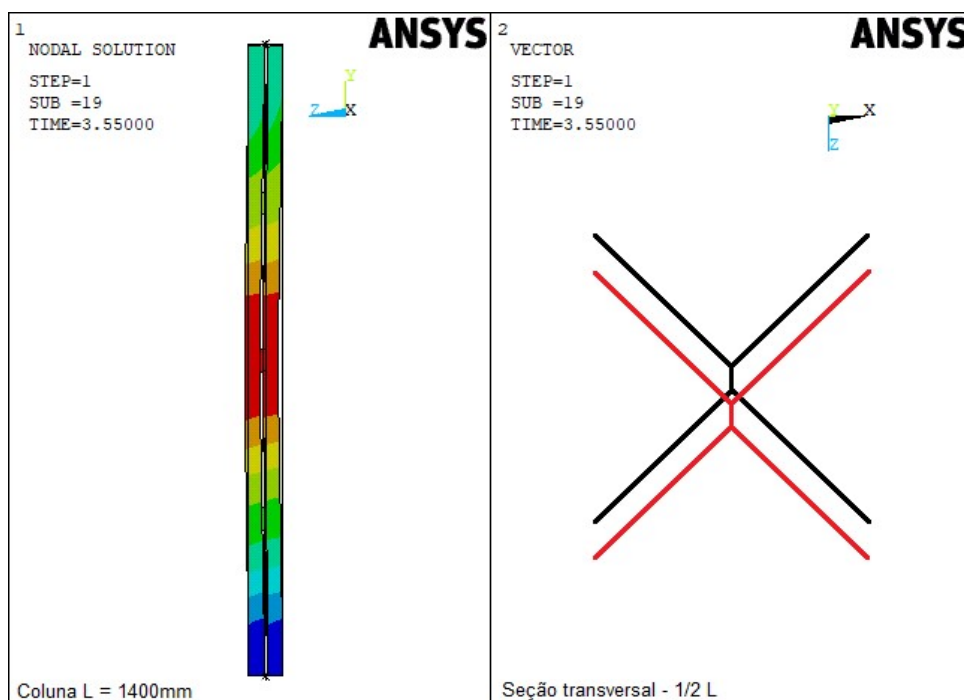


Figura I10 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 3 - 350, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 359,83\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 1400 – 4 – 280
1º Modo de Flambagem

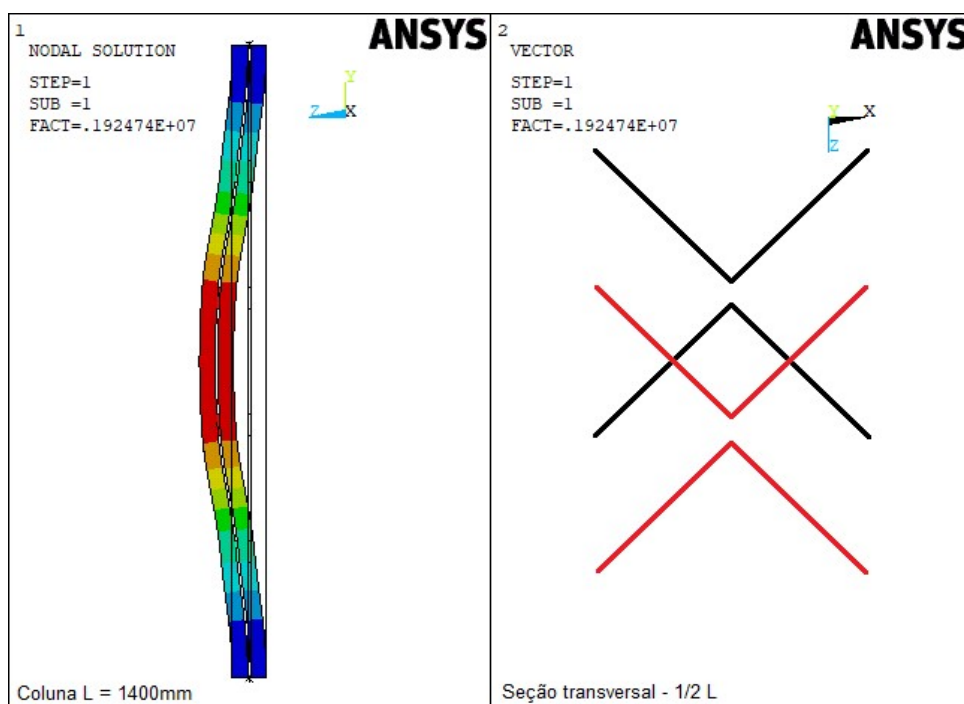


Figura I11 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 4 - 280, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 1924,74\text{kN}$.

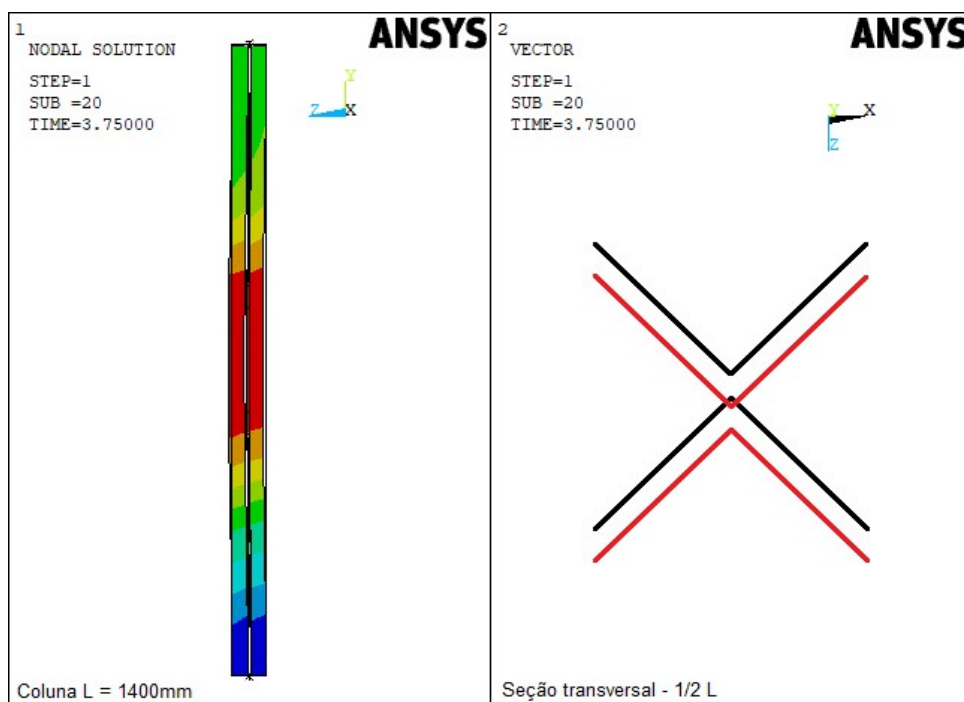


Figura I12 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 4 - 280, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 374,55\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 1400 – 5 – 233
1º Modo de Flambagem

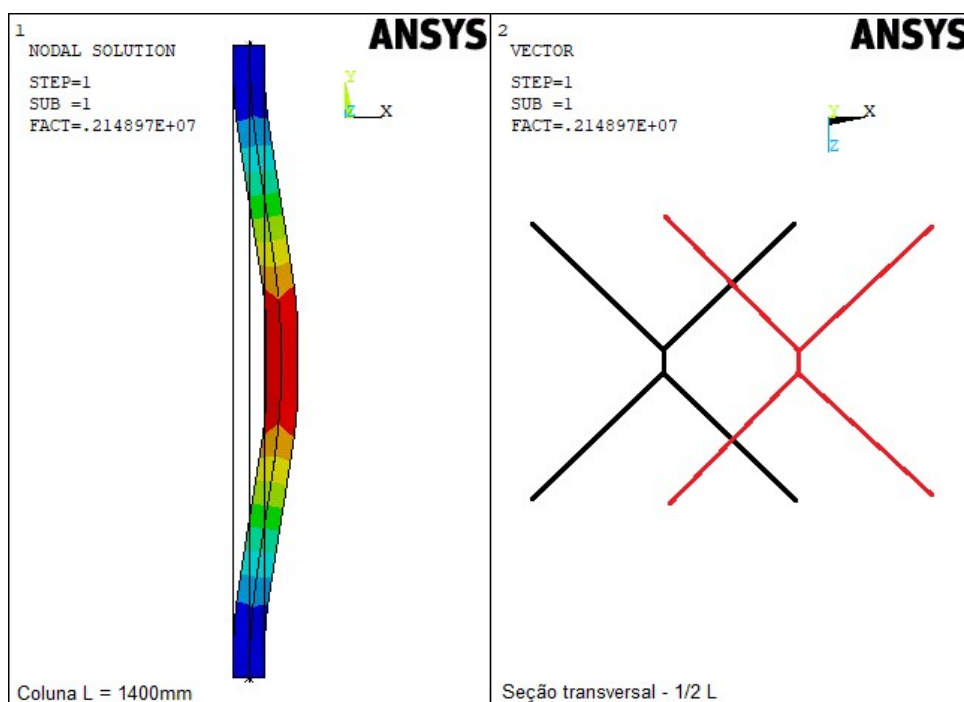


Figura I13 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 5 - 233, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 2148,97\text{kN}$.

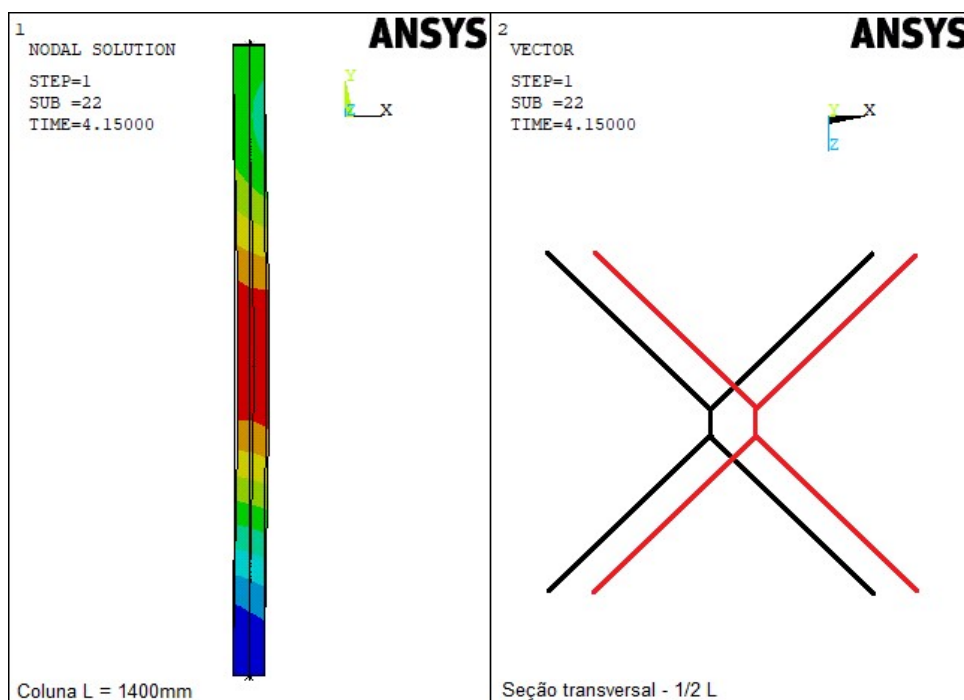


Figura I14 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 5 - 233, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 379,40\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 1400 – 6 – 200
- 1º Modo de Flambagem

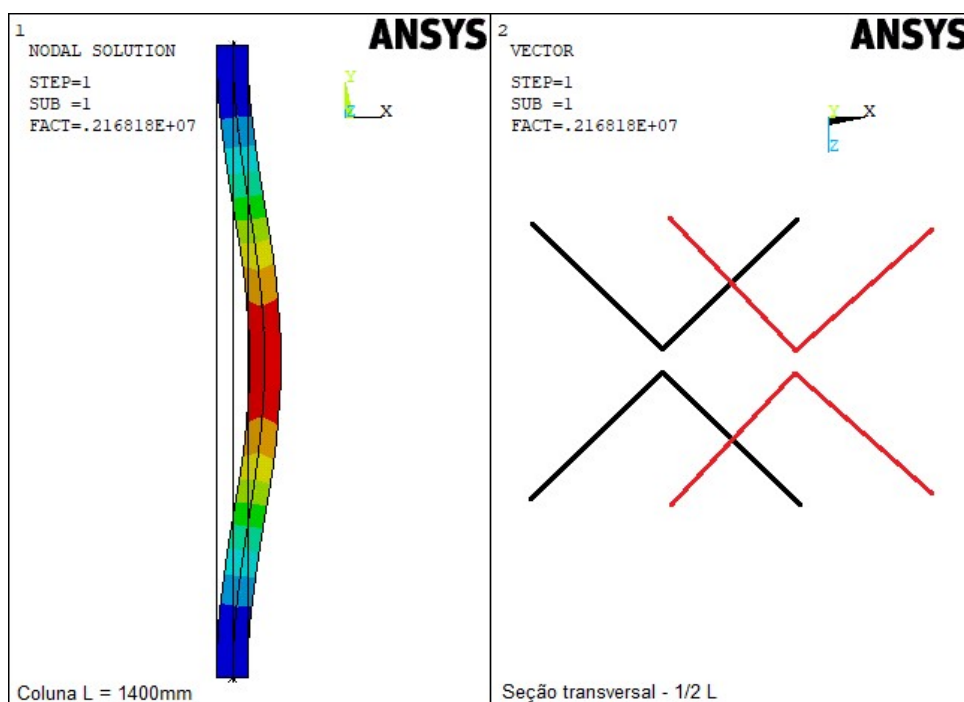


Figura I15 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 6 - 200, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 2168,18\text{kN}$.

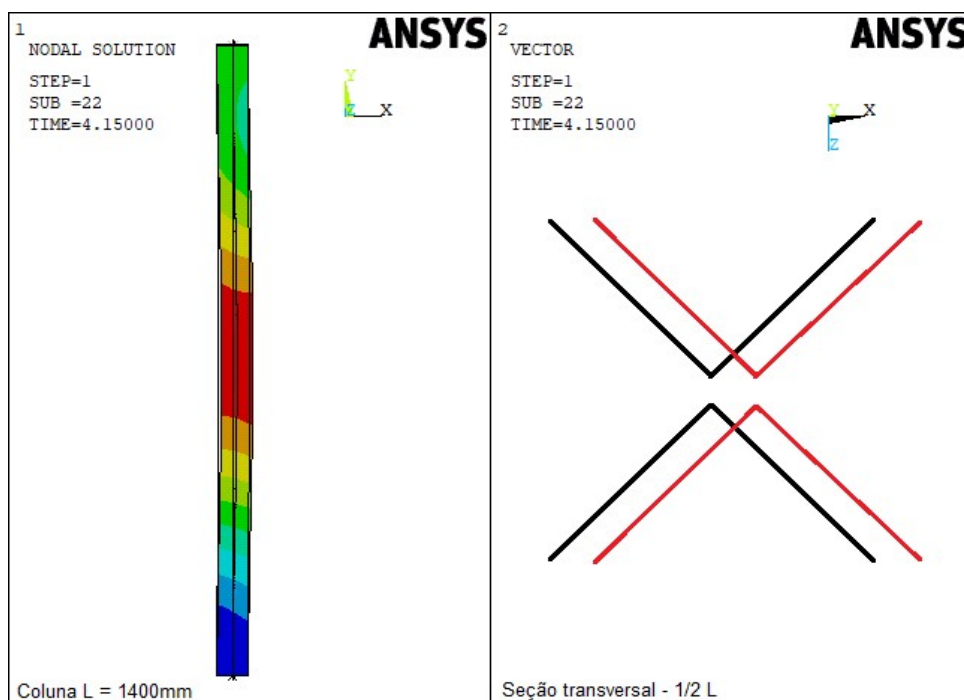


Figura I16 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 6 - 200, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 380,27\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 1400 – 7 – 175
1º Modo de Flambagem

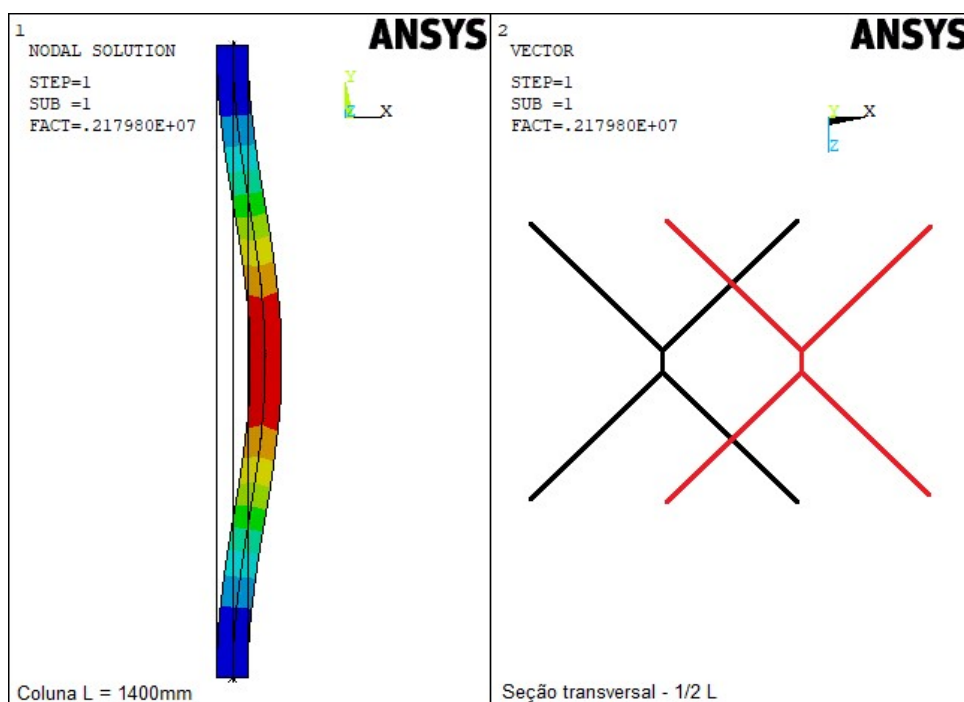


Figura I17 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 7 - 175, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 2179,80\text{kN}$.

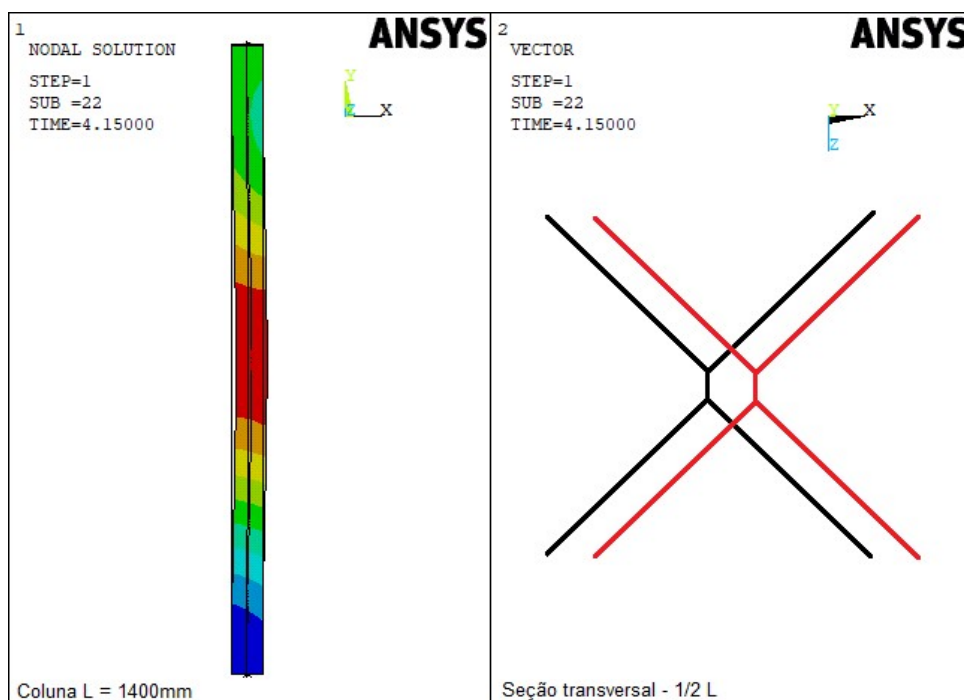


Figura I18 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 1400 - 7 - 175, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 380,33\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 1400
1º Modo de Flambagem

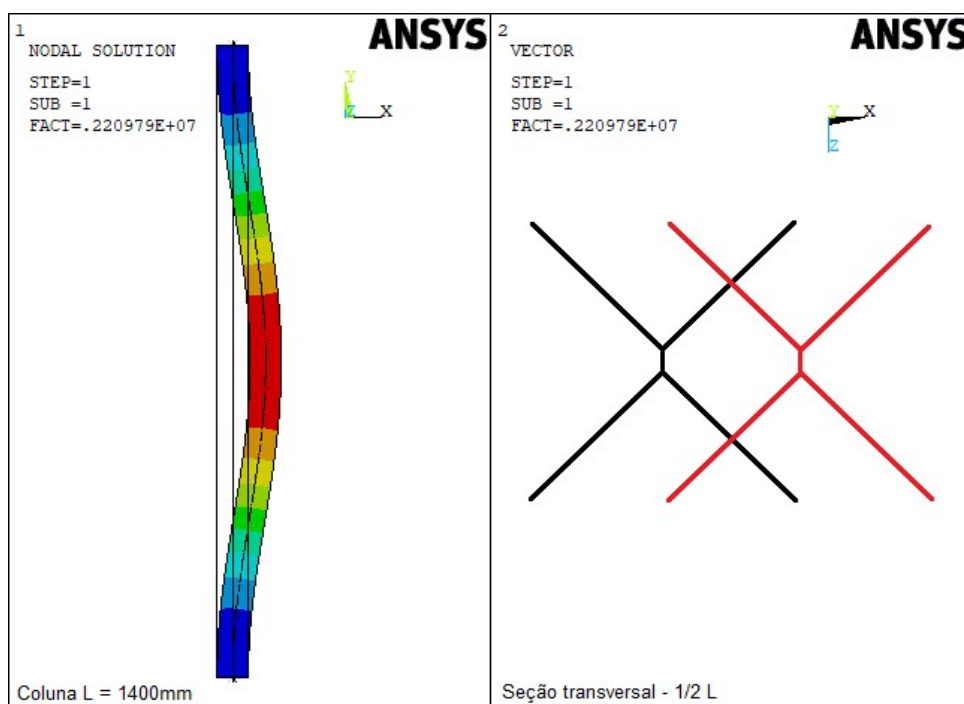


Figura I19 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 1400, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 2209,79\text{kN}$.

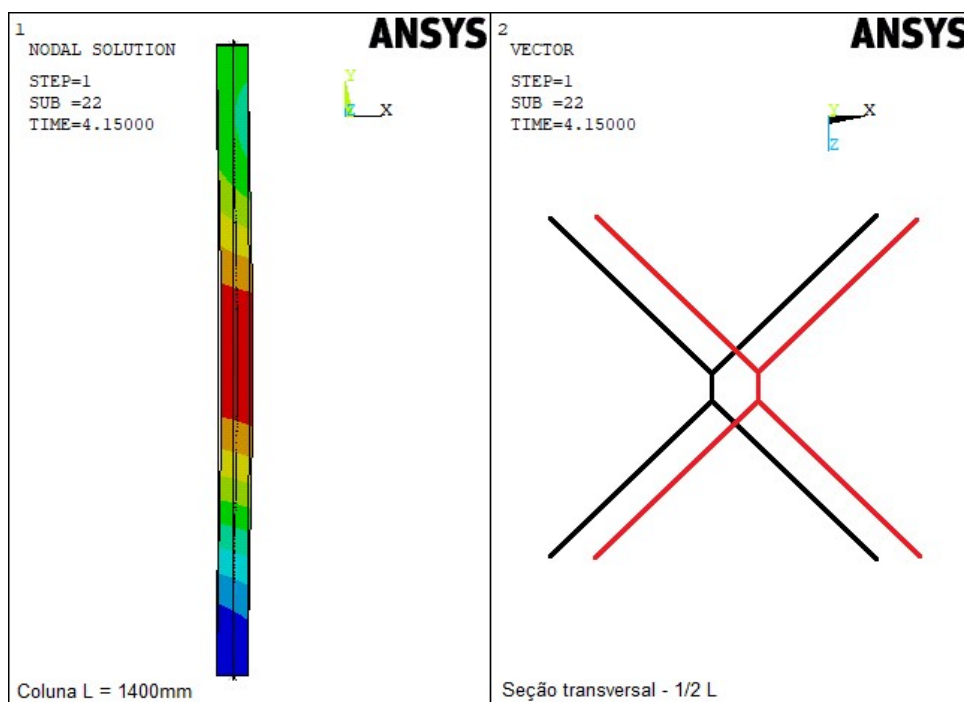


Figura I20 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 1400, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 389,83\text{kN}$.

ANEXO J

Este anexo apresenta todos os modelos numéricos, analisados neste trabalho, referentes as colunas com seção transversal formada por cantoneira com dimensões de 50,8x7,93mm e comprimento de 2200mm.

- SL – 50,8x7,93 – 2200
1º Modo de Flambagem

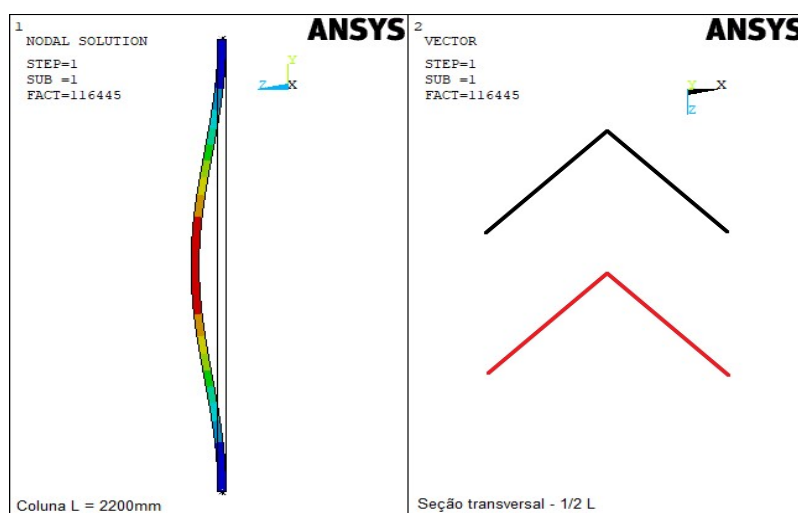


Figura J1 – Análise de flambagem elástica: SL - 50,8x7,93 - 2200, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 116,45\text{kN}$.

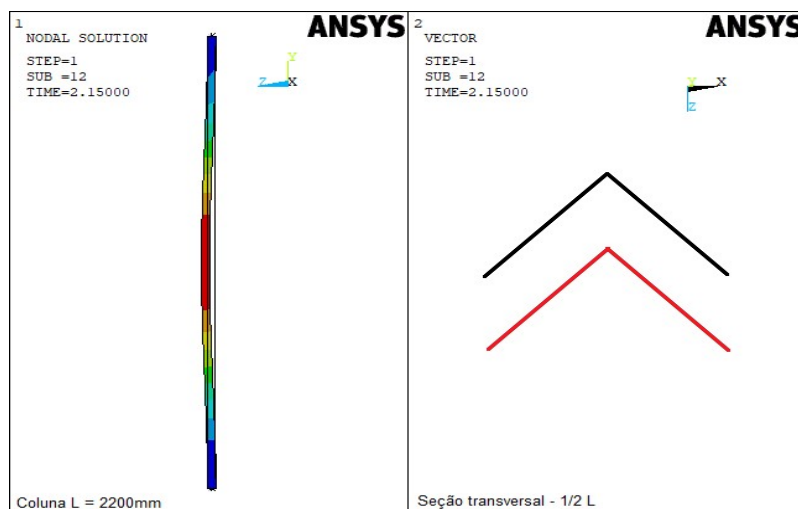


Figura J2 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 2200, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 72,32\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 2200
1º Modo de Flambagem

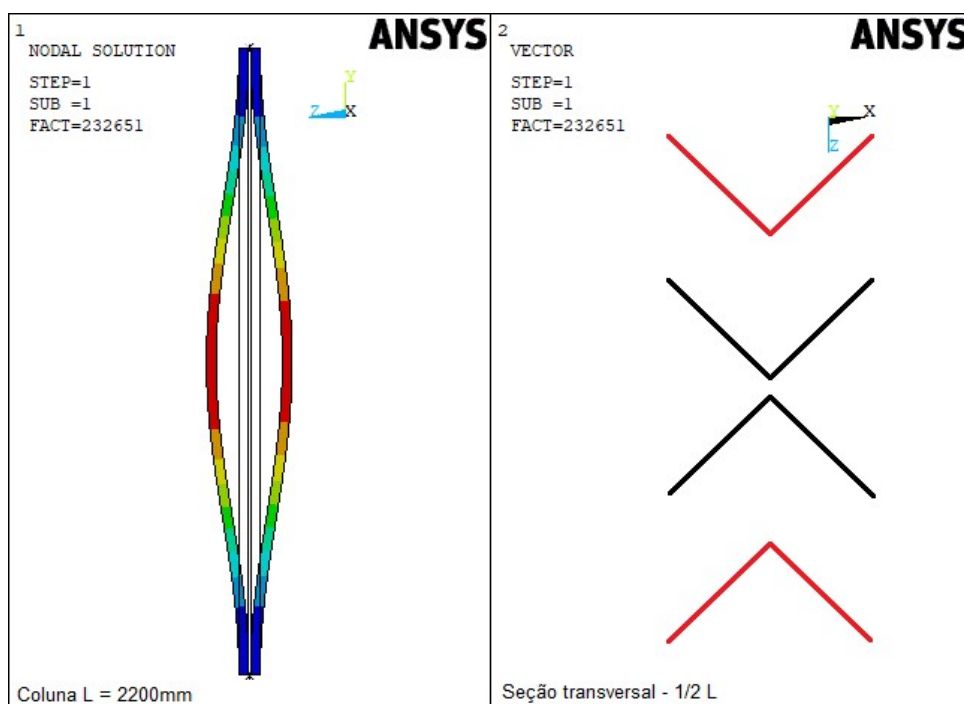


Figura J3 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 2200, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 232,65\text{kN}$.

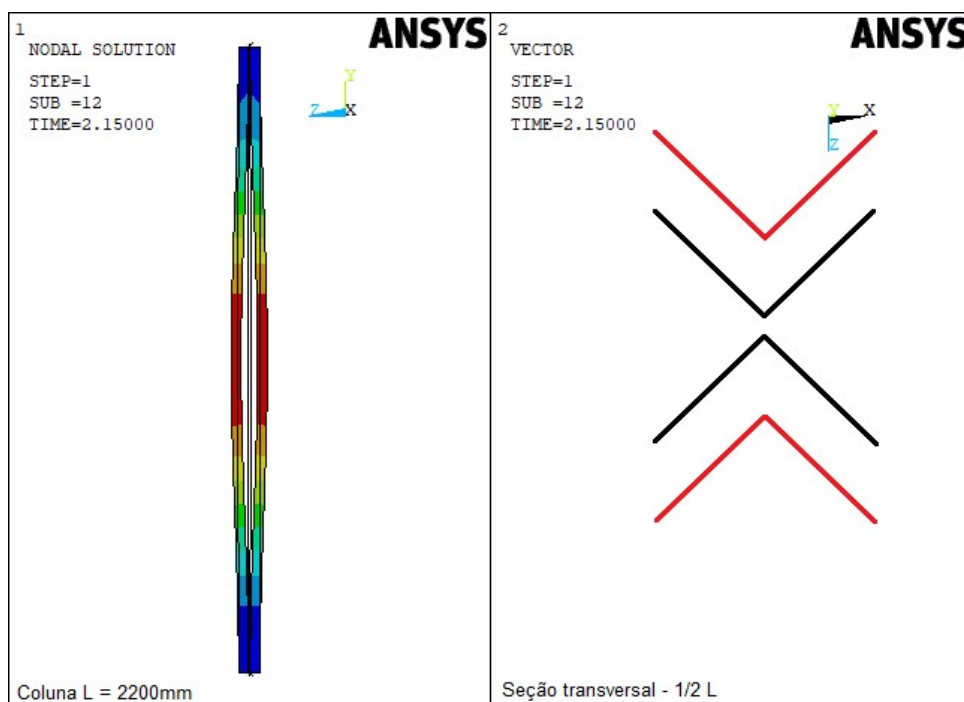


Figura J4 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 2200, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 144,66\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 2200 – 1 – 1100
- 1º Modo de Flambagem

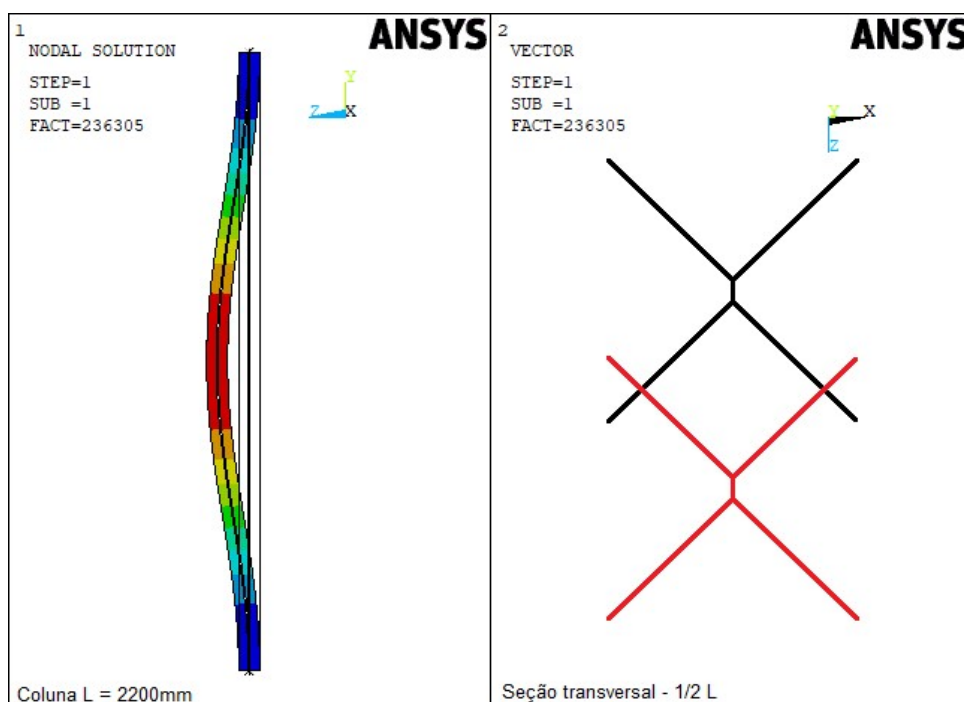


Figura J5 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 2200 - 1 - 1100, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 236,31\text{kN}$.

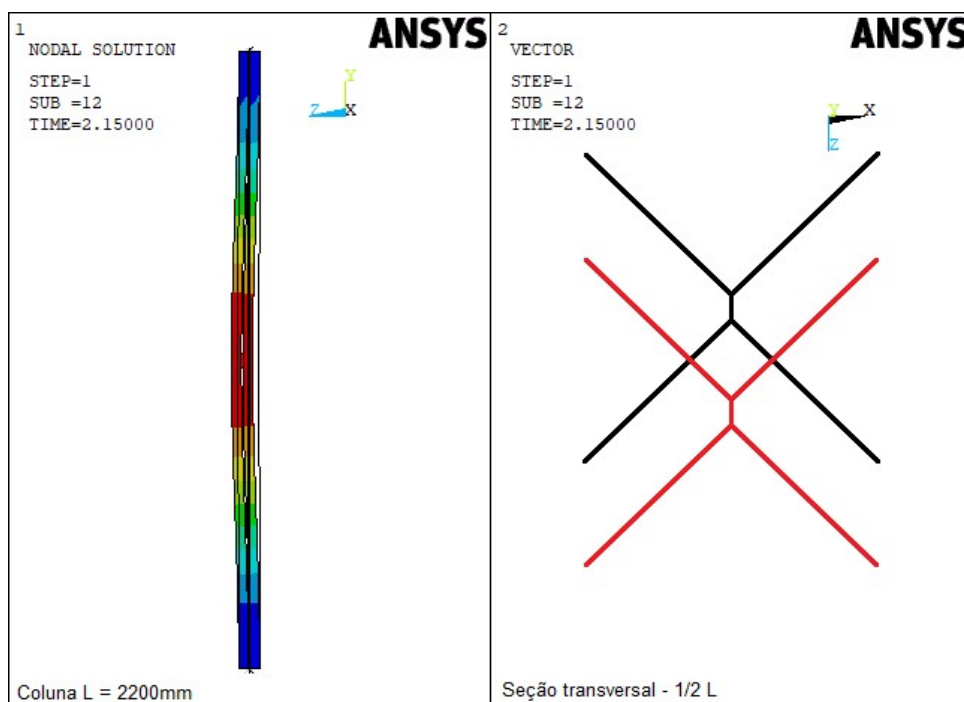


Figura J6 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 2200 - 1 - 1100, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 146,27\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 2200 – 2 – 733
1º Modo de Flambagem

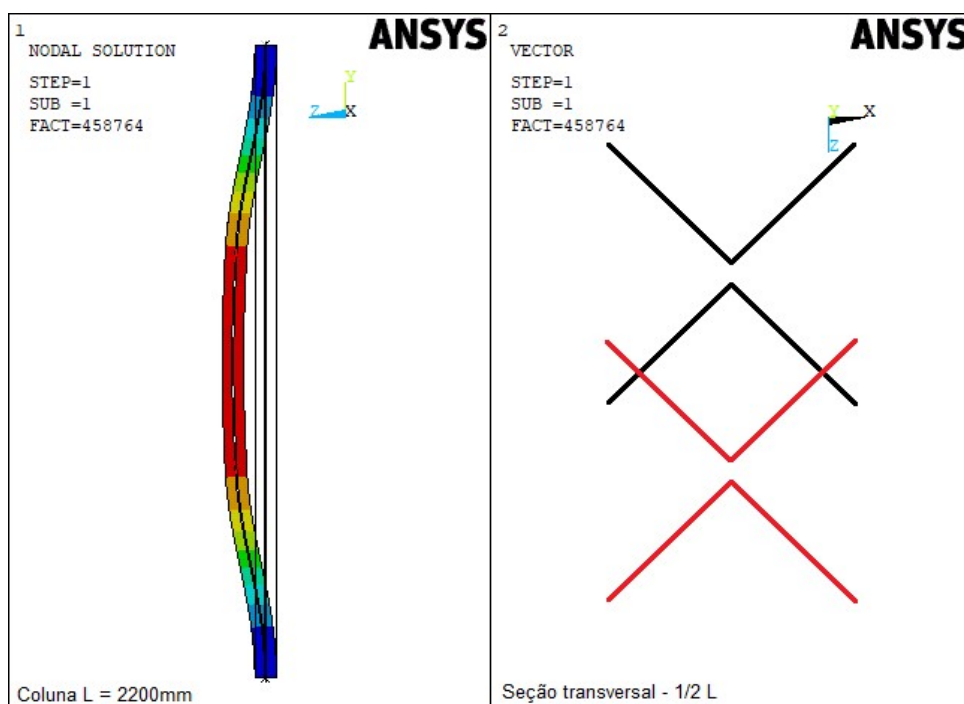


Figura J7 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 2200 - 2 - 733, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 458,76\text{kN}$.

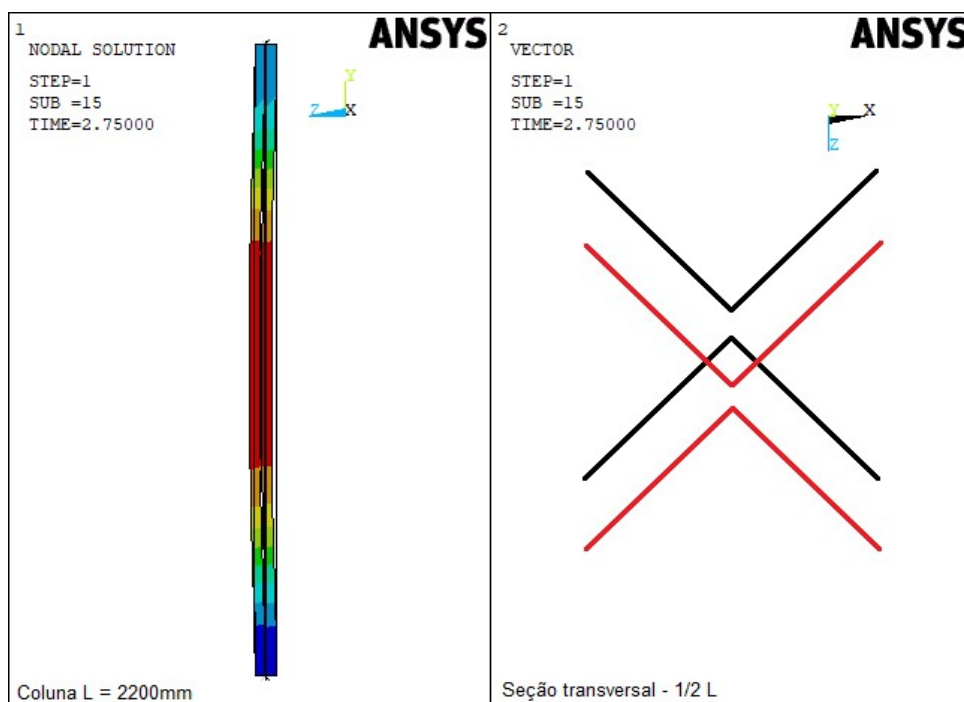


Figura J8 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 2200 - 2 - 733, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 218,77\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 2200 – 3 – 550
1º Modo de Flambagem

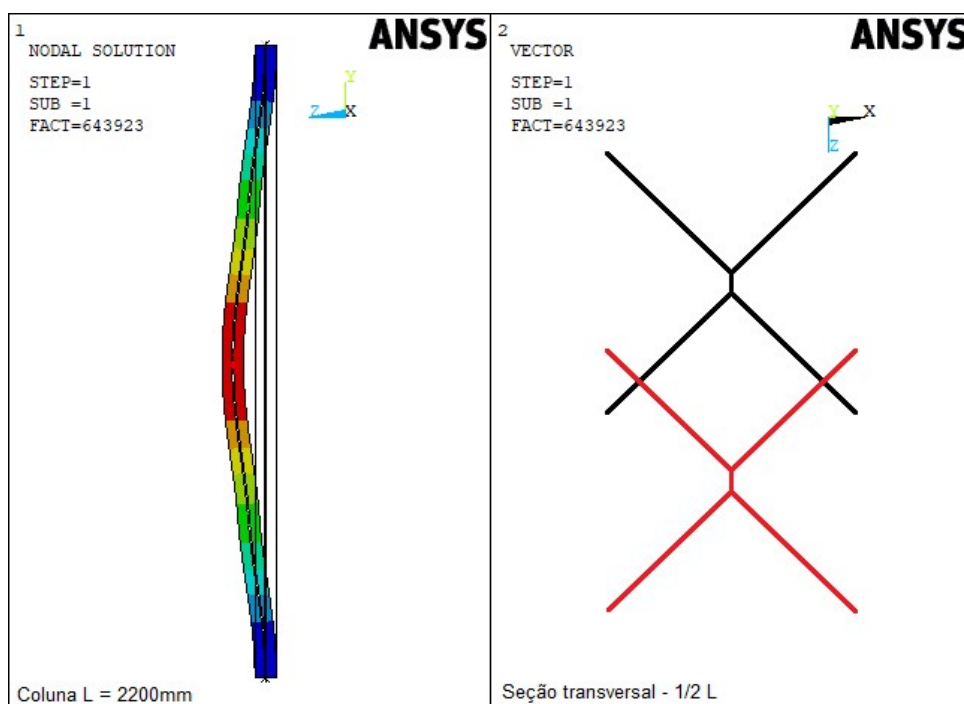


Figura J9 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 2200 - 3 - 550, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 643,92\text{kN}$.

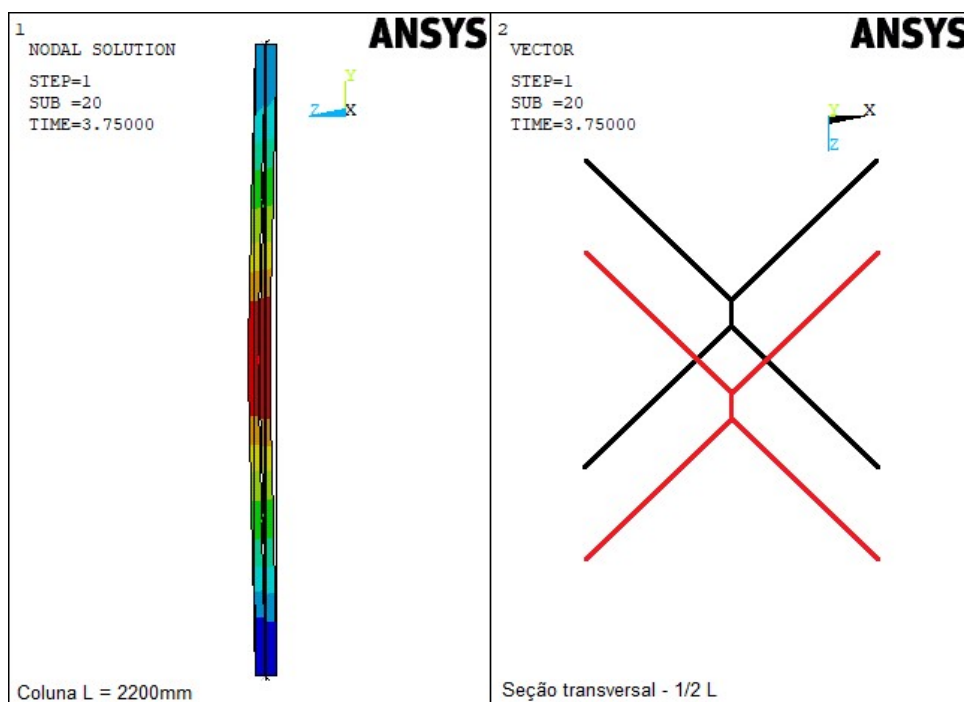


Figura J10 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 2200 - 3 - 550, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 264,65\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 2200 – 4 – 440
1º Modo de Flambagem

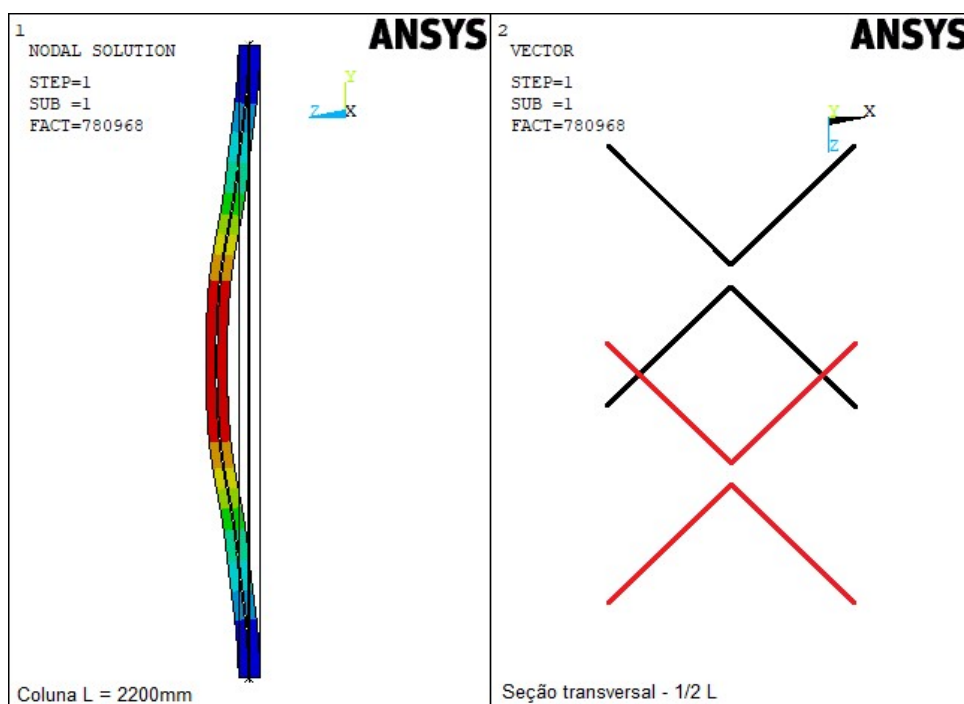


Figura J11 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 2200 - 4 - 440, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 780,97\text{kN}$.

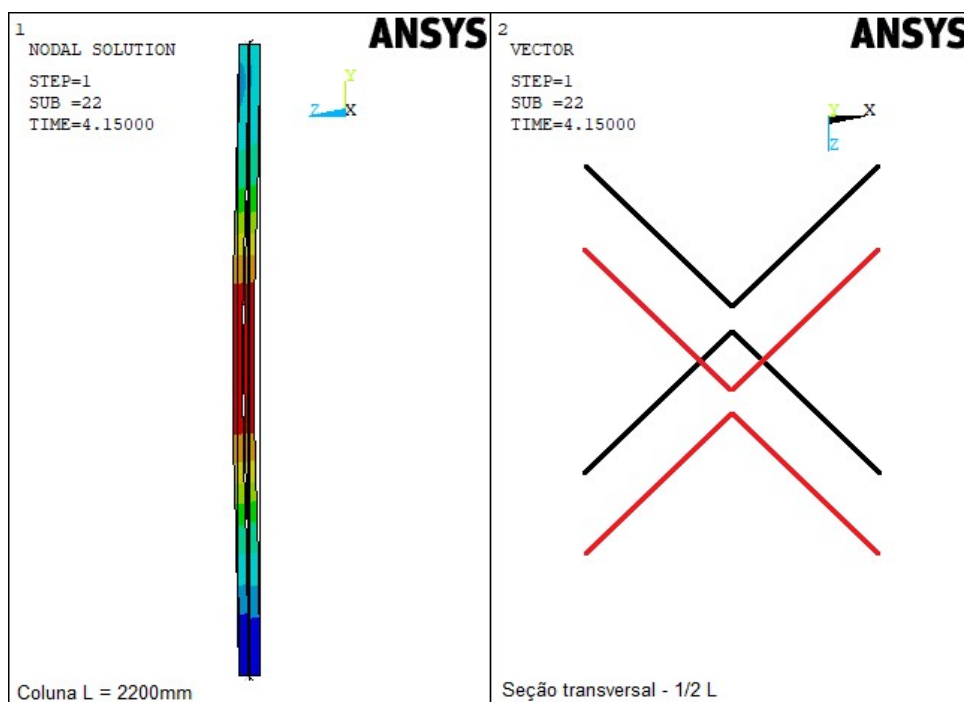


Figura J12 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 2200 - 4 - 440, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 286,05\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 2200 – 5 – 367
1º Modo de Flambagem

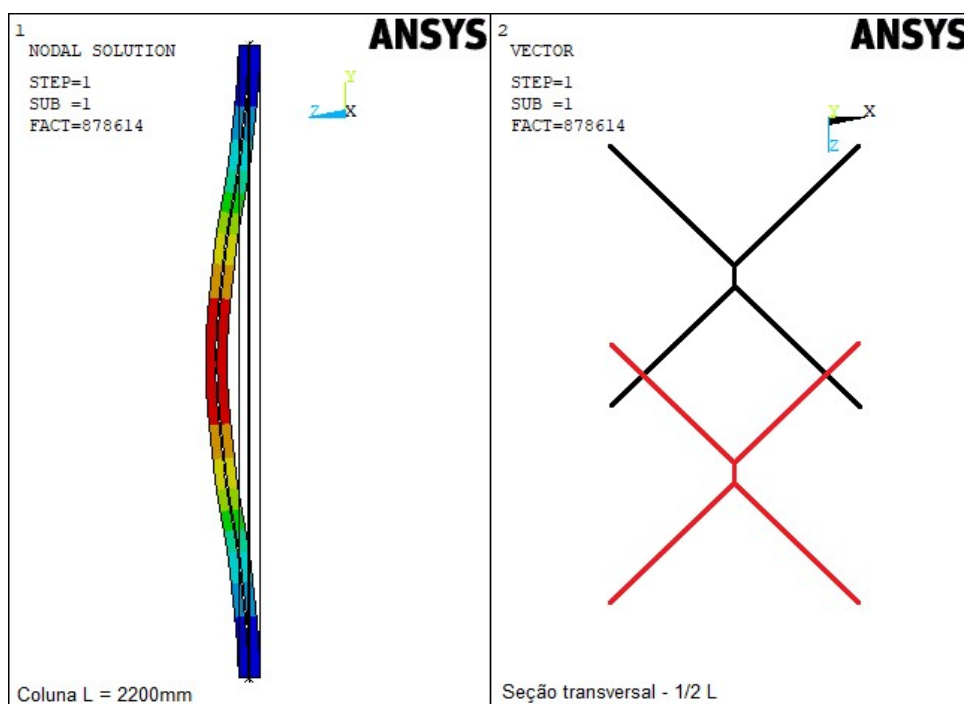


Figura J13 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 2200 - 5 - 367, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 878,61\text{kN}$.

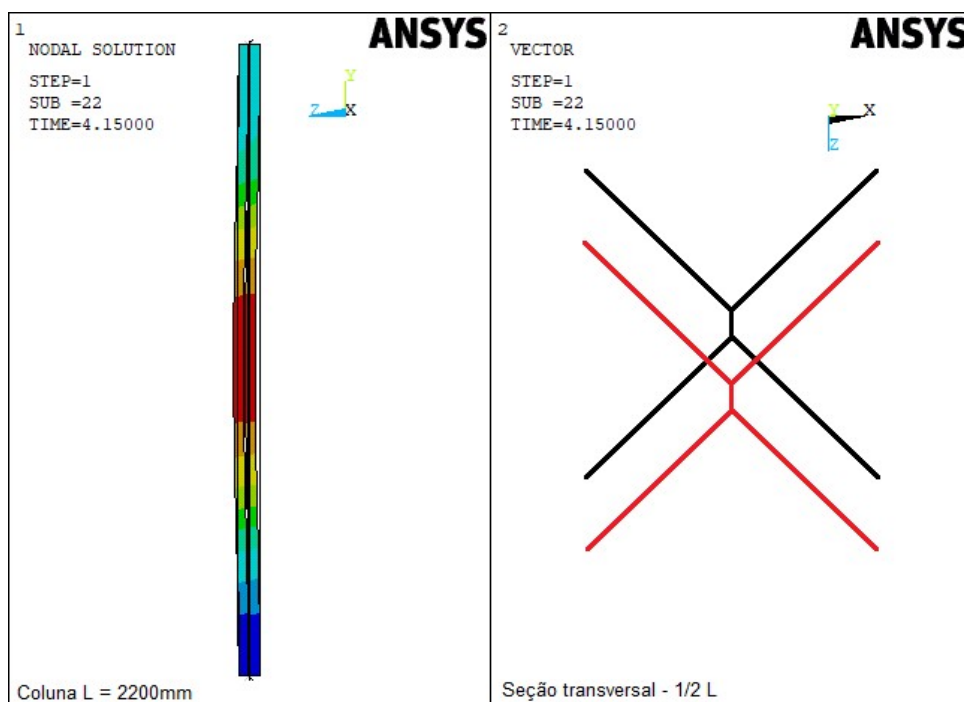


Figura J14 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 2200 - 5 - 367, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 299,58\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 2200 – 6 – 314
1º Modo de Flambagem

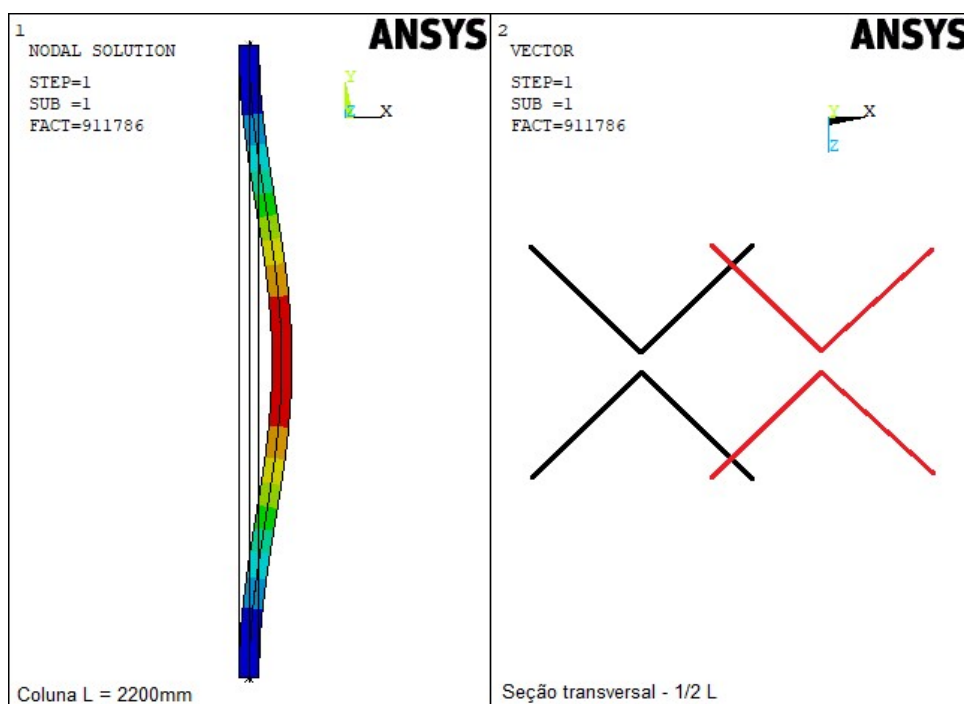


Figura J15 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 2200 - 6 - 314, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 911,79\text{kN}$.

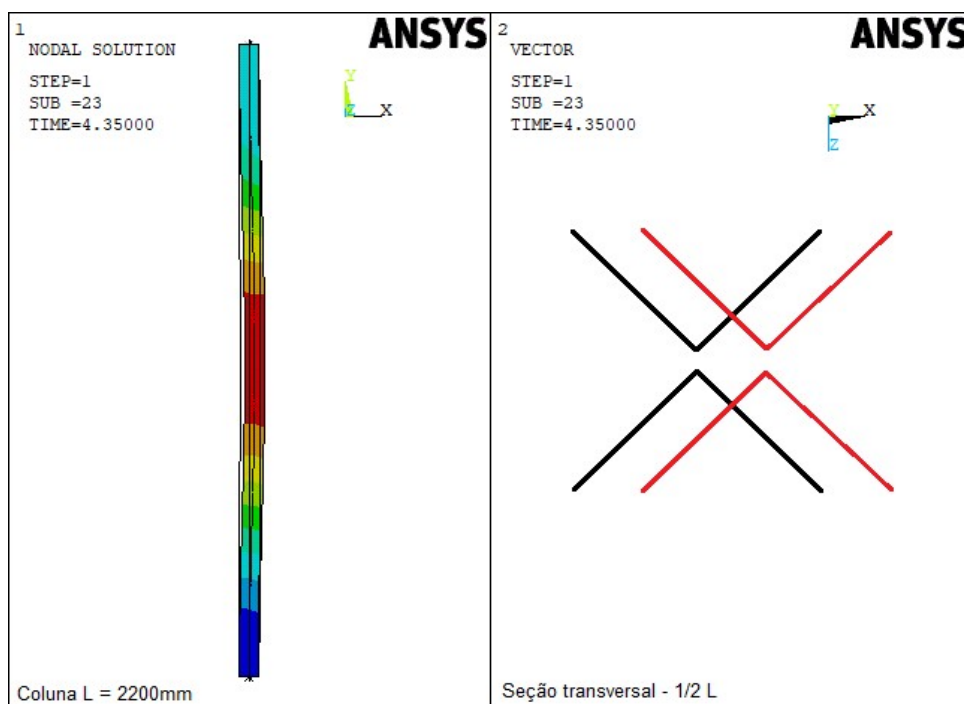


Figura J16 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 2200 - 6 - 314, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 301,26\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 2200 – 7 – 275
1º Modo de Flambagem

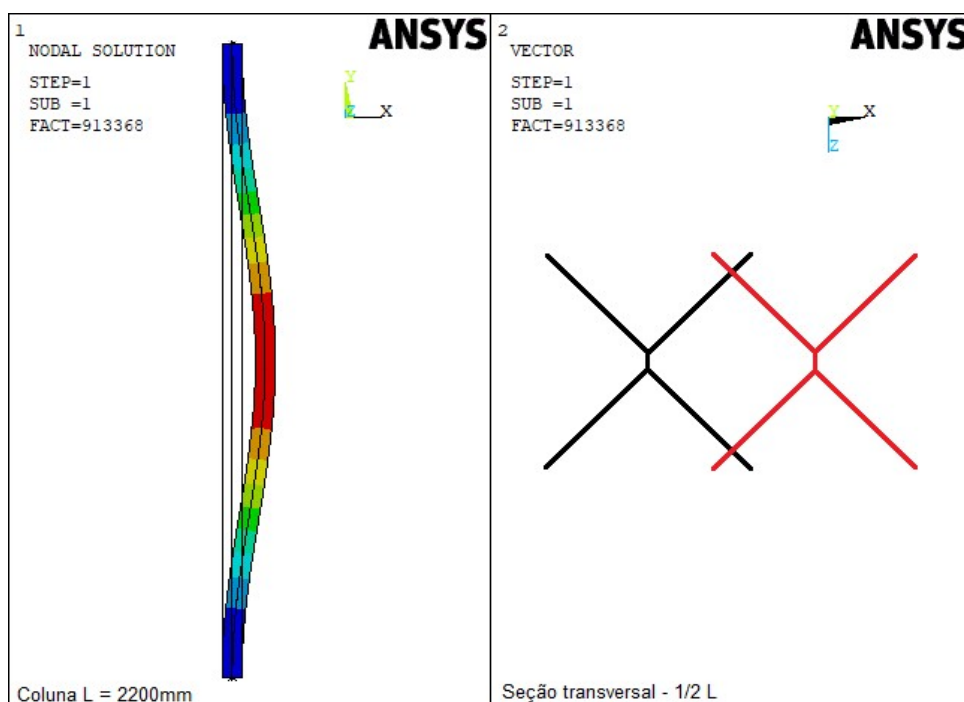


Figura J17 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 2200 - 7 - 275, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 913,37\text{kN}$.

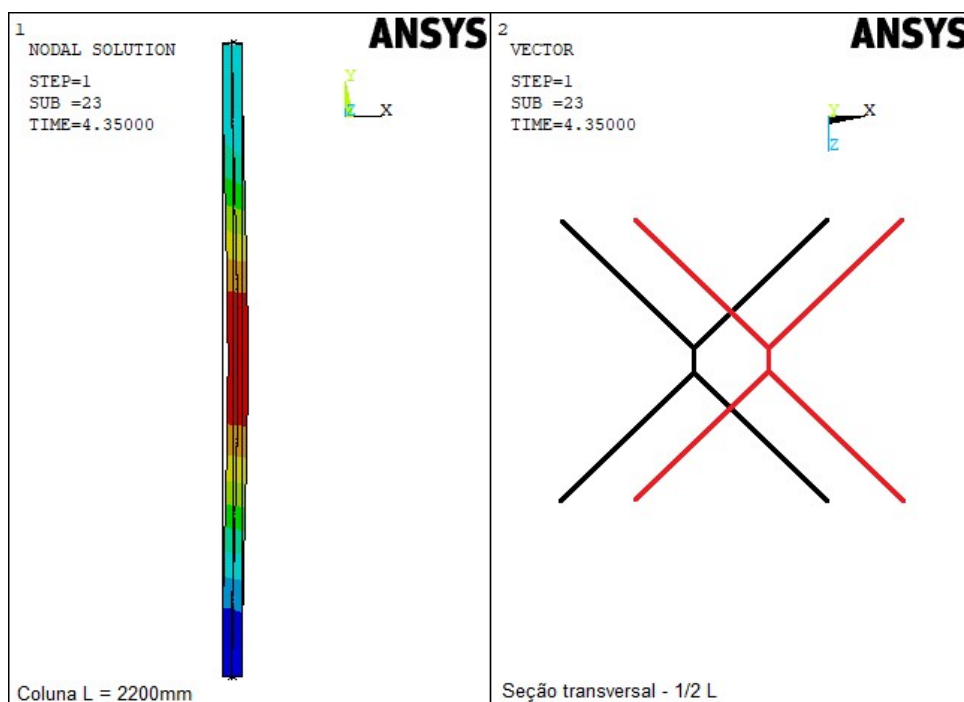


Figura J18 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 2200 - 7 - 275, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 301,33\text{kN}$.

- DL – 50,8x7,93 – 2200
1º Modo de Flambagem

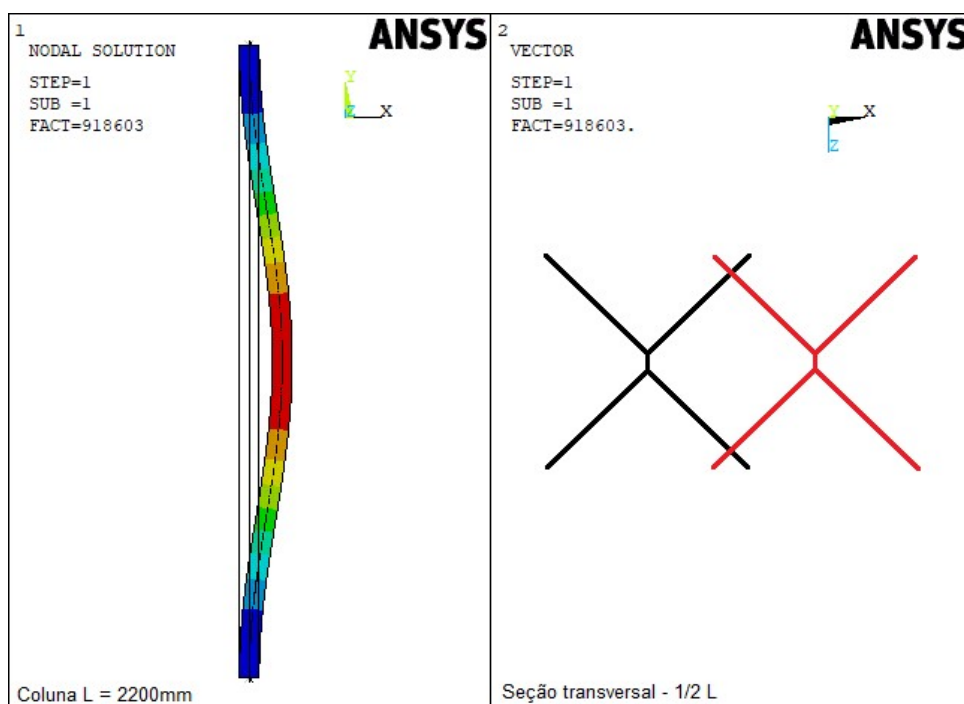


Figura J19 – Análise de flambagem elástica: DL - 50,8x7,93 - 2200, 1º modo de flambagem, carga crítica - $N_{cr} = 918,60\text{kN}$.

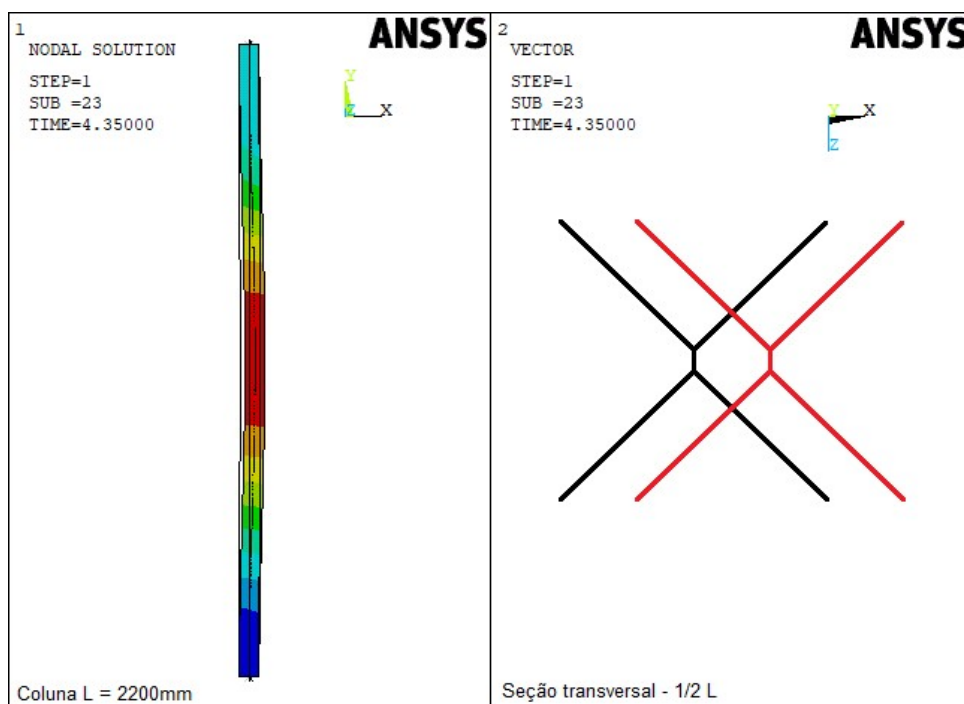


Figura J20 – Análise não linear: DL - 50,8x7,93 - 2200, imperfeição geométrica de $L/1000$ aplicada ao 1º modo de flambagem, carga máxima resistente - $N_u = 307,65\text{kN}$.