

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE NUMÉRICA DE BARRAS COMPOSTAS EM PERFIS DE
AÇO FORMADOS A FRIO SUBMETIDAS À COMPRESSÃO**

Riterson Jacques Nunes

Orientadora: Prof^a Dr^a Silvana De Nardin

Coorientador: Prof^o Dr^o Wanderson Fernando Maia

São Carlos

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE NUMÉRICA DE BARRAS COMPOSTAS EM PERFIS DE
AÇO FORMADOS A FRIO SUBMETIDAS À COMPRESSÃO**

Riterson Jacques Nunes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientadora: Prof^a Dr^a Silvana De Nardin

Coorientador: Prof^o Dr^o Wanderson
Fernando Maia

São Carlos

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Riterson Jacques Nunes, realizada em 21/10/2021.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Silvana de Nardin (UFSCar)

Prof. Dr. Maximiliano Malite (EESC/USP)

Prof. Dr. Saulo José de Castro Almeida (UNICAMP)

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

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Dedico à minha família e especialmente à
minha mãe Marlene Aparecida Mendes
Nunes.

Agradecimentos

Agradeço primeiro a Deus pela vida e saúde a mim oferecidas.

Ao professor Wanderson Fernando Maia que me acompanhou desde o início do mestrado, com toda a paciência e amizade raras de encontrar.

À professora Silvana De Nardin pelos vários ensinamentos passados e por ser um exemplo de dedicação e profissionalismo.

À minha mãe Marlene pela dedicação de uma vida não só a mim, mas à toda a nossa família.

Ao meu pai João Carlos que se foi antes mesmo de eu pensar em ser engenheiro, mas que a cada conquista e etapa da vida imagino como seria uma conversa com ele.

Ao meu irmão e engenheiro Richardson que sempre influenciou nas minhas decisões acadêmicas e sem ele não teria ingressado na UFSCar.

Ao meu irmão mais velho Roderson por me ajudar desde criança.

À minha mulher e companheira de quase uma década Loamy, que luta e sonha comigo todos os dias. E que venham muitos anos mais!

A todos os meus professores da graduação e principalmente ao professor Haroldo de Mayo Bernardes pelo exemplo e amizade.

E a todos os amigos que ganhei na UNESP de Ilha Solteira e na UFSCar.

Resumo

As barras compostas são uma alternativa interessante quando barras isoladas não atendem às necessidades de desempenho estrutural. Durante sua vida útil, um dos esforços mais presentes nas barras compostas é a compressão. Usualmente, as barras compostas são formadas por dois perfis afastados entre si, sendo exemplos os arranjos em duplo U “*costa a costa*” ou “*boca a boca*”. Os diferentes tipos de travejamento entre os perfis alteram o comportamento estrutural ao cortante, dificultando assim, a previsão da força normal resistente à compressão da barra composta. A norma americana ANSI/AISI S100 (2020) apresenta uma adaptação da esbeltez global para barras compostas, quando analisado o eixo que mobiliza os travejamentos, porém considera apenas perfis em contato. O Eurocode 3 (2006) distingue, na análise elástica, barras compostas com travejamento em quadro e treliçadas, porém sem método de cálculo específico para perfis formados a frio. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo principal analisar a capacidade resistente à compressão axial de barras compostas em seção duplo U “*costa a costa*”. Foram desenvolvidas análises numéricas no programa Ansys para avaliar a influência dos seguintes parâmetros geométricos no comportamento estrutural: tipos de travejamento, número de chapas separadoras, comprimento da barra composta, espaçamento entre perfis e espessura dos perfis. Para cada um dos modelos foi avaliada a força normal resistente à compressão e os modos de instabilidade. Além disso, também foi avaliada a aplicabilidade de procedimentos normativos para prever a força resistente. Os resultados mostraram que barras compostas mais longas apresentam maior aumento da força normal resistente com a inserção das chapas separadoras horizontais. O aumento do número de chapas separadoras não apresentou variação linear da força normal resistente. Para barras compostas travejadas em quadro, na maioria dos casos analisados, o Eurocode 3 (2006) apresentou menores valores de força resistente que a norma ANSI/AISI S100 (2020). Para travejamento treliçado o Eurocode 3 (2006) subestimou os resultados numéricos para maior espessura. O tipo de travejamento teve maior influência nos modelos de maior esbeltez global, ou seja, para maiores comprimentos e perfis mais próximos.

Palavras-chave: Barras compostas de aço; perfis formados a frio; compressão; análise numérica não-linear, instabilidades.

Abstract

Built-up columns are an interesting alternative when isolated channels do not comply with structural performance requirements. During their lifespan, one of the most common stresses in built-up columns is the compression. Usually, built-up columns are formed by two channels spaced apart, examples being doubled U “back-to-back” or “front to front”. The various possibilities of bracing change the structural behavior to the shear, thus make it difficult to predict the normal resistance force of compression. The American Standard ANSI/AISI S100 (2020) presents an adaptation of the global slenderness for built-up columns, but only considers profiles in contact. Eurocode 3 (2006) distinguishes in elastic analysis, battened and laced built-up columns, but without a specific calculation method for cold-formed profiles. In this context, this work has as main objective to analyze the axial compression resistant capacity of built-up columns in double U section “back-to-back”. Numerical analyzes were carried out in the Ansys software to evaluate the influence of the following geometric parameters on structural behavior: types of bracing, number of battened plates, length of the built-up columns, spacing between channels and thickness of the channels. For each of the models, the normal compressive strength and instability modes were evaluated. In addition, the applicability of normative procedures to predict the resistive force was also evaluated. The results showed that longer built-up columns presented greater increase in the normal resistance force when compared to insulated channels. The increase in the number of battened plates did not show linear variation of the normal resistant force. For battened built-up columns, in most cases analyzed, Eurocode 3 (2006) presented lower resistance values than ANSI/AISI S100 (2020). Lot laced built-up columns Eurocode 3 (2006) underestimated the numerical results for greater thickness. The type of bracing had a greater influence on the models with higher overall slenderness, that is, for greater lengths and closer channels.

Keywords: Steel built-up columns; cold-formed steel members; compression; non-linear numerical analysis, instabilities.

Sumário

Resumo	6
Abstract	7
1. Introdução	10
1.1. Considerações iniciais	10
1.2. Justificativa	13
1.3. Objetivos	14
1.4. Metodologia.....	14
1.5. Organização do Trabalho	15
2. Barras compostas	16
2.1. Barras compostas com travejamento em quadro	16
2.2. Barras compostas com travejamento treliçado.....	18
2.3. Procedimentos normativos.....	20
2.3.1. Procedimento da ANSI/AISI S100 (2020).....	20
2.3.2. Procedimento do Eurocode 3 (2006).....	22
3. Análise numérica de barras compostas	25
3.1. Validação dos modelos numéricos	25
3.1.1 Validação para barras compostas em quadro	26
3.1.2 Validação para barras compostas treliçadas.....	26
3.2. Modelagem com perfis formados a frio	36
4. Análise paramétrica: resultados e discussão	42
4.1 Barras compostas com Travejamento em Quadro.....	42
4.1.1 Influência do comprimento da barra composta.....	46
4.1.2 Influência do número de chapas separadoras horizontais.....	47
4.1.3 Influência da espessura dos perfis.....	49
4.1.4 Influência da distância entre perfis	51
4.1.5 Análise comparativa: simulação numérica vs. procedimentos normativos.....	52

4.2	Barras compostas com travejamento treliçado.....	56
4.2.1	Análise comparativa: simulação numérica vs. procedimentos normativos.....	59
4.2.2	Efeito do tipo de travejamento: travejamento treliçado e em quadro	62
4.2.3	Comparação do consumo de aço entre modelos treliçados	65
5.	Conclusões	68
5.1	Conclusões	68
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	69
	Referências bibliográficas	71
	Apêndice A: Tabelas de resultados	73

1. Introdução

Este capítulo apresenta uma breve introdução quanto à aplicabilidade de perfis de aço formados a frio em barras compostas, mostrando exemplos da utilização deste elemento estrutural, seus arranjos mais comuns e as normas mais usuais para seu dimensionamento. Adicionalmente, são apresentados a justificativa, os objetivos, a metodologia e a organização desta dissertação.

1.1. Considerações iniciais

Os perfis formados a frio são cada vez mais utilizados e isso deve-se a vantagens como alta relação entre resistência e peso e facilidade de fabricação e montagem. Por outro lado, os perfis formados a frio são suscetíveis a instabilidades estruturais e, sob esforço de compressão, demandam análises quanto aos modos de instabilidade local, distorcional e global. Este tipo de perfil, normalmente, não apresenta alta resistência à torção e empenamento, sendo mais susceptível às instabilidades por torção e flexo-torção, além da possibilidade de interação entre diversos modos de instabilidade.

Na última década, aumentou-se o interesse por pesquisas envolvendo barras compostas com perfis formados a frio, pois tais barras são uma alternativa quando barras isoladas não atendem às necessidades de desempenho estrutural.

Barras compostas de aço podem ser utilizadas na composição de diagonais e montantes de treliças (Figura 1-1). Por exemplo, na Figura 1-1a é apresentada uma viga treliçada de aço durante a fabricação; as barras compostas foram utilizadas como montantes e diagonais. Outro arranjo possível (Figura 1-1b), as barras foram utilizadas apenas como diagonais.

Durante sua vida útil, um dos esforços mais recorrentes nas barras compostas é a compressão. Contudo, os diversos arranjos possíveis de barras alteram o comportamento estrutural ao esforço cortante, o que dificulta a previsão da força normal resistente de compressão. Por exemplo, o tipo de perfil formado a frio pode apresentar comportamentos e modos de instabilidade à compressão diversos quando empregados em barras compostas. Além disso, outros fatores como a posição dos perfis, espaçamento entre eles e o tipo de travejamento também influenciam no desempenho estrutural.

Figura 1-1: Exemplos do uso de barras compostas em sistemas estruturais



(a) Diagonais e montantes de treliça

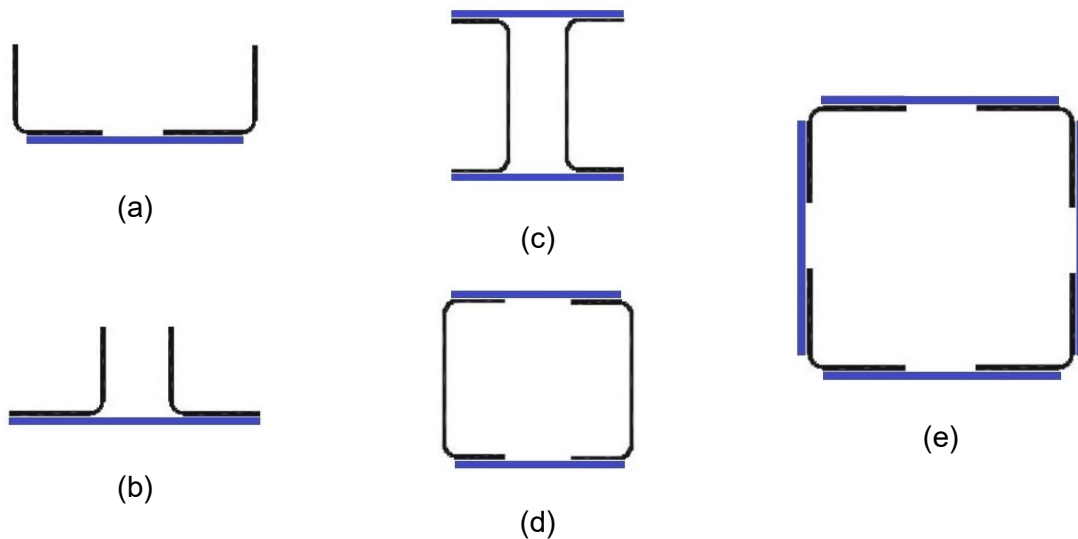


(b) Diagonais de treliça

Fonte: a) Autor (2022) b) Dlubal Software GmbH (2020)

Os arranjos mais comuns são formados por dois perfis afastados entre si, sendo os perfis U e cantoneira os mais usuais. Os arranjos básicos em perfis U são o “*costa a costa*” (Figura 1-2c) e o “*boca a boca*” (Figura 1-2d), sendo este último de melhor desempenho estrutural. Em comparação com o arranjo “*costa a costa*” (Figura 1-2b), arranjar as cantoneiras afastadas em seção U (Figura 1-2a) confere maior inércia em relação ao eixo de simetria entre os perfis mobilizando os travejamentos. Vale ressaltar a possibilidade de arranjos com mais de dois perfis, por exemplo, seção transversal formada por quatro cantoneiras, igualando os momentos de inércia nas duas direções (Figura 1-2e). A Figura 1-2 apresenta exemplos de seções transversais de barras compostas.

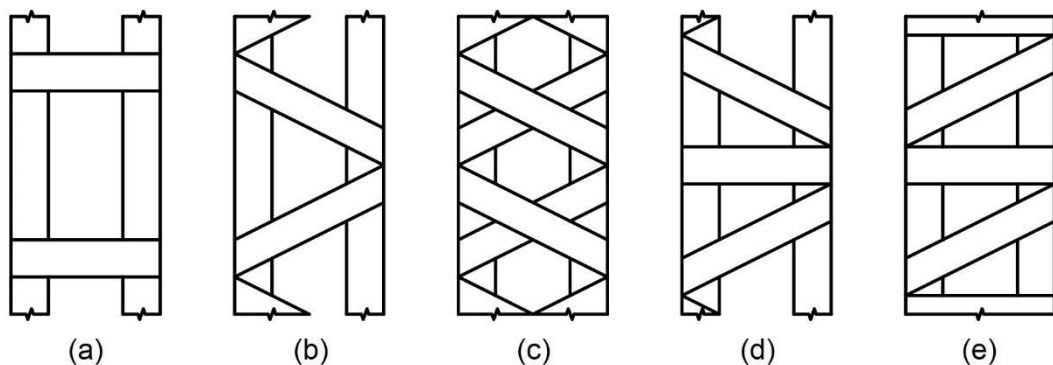
Figura 1-2: Exemplos de seções transversais de barras compostas



Fonte: Autor (2022)

Quanto aos tipos de travejamento, a Figura 1-3 apresenta os tipos convencionais para barras compostas de perfis formados a frio utilizados nas construções e encontrados na literatura. Tais tipos são: travejamento em quadro por chapas horizontais (Figura 1-3a), apenas por diagonais (Figura 1-3b), por diagonais duplas (Figura 1-3c), chapas diagonais opostas e horizontais (Figura 1-3d) e travejamento por chapas diagonais paralelas e horizontais (Figura 1-3e).

Figura 1-3: Barras compostas com travejamento em quadro e treliçado



Fonte: Autor (2022)

A norma brasileira ABNT NBR 14762 (2010) para dimensionamento de perfis formados a frio não apresenta um procedimento de cálculo para barras compostas comprimidas, estabelece apenas limites para o índice de esbeltez de cada perfil que compõe a barra composta. No caso de barras compostas conectadas por chapas regularmente espaçadas, recomenda-se emprego do procedimento do Eurocode 3 (2006). A norma norte americana ANSI/AISI S100 (2020) apresenta uma adaptação da esbeltez global para barras compostas,

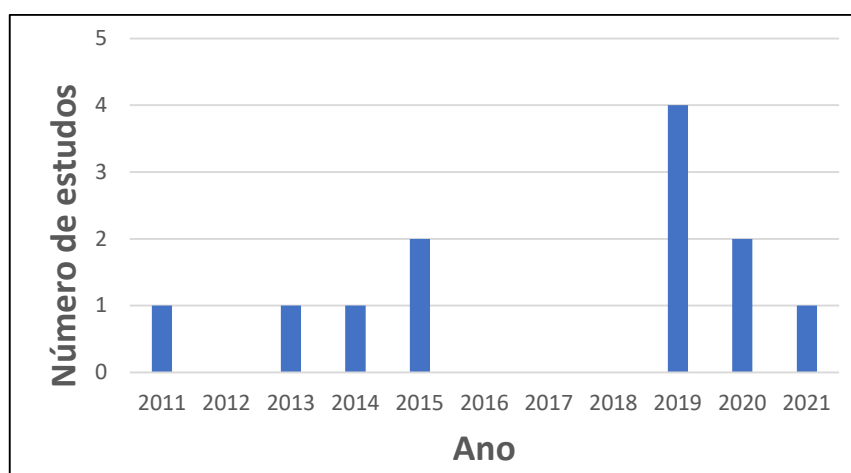
porém, considera apenas perfis em contato. O Eurocode 3 (2006) distingue, na análise elástica, barras compostas com travejamento em quadro e treliçadas, porém sem método de cálculo específico para perfis formados a frio.

A partir do que foi exposto até aqui, verifica-se que há necessidade de estudos sobre o comportamento estrutural de barras compostas submetidas à compressão centrada, com perfis formados a frio espaçados entre si e para diferentes tipos de travejamento.

1.2. Justificativa

Os procedimentos normativos apresentam limitações no cálculo da capacidade resistente de barras compostas comprimidas, principalmente para perfis formados a frio, não contemplando as variações na geometria deste elemento estrutural. Os estudos mais recentes sobre o tema buscam melhorar os métodos de dimensionamento. A Figura 1-4 apresenta a distribuição dos estudos sobre barras compostas submetidas à compressão nos últimos 10 anos.

Figura 1-4: Gráfico da distribuição de estudos nos últimos 10 anos



Fonte: Autor (2022)

Para travejamento em quadro foram identificados sete estudos que utilizaram perfis formados a frio e as seções mais estudadas foram U e Ue posicionados “*costa a costa*”. Todos os estudos analisaram a influência da distância entre perfis no comportamento estrutural; alguns destes estudos avaliaram a influência do comprimento da barra composta, quantidade de travejamentos e geometria dos perfis.

Quanto às pesquisas sobre travejamento treliçado, os perfis formados a frio foram utilizados em dois estudos e apenas para seções com mais de dois perfis. Para seções mais usuais com dois perfis foram realizados três estudos aplicando perfis laminados. Em linhas gerais, os autores investigaram travejamentos por diagonais e com diagonais e horizontais

observando, em sua maioria, a influência do comprimento da barra e distância entre perfis. Alguns estudos apresentam variação na quantidade de travejamentos e geometria dos perfis.

Contudo, os estudos com os arranjos mais comuns de barras compostas de perfis formados a frio se restringiram ao travejamento em quadro, resultando em carência de pesquisas com travejamento treliçado. Assim sendo, visando preencher esta lacuna do conhecimento, no presente estudo foram analisadas barras compostas em seção duplo U “*costa a costa*” com perfis formados a frio, considerando variação no tipo de travejamento e avaliando a influência da distância entre perfis, comprimento da barra composta, espessura dos perfis e quantidade de chapas de travejamento.

1.3. Objetivos

O objetivo principal deste estudo foi analisar a capacidade resistente à compressão de barras compostas de perfis U formados a frio espaçados entre si e posicionados “*costa a costa*”. A partir do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- . Investigar a influência de parâmetros geométricos na força normal resistente à compressão axial.
- . Avaliar como o tipo de travejamento influencia o comportamento estrutural e a força normal resistente da força.
- . Investigar a influência dos parâmetros analisados nos modos de instabilidade da barra composta.
- . Avaliar a aplicabilidade de procedimentos normativos para os modelos de barras compostas analisados.

1.4. Metodologia

Dada a escassez de publicações sobre barras compostas constituídas por perfis formados a frio, foi traçada uma linha de revisão que partiu das barras compostas de aço com travejamento em quadro. Posteriormente, estudos sobre barras compostas de aço com travejamento treliçado foram incluídos e, para finalizar, foram abordados os procedimentos normativos.

A metodologia utilizada para avaliar a capacidade resistente de barras compostas foi a análise numérica via Método dos Elementos Finitos. Para isso, foi utilizado o pacote computacional ANSYS e nele foram simulados diferentes arranjos de barras compostas de

aço formadas a frio. No estudo foi considerada seção transversal com dois perfis U100x50 posicionados “*costa a costa*” e avaliada a influência do tipo de travejamento, espessura, distância entre perfis, comprimento da barra composta, esbeltez global e número de chapas de travejamento. As propriedades do aço foram mantidas constantes ao longo do estudo. A Tabela 1-1 sintetiza os tipos de arranjo e os intervalos numéricos analisados.

Tabela 1-1: Resumo dos arranjos e parâmetros geométricos analisados

Travejamento por chapas	t (mm)	d (cm)	L _{barra} (mm)	λ_y	N _{CH}
Horizontais	2 e 3,75	2,5, 5 e 20	500 a 5000	4,37 a 164,69	0 a 9
Diagonais	2 e 3,75	2,5, 5 e 20	500 a 5000	4,37 a 164,69	2 a 20
Diagonais e horizontais	2 e 3,75	2,5, 5 e 20	500 a 5000	4,37 a 164,69	3 a 39

t: espessura dos perfis e das chapas de travejamento.

d: distância entre faces internas dos perfis.

L_{barra}: comprimento da barra composta.

λ_y : esbeltez global em torno do eixo que mobiliza os travejamentos.

N_{CH}: número de chapas de travejamento.

Ao todo, foram simulados 213 modelos com travejamento em quadro, 41 modelos com travejamento treliçado por diagonais e 41 modelos para treliçamento por chapas diagonais e horizontais. Assim, no presente estudo foram analisados 295 modelos de barras compostas. Para cada um destes modelos foram analisados: força normal resistente de compressão, distribuição das tensões de von Mises e modos de instabilidade.

Os valores da força normal resistente oriundos da simulação numérica foram comparados a valores teóricos. Os valores teóricos foram obtidos utilizando os procedimentos da norma norte americana ANSI/AISI S100 (2020) e o Eurocode 3 (2006).

1.5. Organização do Trabalho

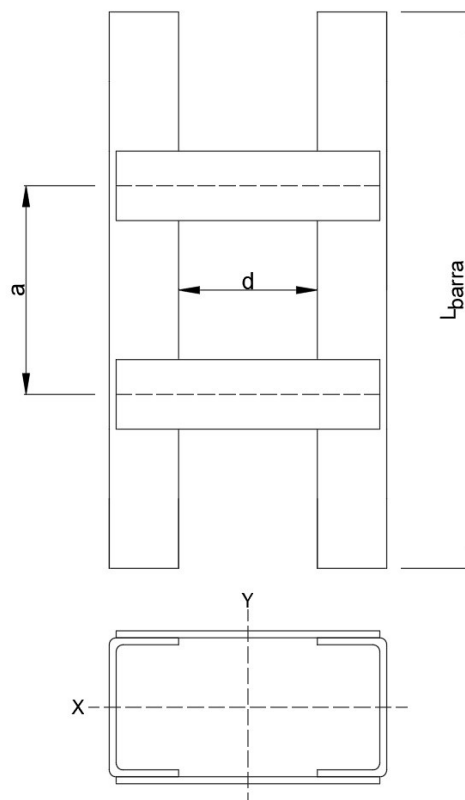
Esta dissertação foi dividida em cinco capítulos, no Capítulo 1 é introduzido brevemente o assunto alvo de estudo neste trabalho, justificando as motivações para sua realização e esclarecendo os objetivos a serem alcançados, bem como a metodologia empregada pelo autor. O Capítulo 2 foi dividido em três sessões buscando apresentar o cenário atual do conhecimento. Estudos sobre barras compostas com travejamento em quadro, barras compostas treliçadas e, por fim, os procedimentos normativos mais usuais são apresentados neste capítulo. O Capítulo 3 é dedicado à descrição da modelagem numérica, tipos e malha de elementos finitos, não-linearidades e imperfeições iniciais. Os valores de força normal resistente à compressão obtidos na análise numérica bem como as comparações com resultados de normas técnicas são apresentados e discutidos no Capítulo 4. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões.

2. Barras compostas

Este capítulo foi organizado em três itens principais: barras compostas com travejamento em quadro (2.1), barras compostas com travejamento treliçado (2.2) e, por fim, procedimentos normativos mais usuais para o cálculo da força normal resistente de barras compostas com travejamento (2.3).

Entre os parâmetros geométricos analisados nos diversos estudos realizados por outros autores três se destacaram, sendo as distâncias L_{barra} , d e a . Tais parâmetros também foram essenciais para este trabalho e a Figura 2-1 os ilustra no contexto de uma barra composta com travejamento em quadro. Ressalta-se que os parâmetros também são válidos para travejamento treliçado.

Figura 2-1: Principais parâmetros geométricos analisados por diversos autores



Fonte: Autor (2022)

2.1. Barras compostas com travejamento em quadro

Nos últimos anos foram produzidos estudos sobre barras compostas, com travejamento em quadro, em seções duplo U e Ue. Estes estudos promoveram análises experimentais e/ou numéricas, variando parâmetros geométricos que influenciam na esbeltez local e global, e um dos estudos também variou a resistência ao escoamento do aço.

A Tabela 2-1 apresenta um resumo da seção, tipo de análise e parâmetros analisados por tais estudos.

Tabela 2-1: Resumo de estudos sobre barras compostas travejadas em quadro

Autor	Seção	Análise	Parâmetros analisados
Dabaon <i>et al.</i> (2015a)	2U costa a costa	E	L_{barra} , d e a
Dabaon <i>et al.</i> (2015b)	2U costa a costa	N	L_{barra} , d e a
Rocha e Maia (2019)	2U costa a costa	N	L_{barra} e d
Muthuraman <i>et al.</i> (2020)	2Ue costa a costa	N	d , t , b_w e b_f
Vijayanand e Anbarasu (2019)	2Ue costa a costa	E	t , b_w e b_f
Vijayanand e Anbarasu (2020)	2Ue costa a costa	N	d , t , b_w , b_f e f_y
Dar <i>et al.</i> (2021)	2U boca a boca	E + N	d e a

E: análise experimental.

N: análise numérica.

L_{barra} : comprimento da barra composta.

a : distância entre chapas horizontais.

d : distância entre faces internas dos perfis.

t : espessura dos perfis.

b_w : altura da alma.

b_f : largura da mesa.

f_y : resistência ao escoamento do aço.

A comparação entre valores de força normal resistente obtidos experimentalmente, por simulações numéricas e decorrentes de procedimentos normativos da ANSI/AISC 360 (2010), AS/NZS (1996) e Eurocode 3 (2006), mostrou que tais normas são conservadoras quando ocorre instabilidade global; em caso de instabilidade local, os valores da força normal resistente são superestimados (DABAON *et al.*, 2015a, 2015b).

Análises numéricas mostraram que as imperfeições geométricas iniciais apresentam grande influência na força normal resistente das barras compostas. Também foi constatado que o procedimento da ABNT NBR 14762 (2010), considerando o índice de esbeltez modificado da ANSI/AISI S100 (2020), superestimou a força normal resistente, principalmente nos modelos mais curtos, de menor esbeltez (ROCHA E MAIA, 2019).

O Método da Resistência Direta apresentou bons resultados, para barras compostas em seção duplo Ue com travejamento em chapas horizontais, quando comparados aos obtidos numericamente via elementos finitos, porém, sua precisão diminuiu conforme a esbeltez global aumentou (MUTHURAMAN *et al.*, 2020).

Vijayanand e Anbarasu (2020) estudaram a influência da distância entre perfis, dimensões do perfil e da resistência ao escoamento do aço, sobre a força normal resistente de barras compostas em seção duplo Ue, costa a costa, com travejamento em quadro. Os resultados mostraram que a força normal resistente diminuiu com o aumento da esbeltez global da barra composta; reduções de espessura e resistência do aço causaram redução da

força normal resistente. Por fim, os autores propuseram modificações aos métodos de cálculo, da ANSI/AISI S100 (2020) e do Eurocode 3 (2006), obtendo melhoras nas comparações.

Análises experimentais e numéricas de barras compostas em seção duplo U posicionados *boca a boca* identificaram que as distâncias entre perfis e entre travejamentos horizontais governam o comportamento estrutural das barras compostas. Os resultados dos procedimentos normativos da ANSI/AISI S100 (2020) e do Eurocode 3 (2006) não foram muito próximos dos resultados numéricos, principalmente para menores valores de esbeltez global (DAR *et al.*, 2021).

Contudo, os estudos buscaram comparações entre resultados experimentais e numéricos possibilitando análises de diversos parâmetros (vide Tabela 2-1). Os procedimentos normativos mais estudados foram da ANSI/AISI S100 (2020) e do Eurocode 3 (2006).

2.2. Barras compostas com travejamento treliçado

Na última década foram realizados estudos sobre barras compostas com travejamento treliçado e os principais parâmetros analisados são apresentados na Tabela 2-2. Tais estudos analisaram experimentalmente a influência de parâmetros geométricos na força normal resistente, alguns autores também realizaram análises numéricas.

Tabela 2-2: Resumo de estudos sobre barras compostas treliçadas

Autor	Seção	Travejamento	Análise	Parâmetros analisados
Kalochairetis e Gantes (2011)	2I ¹	D	E	L _{barra} , d e a
Bonab <i>et al.</i> (2013)	2U ¹	D	E	L _{barra} e d
Kalochairetis <i>et al.</i> (2014)	2U ²	D + H	E + N	a, e _x e A
Bastos (2019)	8U e 8Ue ³	D + H	E + N	L _{barra} e t
Dar <i>et al.</i> (2019)	4L ³	D e DD	E + N	L _{barra} , d e A

¹ Seção com perfis laminados costa a costa.

² Seção com perfis laminados boca a boca.

³ Seção espacial com perfis formados a frio.

D: travejamentos diagonais.

DD: travejamento diagonal duplo.

H: travejamentos horizontais.

E: análise experimental.

N: análise numérica.

L_{barra}: comprimento da barra composta.

a: distância entre chapas horizontais.

d: distância entre perfis.

e_x: excentricidade de aplicação da força de compressão.

t: espessura dos perfis.

A: área total da seção transversal.

A análise de modelos numéricos de barras compostas com perfis I e chapas atuando como diagonais, constatou que grandes perdas de resistência ocorrem quando as tensões de

flambagem global (instabilidade de barras compostas) e local (barra isolada) coincidem. Resultados obtidos aplicando o procedimento do Eurocode 3 (2006) não representaram adequadamente os valores obtidos nas modelagens numéricas (KALOCHAIRETIS e GANTES, 2011).

Bonab *et al.* (2013) ensaiaram barras compostas com banzos em perfis U laminados e chapas como diagonais. Foi constatada influência significativa das imperfeições geométricas iniciais na força normal resistente.

Barras compostas treliçadas submetidas à compressão excêntrica, fabricadas com perfis laminados e cantoneiras como diagonais e montantes foram investigadas por Kalochairetis *et al.* (2014). O estudo mostrou que o comportamento estrutural e a força normal resistente são influenciados, principalmente, pela área de seção transversal dos banzos e pela magnitude e direção das excentricidades.

Barras compostas treliçadas espaciais formadas por perfis formados a frio sob compressão axial foram analisadas por Bastos (2019). Foi constatado que a resistência de um banzo isolado, de seção duplo U assimétrica, pode ser prevista pelo Método da Resistência Direta. Quanto às instabilidades global e local identificadas durante os ensaios, maiores deformações foram observadas nos perfis sem enrijecedores de borda (BASTOS, 2019).

Dar *et al.* (2019) realizaram ensaios e simulações numéricas para analisar o comportamento de barras compostas espaciais, de seção constituída por quatro cantoneiras de aço formadas a frio. Os valores da força normal resistente foram comparados àqueles previstos por meio de procedimentos normativos. As dimensões das cantoneiras, o tipo de treliçamento e a esbeltez das diagonais influenciaram no comportamento estrutural e na capacidade resistente. Quanto aos procedimentos normativos da ANSI/AISI S100 (2020) e do Eurocode 3 (2006), os resultados foram mais satisfatórios para seções com menor espaçamento entre perfis.

Observados os estudos de barras compostas treliçadas, há uma ausência de análises de arranjos que não sejam espaciais com perfis formados a frio. Os procedimentos normativos mais analisados, a exemplo do travejamento em quadro, foram da ANSI/AISI S100 (2020) e do Eurocode 3 (2006), ressaltando que apenas este último distingue o travejamento treliçado dos demais.

2.3 Procedimentos normativos

Os trabalhos analisados e usados como referência mostram que nas comparações usualmente são utilizadas as normas ANSI/AISI S100 (2020) e Eurocode 3 (2006), esta última com adaptação da carga crítica elástica para arranjos treliçados. A ANSI/AISI S100 (2020) apresenta um procedimento de cálculo para barras compostas que recomenda a utilização de um índice de esbeltez modificado para perfis em contato. Mesmo com esta recomendação, os diversos estudos aplicam o índice de esbeltez modificado, mesmo que seja para perfis afastados. Nesta dissertação foram utilizados tais métodos e estão são descritos nos itens 2.3.1 e 2.3.2.

2.3.1. Procedimento da ANSI/AISI S100 (2020)

O cálculo da força normal resistente ($N_{c,R}$) de uma barra submetida à compressão centrada é realizado pela Equação 1. Ressalta-se que o procedimento é apresentado com adaptações na simbologia.

$$N_{c,R} = \chi \cdot A_{ef} \cdot f_y \quad \text{Eq.1}$$

Sendo χ o fator de redução associado à instabilidade global, A_{ef} a área efetiva da seção transversal da barra e f_y a resistência ao escoamento do aço.

A área efetiva (A_{ef}) é obtida pelo Método das Larguras Efetivas utilizando as Equações 2 e 3, e χ calculado pela Equação 4.

$$b_{ef} = b(1 - 0,22/\lambda_p)/\lambda_p \quad \text{Eq.2}$$

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE/\sigma)^{0,5}} \quad \text{Eq.3}$$

Sendo, para cada elemento da seção transversal, b_{ef} a largura efetiva, b a largura da parte plana do elemento, t a espessura, λ_p o índice de esbeltez reduzido, k o coeficiente de flambagem local e σ a tensão normal.

$$\chi = \begin{cases} (0,658^{\lambda_0^2}) & \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \\ \left(\frac{0,877}{\lambda_0^2}\right) & \text{para } \lambda_0 > 1,5 \end{cases} \quad \text{Eq.4}$$

λ_0 é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global, calculado pela Equação 5.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} \quad \text{Eq.5}$$

Sendo A a área bruta da seção transversal da barra e N_e a força normal de flambagem global elástica, adotada em situações de seção duplamente simétrica como o menor valor entre N_{ex} , N_{ey} e N_{ez} calculados pelas Equações 6 e 7.

$$N_{e(x,y)} = \frac{\pi^2 EI_{(x,y)}}{(KL_{(x,y)})^2} \quad \text{Eq.6}$$

Sendo E o módulo de elasticidade, $I_{x,y}$ o momento de inércia na direção analisada e $KL_{x,y}$ o comprimento efetivo de flambagem na direção analisada.

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(KL)^2} + GJ \right] \quad \text{Eq.7}$$

Sendo r_0 o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção, C_w a constante de empenamento da seção, G o módulo de elasticidade transversal e J a inércia à torção.

A ANSI/AISI S100 (2020) apresenta um procedimento de verificação para flambagem por flexão de barras compostas, quando os perfis estiverem em contato. O procedimento consiste em aplicar uma esbeltez efetiva ao invés da esbeltez original da barra, sendo a esbeltez efetiva calculada de acordo com as barras isoladas, condições de vinculação e distância entre conexões ao longo do comprimento (Equação 8).

$$(KL/r)_m = \sqrt{(KL/r)_0^2 + (a/r_i)^2} \quad \text{Eq.8}$$

Onde $(KL/r)_0$ é o índice de esbeltez da barra composta, a é a distância entre conexões e r_i é o raio de giração mínimo de cada barra individual.

A ANSI/AISI S100 (2020) estabelece condições para a força normal resistente e o espaçamento entre conexões, a fim de satisfazer às seguintes condições:

- (i) adotar uma distância entre conexões, para que a relação “ a/r_i ” seja menor ou igual à metade do índice de esbeltez máximo da barra composta;
- (ii) os elementos deverão ser conectados em suas extremidades por solda com um comprimento mínimo igual à máxima largura da seção, ou parafusados com espaçamento longitudinal de no máximo quatro diâmetros ao longo de um comprimento igual a 1,5 da largura máxima da seção;
- (iii) a resistência das conexões, em direções diferentes, deverá suportar uma ação de no mínimo 2,5% da força resistente de compressão da barra composta.

2.3.2. Procedimento do Eurocode 3 (2006)

O Eurocode 3 (2006) traz um procedimento de cálculo para determinação da força normal resistente à compressão de barras compostas de aço. O procedimento não faz distinção quanto ao tipo de perfil, portanto, se aplica também aos perfis formados a frio. O procedimento se aplica a barras compostas com extremidades rotuladas em apoios fixos; para outras condições de vinculação podem ser feitas as modificações adequadas.

Um parâmetro utilizado no cálculo é a rigidez à força cortante (S_v), e seu valor pode ser considerado constante ao longo de barras compostas treliçadas ou em quadro.

Na Parte 1-1 do Eurocode 3 (2006), é apresentado o cálculo da força crítica elástica (N_{cr}) para barras compostas, pela Equação 9.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{eff}}{L^2} \quad \text{Eq.9}$$

Sendo E o módulo de elasticidade do aço; I_{eff} o momento de inércia efetivo da barra composta, calculado pela Equação 10, e L o comprimento da barra composta.

$$I_{eff} = \begin{cases} 0,5 \cdot A_{ch} \cdot h_0^2 + 2 \cdot \mu \cdot I_{ch} & \text{para travejamento em quadro} \\ 0,5 \cdot A_{ch} \cdot h_0^2 & \text{para travejamento treliçado} \end{cases} \quad \text{Eq.10}$$

Sendo A_{ch} a área de um banzo da barra composta, h_0 a distância entre eixos dos banzos, I_{ch} o momento de inércia do perfil, μ o fator de eficiência que depende da esbeltez global λ calculado pela Equação 11.

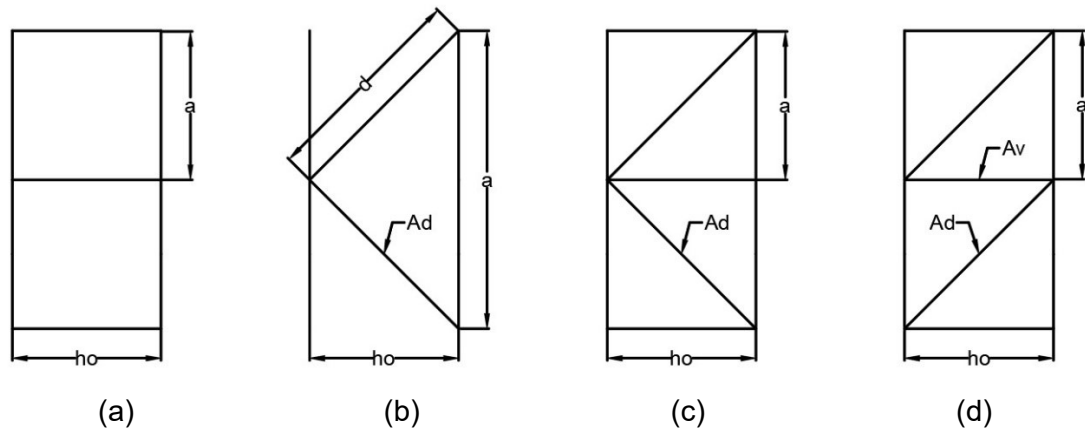
$$\mu = \begin{cases} 0 & \text{para } \lambda \geq 150 \\ 2 - \frac{\lambda}{75} & \text{para } 75 < \lambda < 150 \\ 1 & \text{para } \lambda \leq 75 \end{cases} \quad \text{Eq.11}$$

Por fim, a carga crítica elástica efetiva da barra composta ($N_{cr,v}$) é calculada por meio da Equação 12 na qual S_v representa a rigidez à força cortante.

$$N_{cr,v} = \frac{1}{\frac{1}{N_{cr}} + \frac{1}{S_v}} \quad \text{Eq.12}$$

O parâmetro S_v depende do tipo de travejamento e os tipos de travejamento contemplados pelo Eurocode 3 (2006) são apresentados na Figura 2-2.

Figura 2-2: Tipos de travejamento considerados no cálculo de S_v



Fonte: Adaptado de EUROCODE 3 (2006)

A Figura 2-2 também apresenta os parâmetros geométricos considerados no cálculo da rigidez à cortante S_v , calculada pela Equação 13. Sendo n o número de módulos de travejamento da barra composta e I_b o momento de inércia da barra de travejamento, ressaltando que o módulo de travejamento acompanha o parâmetro a indicado.

$$S_v = \begin{cases} \frac{24EI_{ch}}{a^2 \left[1 + \frac{2I_{ch} h_0}{n I_b a} \right]} \leq \frac{2\pi^2 EI_{ch}}{a^2} & (\text{Figura 2 - 1a}) \\ \frac{nEA_d a h_0^2}{2d^3} & (\text{Figura 2 - 1b}) \\ \frac{nEA_d a h_0^2}{d^3} & (\text{Figura 2 - 1c}) \\ \frac{nEA_d a h_0^2}{d^3 \left[1 + \frac{A_d h_0^3}{A_v d^3} \right]} & (\text{Figura 2 - 1d}) \end{cases} \quad \text{Eq.13}$$

Calculada a força crítica elástica, o próximo passo é calcular o índice de esbeltez reduzido λ_0 pela equação 14.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_{ef} \cdot f_y}{N_{cr,v}}} \quad \text{Eq.14}$$

Sendo λ_0 índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global, A_{ef} a área efetiva e f_y a resistência ao escoamento do aço. Por fim, as Equações de 15 a 17 são utilizadas para calcular a força normal resistente de compressão.

$$\phi = 0,5[1 + \alpha(\lambda_0 - 0,2) + \lambda_0^2] \quad \text{Eq.15}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_0^2}} \leq 1 \quad \text{Eq.16}$$

$$N_{c,R} = \chi \cdot A_{ef} \cdot f_y \quad \text{Eq.17}$$

Sendo ϕ um valor para determinar o fator de redução χ e α o fator de imperfeição.

A Parte 1-1 do Eurocode 3 (2006) classifica as seções transversais, e pela espessura reduzida dos perfis formados a frio normalmente utiliza-se a classe 4, onde se enquadram as seções nas quais ocorrem flambagem local antes da tensão de escoamento. Devido a essa classificação, é necessário calcular A_{ef} de acordo com a Parte 1-5 do Eurocode 3 (2006), segundo as Equações 18 a 22.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \text{Eq.18}$$

Sendo ε um fator em função do escoamento do aço e o valor de f_y em N/mm².

$$\lambda_p = \frac{b/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad \text{Eq.19}$$

Sendo b a largura da parte plana do elemento, t a espessura do elemento, λ_p o índice de esbeltez reduzido e k_σ o coeficiente de flambagem local.

Com o índice de esbeltez reduzido calcula-se o fator ρ de redução do elemento da seção, porém, a norma separa este cálculo entre elementos com bordas vinculadas e borda livre, respectivamente, conforme as Equações 20 e 21. Por fim, calcula-se a largura efetiva do elemento pela Equação 22.

$$\rho = \begin{cases} 1,0 \text{ para } \lambda_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \\ \frac{\lambda_p - 0,055(3 + \psi)}{\lambda_p^2} \leq 1,0 \text{ para } \lambda_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \end{cases} \quad \text{Eq.20}$$

$$\rho = \begin{cases} 1,0 \text{ para } \lambda_p \leq 0,748 \\ \frac{\lambda_p - 0,188}{\lambda_p^2} \leq 1,0 \text{ para } \lambda_p > 0,748 \end{cases} \quad \text{Eq.21}$$

$$b_{ef} = \rho \cdot b \quad \text{Eq.22}$$

Sendo b_{ef} a largura efetiva do elemento e ψ a relação entre tensões aplicadas no elemento, vide Tabelas 4.1 e 4.2 da Parte 1-5 do Eurocode 3 (2006).

É importante destacar que o procedimento apresentado é recomendado para barras compostas de módulos iguais, treliçamento ou quadro, com os perfis paralelos entre si e que deve haver um mínimo de três módulos. O procedimento também se aplica ao cálculo de barras compostas espaciais, de seções com mais de dois perfis, desde que sejam cumpridas as recomendações.

3. Análise numérica de barras compostas

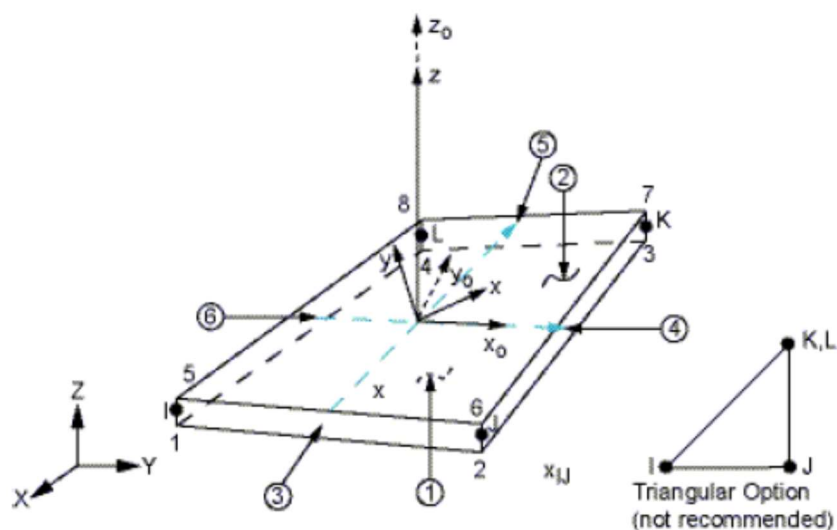
Neste capítulo são apresentadas as etapas que compuseram a análise numérica do trabalho. Na primeira parte encontra-se o procedimento de validação dos modelos em quadro e treliçados (Seção 3.1). A parte seguinte contém as características da modelagem das barras compostas por perfis formados a frio (Seção 3.2).

3.1. Validação dos modelos numéricos

Para as simulações foi utilizado o programa ANSYS, aplicando o Método dos Elementos Finitos, sendo este amplamente conhecido e aplicável em análises estruturais.

Na discretização das barras foi utilizado o elemento finito SHELL 181, apresentado na Figura 3-1. Trata-se de um elemento de casca com boa aplicação em análises não-lineares para elementos de pequena espessura sob efeito de grandes deformações e rotações. O elemento SHELL 181 foi utilizado para discretizar os perfis, as chapas de travejamento e de extremidade. Este elemento possui quatro nós com seis graus de liberdade por nó, translações nas direções dos eixos x , y e z (U_x , U_y e U_z) e rotações em relação aos mesmos eixos (ROT_x , ROT_y e ROT_z).

Figura 3-1: Elemento finito SHELL181



Fonte: Manual do ANSYS

3.1.1 Validação para barras compostas em quadro

Para modelagem e análise de barras compostas em seção duplo U com travejamento em quadro foi utilizada a validação numérica realizada por Rocha e Maia (2019). Na validação realizada por Rocha e Maia (2019) foram utilizados os resultados experimentais de Dabaon *et al.* (2015a) e o modelo numérico representou adequadamente tais resultados. Portanto, no presente trabalho foi utilizada a mesma estratégia da modelagem de Rocha e Maia (2019).

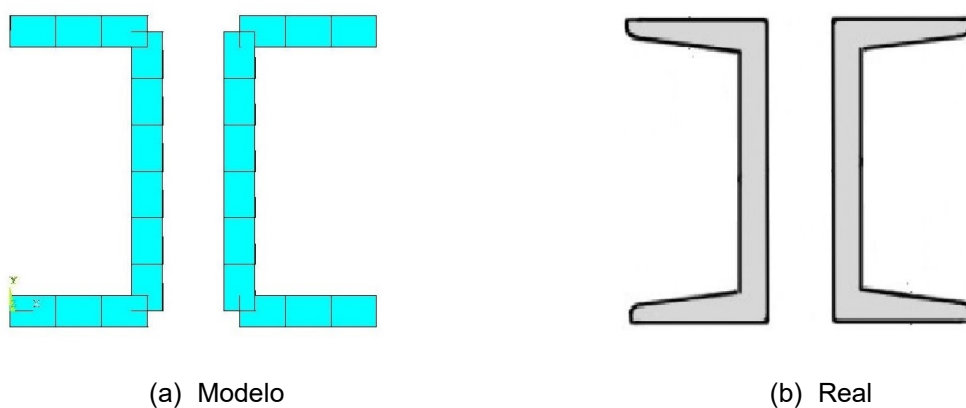
3.1.2 Validação para barras compostas treliçadas

Na validação dos modelos numéricos de barras compostas treliçadas foram utilizados 9 modelos físicos investigados por de Bonab *et al.* (2013). O estudo de Bonab *et al.* (2013) apresenta, de forma clara, a maioria dos parâmetros necessários à modelagem e, por isso, foi utilizado na validação da modelagem de barras compostas travejadas unicamente por diagonais. Algumas adaptações foram realizadas a fim de adaptar, da melhor forma possível, as malhas e nós aos modelos reais. A seção transversal dos perfis laminados UNP foi analisada considerando espessura constante em todos os seus elementos, alma e mesas.

Ressalta-se que Bonab *et al.* (2013) utilizaram o perfil UNP60, assim sendo, foram adotadas dimensões fornecidas pelos fabricantes, a saber: largura total da alma igual a 60 mm, mesas com largura de 30 mm e espessura média da alma e mesas com 6 mm.

A Figura 3-2 mostra a comparação entre a seção discretizada por elementos finitos e a real. Nesta figura é possível observar que a espessura das mesas varia ao longo da sua largura, porém a espessura média é de 6 mm; este valor foi considerado na modelagem numérica. Também se destaca que a divisão dos elementos acompanha a altura da alma e a largura das mesas sendo, respectivamente, seis e três elementos.

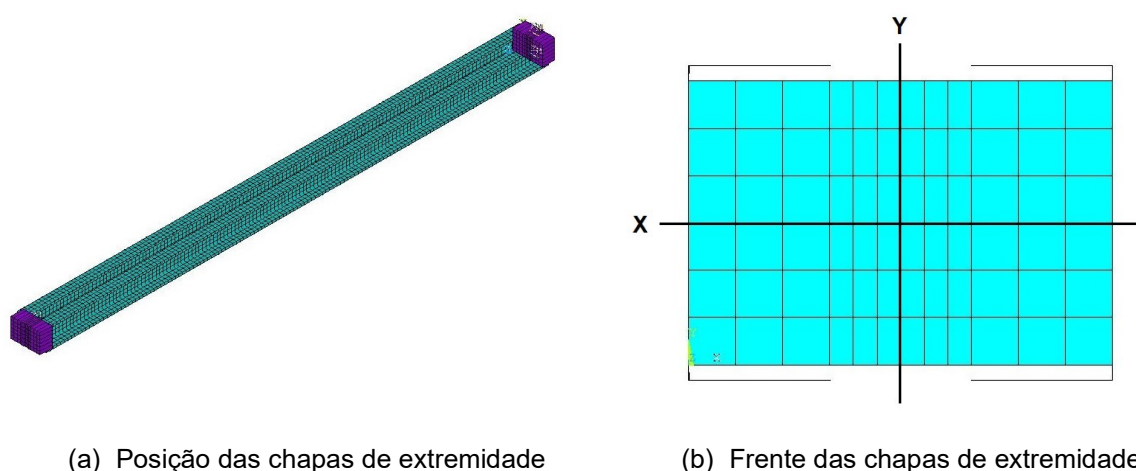
Figura 3-2: Seções duplo UNP60



Fonte: Autor (2022)

Definida a seção transversal, foram criadas chapas de extremidade com 3,5 cm de espessura, adoção feita conforme os modelos ensaiados por Bonab *et al.* (2013). A Figura 3-3 ilustra as chapas de extremidade utilizadas no modelo numérico. Observa-se que a representação da seção utilizando elementos retos permitiu a criação de uma malha uniforme tanto no contato com os perfis quanto no espaço entre eles. Destaca-se pela simetria da malha, que existem linhas de nós que coincidem com os eixos “X” e “Y” da seção dupla. Tais linhas são importantes para simular o comportamento das vinculações e aplicação do carregamento.

Figura 3-3: Modelagem das chapas de extremidade



Fonte: Autor (2022)

Quanto às simulações realizadas, a linha coincidente com o eixo Y foi utilizada para reproduzir a vinculação rotulada, visto que o arranjo experimental reproduziu um modelo com vinculações bi-rotulados neste sentido para mobilizar e analisar o comportamento das diagonais. Para o eixo X foi adotada vinculação de engastamento. Para a modelagem das diagonais foram feitas adaptações geométricas para promover o melhor acoplamento de nós, das malhas dos perfis e diagonais, buscando preservar a inclinação e as dimensões das chapas diagonais bem como o espaçamento entre perfis. A Tabela 3-1 resume os valores, reais e da modelagem, da inclinação das diagonais e distância entre perfis.

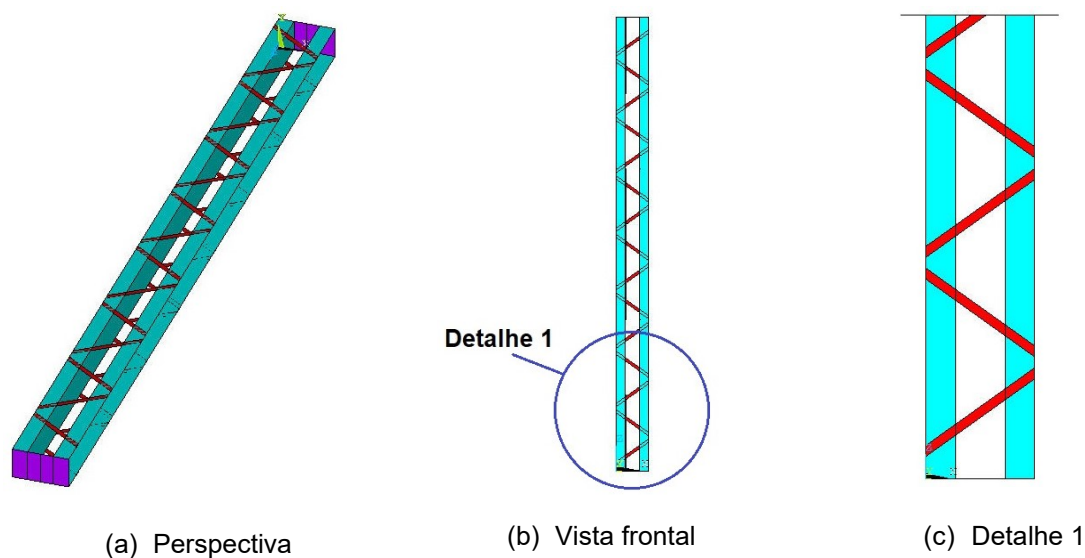
Tabela 3-1: Inclinação das diagonais com a horizontal e espaçamento entre perfis

Modelo	Inclinação real	Inclinação da modelagem	Distância real entre perfis (cm)	Distância entre perfis da modelagem (cm)
L140B8	30°	33,69°	2,0	2,1
L140B10	30°	32,47°	4,0	3,9
L170B7	30°	26,57°	1,0	1,2
L170B8	30°	33,69°	2,0	2,1

Fonte: Autor (2022)

A Figura 3-4 apresenta a geometria do modelo L140B10, de 140 cm de comprimento da barra composta e 10 cm de largura da seção dupla, para exemplificar a disposição dos elementos da barra composta treliçada.

Figura 3-4: Geometria do modelo L140B10



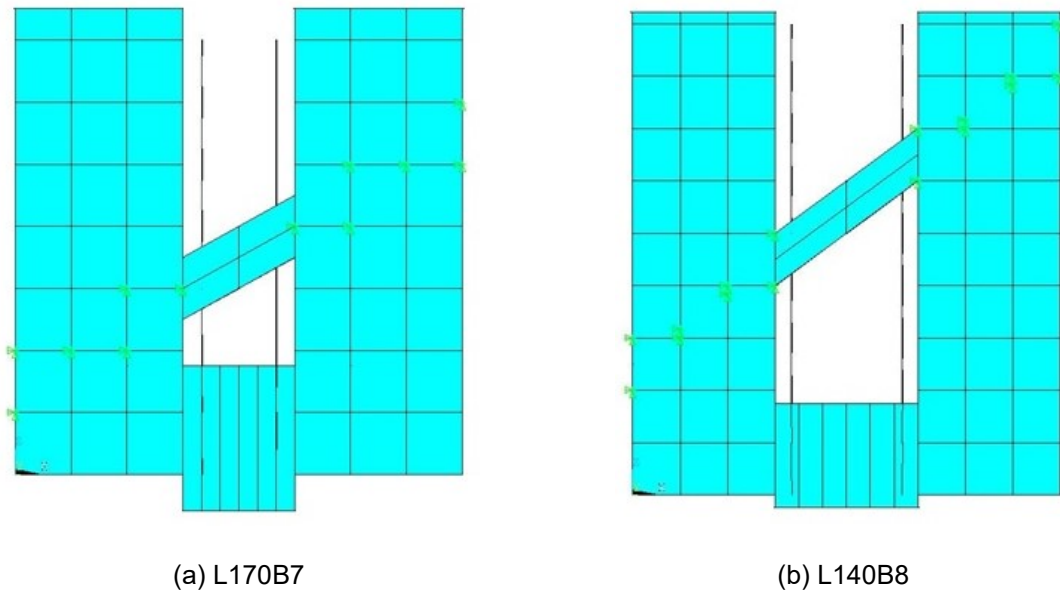
Fonte: Autor (2022)

As adaptações da geometria foram importantes para coincidir o maior número possível de nós entre perfis e diagonais, ou aproximar esses nós de forma a promover seu acoplamento resultando no mesmo deslocamento nas direções x , y e z . Com essas adaptações na geometria dos modelos foram criadas as chapas diagonais.

A Figura 3-5a ilustra a primeira diagonal do modelo L170B7. Observa-se que as diagonais foram posicionadas de forma a avançar sobre toda a mesa dos perfis; isso aumentou o número de nós coincidentes entre diagonal e perfil. É importante destacar que os elementos finitos foram criados com 1 cm de lado.

A quantidade de elementos finitos nas diagonais foi definida dividindo a linha vertical em duas partes e a horizontal com uma divisão de forma a coincidir com os elementos dos perfis. A Figura 3-5b ilustra a primeira diagonal do modelo L140B8, observa-se que alguns nós não coincidiram, porém ficaram muito próximos.

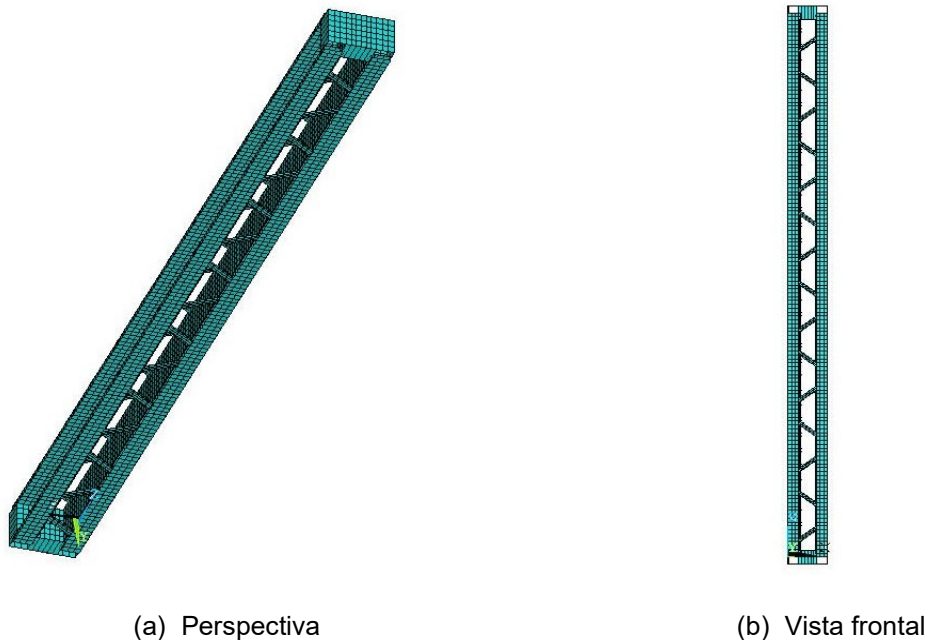
Figura 3-5: Modelagem das chapas diagonais dos modelos (a) L170B7 e (b) L140B8



Fonte: Autor (2022)

A Figura 3-6 ilustra a malha de elementos finitos no modelo L140B10 em perspectiva (Figura 3-6a) e em vista frontal (Figura 3-6b).

Figura 3-6: Geometria do modelo L140B10



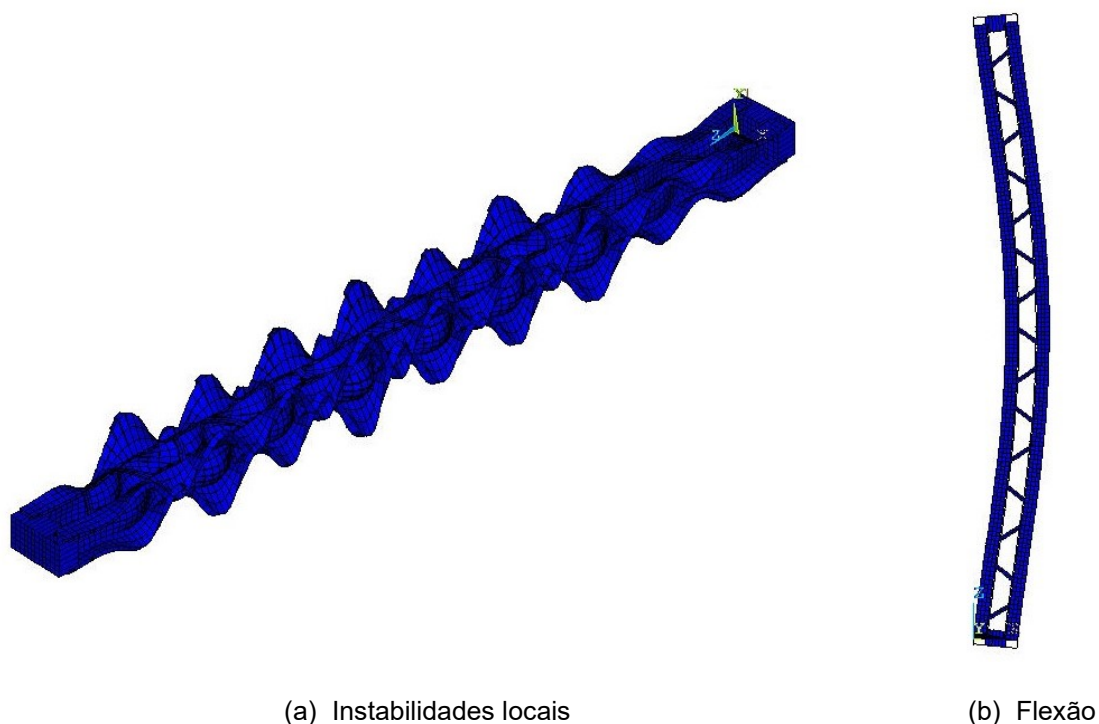
Fonte: Autor (2022)

As imperfeições geométricas iniciais foram consideradas utilizando o procedimento de Chodraui *et al* (2006), Almeida (2007), Maia *et al* (2016) e Rocha e Maia (2019). Primeiro foi simulado um modelo linear sem imperfeições e obtidos o autovalor (força crítica) e o autovetor

(deformada). Com este procedimento foram identificadas e adotadas, para cada modelo, as deformações que mais se aproximaram das configurações desejadas.

Para os modelos ensaiados por Bonab *et al.* (2013) foram consideradas as configurações global de flexão e local de cada modelo. A Figura 3-7 ilustra as deformadas local e global de flexão referentes ao modelo L140B10.

Figura 3-7: Configurações deformadas adotadas para o modelo L140B10



Fonte: Autor (2022)

Em relação à magnitude das imperfeições geométricas iniciais locais, foram considerados dois valores, como sugerido por Schafer e Pekoz (1998). A Tabela 3-2 traz os valores recomendados, sendo “P” a probabilidade da imperfeição geométrica inicial “ Δ ”, selecionada aleatoriamente, ser maior que a imperfeição discreta determinística “d”, adotada nos modelos numéricos.

Tabela 3-2: Análise probabilística para imperfeições tipos 1 e 2

P ($\Delta > d$)	Tipo 1 d_1/t	Tipo 2 d_2/t
0,75	0,14	0,64
0,50	0,34	0,94
0,25	0,66	1,55
0,05	1,35	3,44
0,01	3,87	4,47

Fonte: Adaptado de Schafer & Peköz (1998)

Os valores das relações “ d_1/t ” e “ d_2/t ” representam magnitudes de imperfeições locais, respectivamente para elementos da seção transversal de borda vinculada (AA) e de borda

livre (AL), sendo t a espessura da seção. Nas simulações do presente estudo foi adotado tipo 1 (“ d_1/t ”) para as deformadas selecionadas para cada modelo, dispensando a utilização de valores de “ d_2/t ”. Foram adotadas as seguintes magnitudes para as imperfeições locais: 0,14t e 0,66t.

Na literatura, há uma série de valores recomendados para as imperfeições iniciais globais de flexão. Rocha e Maia (2019), por exemplo, consideraram $L_{\text{barra}}/1500$ em todas as simulações, sendo L_{barra} o comprimento da barra composta. Porém, para a validação foram aplicadas imperfeições globais conforme sugestão de Bonab *et al.* (2013). Para isso foi criado um parâmetro “ $X_{\text{imperfeição}}$ ”, sendo a imperfeição adotada na análise numérica igual à relação “ $L_{\text{barra}}/\text{Imperfeição}$ ”.

A Tabela 3-3 apresenta os valores de imperfeição avaliados experimentalmente e os respectivos valores “ $X_{\text{imperfeição}}$ ” utilizados nas simulações numéricas realizadas utilizando o programa ANSYS.

Tabela 3-3: Valores de L_{barra} , imperfeições globais medidas experimentalmente por Bonab *et al.* (2013) e do parâmetro $X_{\text{imperfeição}}$

Conjunto (repetição)	L_{barra} (mm)	Imperfeição (mm)	$X_{\text{imperfeição}}$
L140B8 (R1)	1400	5,8	241,38
L140B8 (R2)	1400	7,6	184,21
L140B8 (R3)	1400	11,9	117,65
L140B10 (R1)	1400	9,8	142,86
L170B7 (R1)	1700	4,1	414,63
L170B7 (R2)	1700	7,4	229,73
L170B7 (R3)	1700	8,8	193,18
L170B8 (R2)	1700	9,6	177,08
L170B8 (R3)	1700	12,2	139,34

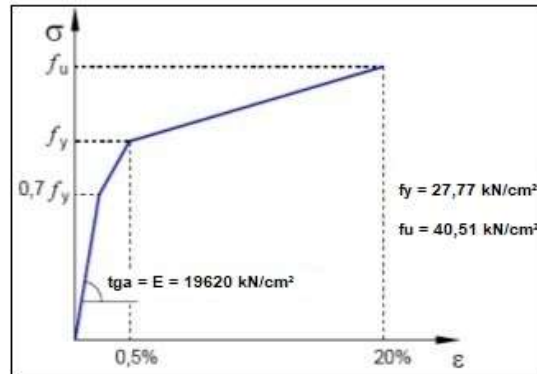
Fonte: Autor (2022)

Uma vez determinadas as configurações deformadas por meio de análises elásticas, foi feita a análise não-linear geométrica e física. Como Bonab *et al.* (2013) não forneceram as propriedades do aço das chapas diagonais, foram adotados os mesmos valores do aço dos perfis.

No presente estudo foi adotado o método incremental e iterativo de “Newton-Raphson Completo”. Foi utilizado o “Automatic Load Stepping” introduzindo limites superior e inferior de incrementos para atualizar automaticamente o deslocamento a ser acrescentado. Para avaliar a precisão da solução foi adotado critério de convergência de deslocamentos e tolerância de 0,1%, valor padrão do ANSYS.

Quanto à não-linearidade do material, foi utilizado o modelo trilinear (Figura 3-8), que já se mostrou eficiente nos estudos de Maia (2008) e Rocha e Maia (2019). Os valores indicados na Figura 3-8 foram utilizados para validação e são referentes ao aço utilizado por Bonab *et al.* (2013).

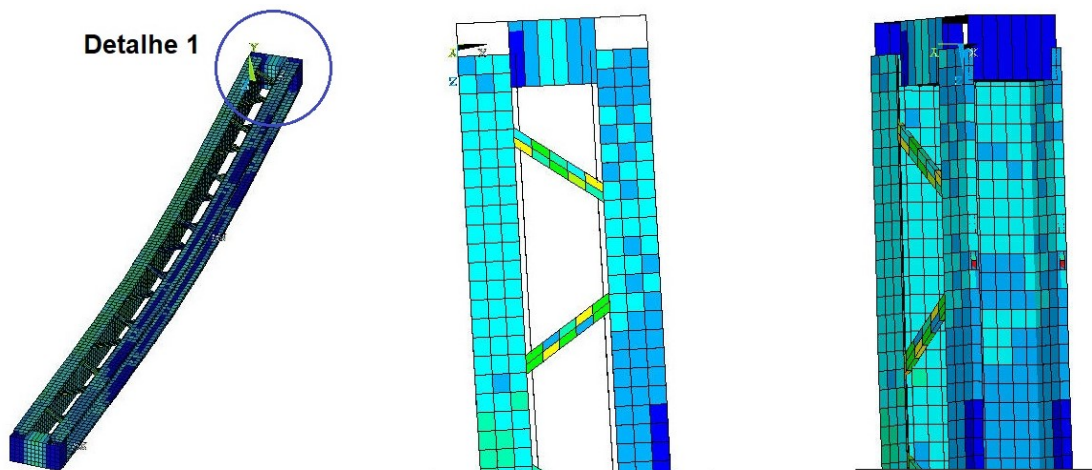
Figura 3-8: Curva tensão x deformação: modelo trilinear com os valores de Bonab *et al.* (2013) para validação



Fonte: Autor (2022)

Foram realizadas nove simulações numéricas e constatou-se que o modelo L140B10 foi o único que não apresentou resultados próximos aos experimentais. Além disso, foi observado que as chapas diagonais apresentavam tensões de von Mises muito maiores que os perfis, conforme ilustrado na Figura 3-9.

Figura 3-9: Distribuição das tensões de von Mises no modelo L140B10



a) Perspectiva

b) Detalhe 1 – vista frontal

b) Detalhe 1 – Rotacionado

Fonte: Autor (2022)

Como a análise experimental não forneceu informações sobre as propriedades do aço das diagonais, optou-se por adotar para a resistência ao escoamento do aço (f_y) um valor superior ao dos demais componentes. Foi adotado resistência ao escoamento de 35 kN/cm²

para mitigar o efeito apresentado na Figura 3-9. Com essa adaptação os resultados do modelo L140B10 foram satisfatórios.

A Tabela 3-4 resume os resultados obtidos nas simulações numéricas. O termo “Imp.” se refere à imperfeição medida experimentalmente; N_{EXP} é a força normal crítica experimental obtida por Bonab *et al.* (2013); $N_{EF,0}$ força normal crítica obtida na simulação numérica sem imperfeições; $N_{EF,1500}$ força normal crítica para simulação numérica com imperfeição local de 0,14t e global de $L_{barra}/1500$; $N_{EF,1}$ força normal crítica da simulação numérica com imperfeição local de 0,14t. Por fim, $N_{EF,2}$ é a força normal crítica da simulação numérica considerando imperfeição local de 0,66t. Para os dois casos, foram adotados os valores de imperfeições globais obtidos na análise experimental de Bonab *et al.* (2013).

Tabela 3-4: Análise comparativa: força normal crítica das análises numéricas e valores experimentais de Bonab *et al.* (2013)

Modelo (Repetição)	Imp. (mm)	N_{EXP} (kN)	$N_{EF,0}$ (kN)	$N_{EXP}/N_{EF,0}$	$N_{EF,1500}$ (kN)	$N_{EXP}/N_{EF,1500}$	$N_{EF,1}$ (kN)	$N_{EXP}/N_{EF,1}$	$N_{EF,2}$ (kN)	$N_{EXP}/N_{EF,2}$
L140B8 (R1)	5,8	204,76	251,81	0,81	240,52	0,85	207,56	0,99	199,89	1,02
L140B8 (R2)	7,6	183,86	251,81	0,73	240,52	0,76	198,89	0,92	191,11	0,96
L140B8 (R3)	11,9	159,09	251,81	0,63	240,52	0,66	179,91	0,88	172,80	0,92
L140B10 (R1)	9,8	289,05	387,86	0,75	324,52	0,89	282,74	1,02	267,13	1,08
L170B7 (R1)	4,1	151,95	239,64	0,63	185,90	0,82	149,12	1,02	144,47	1,05
L170B7 (R2)	7,4	135,19	239,64	0,56	185,90	0,73	129,77	1,04	125,19	1,08
L170B7 (R3)	8,8	124,32	239,64	0,52	185,90	0,67	123,80	1,00	119,27	1,04
L170B8 (R2)	9,6	162,40	299,01	0,54	232,65	0,70	176,78	0,92	170,93	0,95
L170B8 (R3)	12,2	146,29	299,01	0,49	232,65	0,63	167,37	0,87	161,65	1,00
Média				0,63		0,75		0,96		1,00
CV				0,011		0,010		0,004		0,004

Imp é a imperfeição medida experimentalmente; N_{EXP} é a força normal crítica experimental obtida por Bonab (2013); $N_{EF,0}$ é o resultado da simulação numérica sem imperfeições; $N_{EF,1/1500}$ é o resultado da simulação numérica com imperfeição local 0,14t e global de $L_{barra}/1500$; $N_{EF,1}$ é o resultado da simulação numérica com imperfeição local 0,14t e $N_{EF,2}$ é o resultado da simulação numérica com imperfeição local 0,66t. Para os dois casos ($N_{EF,1}$ e $N_{EF,2}$) foram adotados os valores de imperfeições globais obtidos na análise experimental de Bonab *et al.* (2013), conforme Tabela 3-3.

Fonte: Autor (2022)

Os valores de força normal resistente decorrentes das análises numéricas (Tabela 3-4) mostram que a aplicação das imperfeições geométricas iniciais é fator determinante não só para a capacidade resistente como também para melhorar a representatividade do modelo numérico.

Tomando os valores de força crítica experimentais como referência, o erro médio dos modelos sem imperfeições foi de 37%, enquanto a inclusão das duas magnitudes (1 e 2) de imperfeições resultaram em variações de 4% e 0% respectivamente. As análises foram realizadas adotando as imperfeições globais medidas nos modelos físicos. Nota-se ainda que a utilização da imperfeição global igual a $L_{barra}/1500$, combinada à imperfeição local de 0,14t,

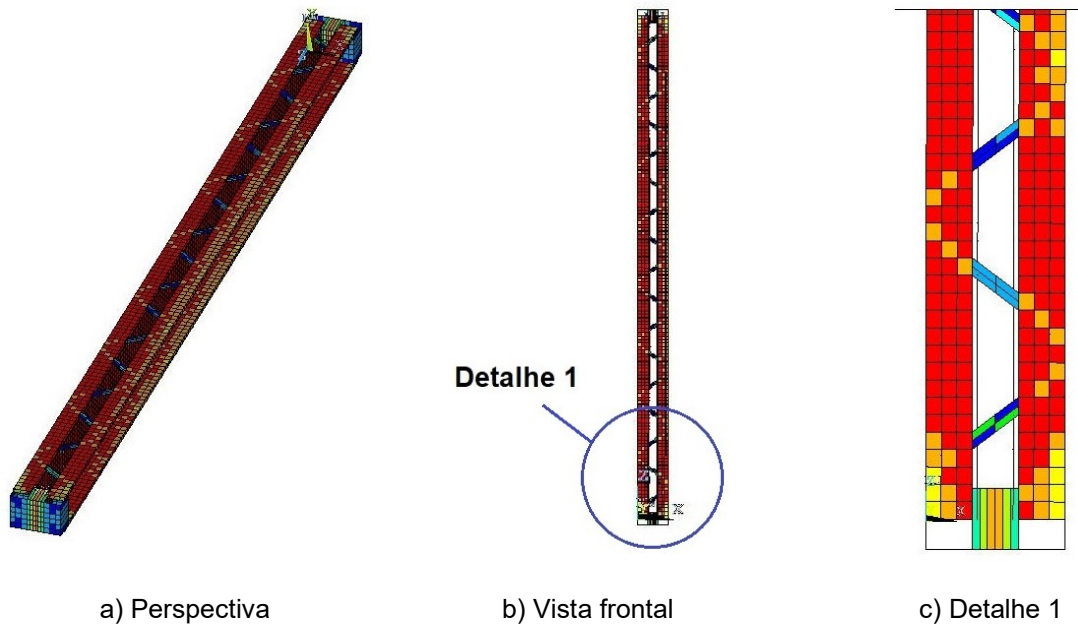
apresentou erro médio de 25%, comprovando a necessidade de aplicação da imperfeição medida por Bonab *et al.* (2013).

Observa-se que a variação na magnitude das imperfeições locais teve pouca influência nos valores de força normal crítica sendo que, de modo geral, imperfeição igual a 0,66t se mostrou ligeiramente mais próxima dos resultados experimentais. Porém, o modelo L170B7 se mostrou um pouco mais preciso para magnitude 1 evidenciando que, além da importância da aplicação das imperfeições iniciais, é interessante uma análise do impacto da sua magnitude. Vale citar que o modelo L170B7, único a responder melhor utilizando imperfeição de 0,14t, foi o que sofreu as maiores adaptações na geometria. Soma-se a isso, o fato deste modelo ter sido o único em que as diagonais foram inseridas com inclinação menor que a inclinação real de 30°. Quanto à adaptação da geometria cujos valores foram apresentados na Tabela 3-1, os modelos responderam muito bem permitindo a validação dos modelos numéricos para análises complementares.

As Figuras 3-10 e 3-11 apresentam a distribuição das tensões de von Mises para o modelo L140B8, desconsiderando as imperfeições e com imperfeições de magnitude 2 (0,66t) para a deformada local e imperfeição global de Bonab *et al.* (2013) para a deformada de flexão, respectivamente. Observa-se na Figura 3-10 que as maiores tensões ocorreram nos perfis do conjunto e sem incluir as imperfeições geométricas iniciais. Porém, a análise deste mesmo modelo com imperfeições (Figura 3-11), apresentou as maiores tensões nas chapas diagonais, principalmente na região de contato com os perfis.

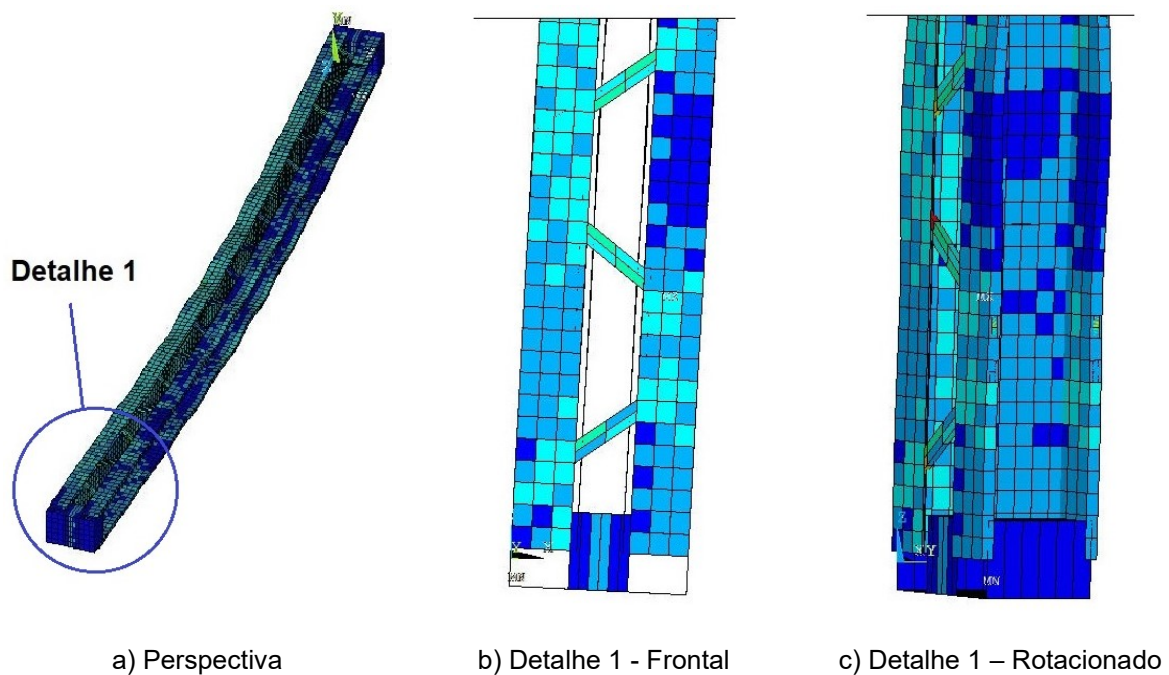
Os resultados das modelagens numéricas indicam esse mesmo comportamento, evidenciando que a não aplicação de imperfeições permite que os perfis absorvam mais as tensões de compressão, além de apresentar instabilidades locais menores.

Figura 3-10: Distribuição das tensões de von Mises modelo L140B8 sem imperfeições



Fonte: Autor (2022)

Figura 3-11: Distribuição das tensões de von Mises modelo L140B8 com imperfeições de magnitude 2



Fonte: Autor (2022)

Pode-se constatar também que as dimensões das chapas diagonais de seção 3 x 10 mm foram insuficientes para distribuição adequada das tensões. Isso ocorreu principalmente no modelo L140B10, no qual a distância entre perfis é maior e, conseqüentemente, a esbeltez das diagonais também é maior.

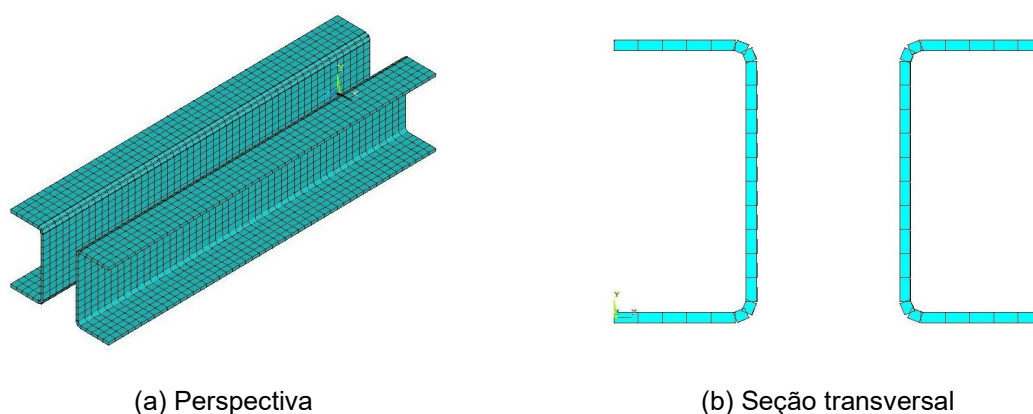
Por fim, a modelagem de barras compostas com travejamentos com diagonais se mostrou muito eficiente, permitindo sua aplicação em modelos de perfis formados a frio.

3.2 Modelagem com perfis formados a frio

Diferentemente da simples adaptação geométrica feita nos perfis laminados, a criação da geometria e malha de elementos finitos nos perfis formados a frio se mostrou mais complexa. A maior complexidade da modelagem se deve às dobras decorrentes da fabricação destes perfis.

A Figura 3-12 ilustra a modelagem dos perfis U150x50x3,75 afastados em 5 cm, e a seção transversal ressaltando a aplicação das dobras.

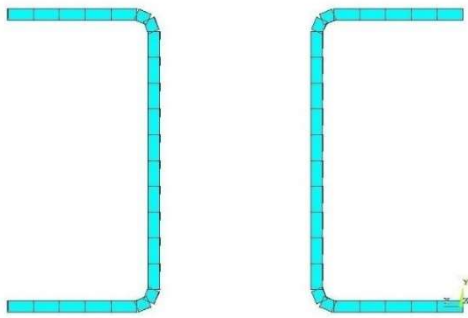
Figura 3-12: Modelagem e distribuição da malha de elementos finitos dos perfis do modelo 2U150x50x3,75 com 5 cm entre perfis e 500 mm de comprimento



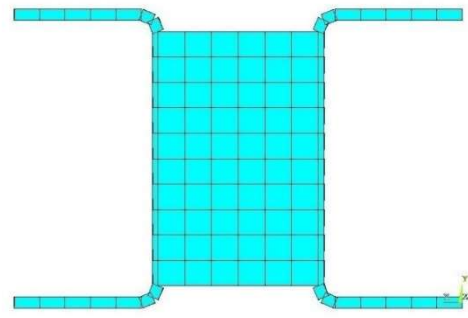
Fonte: Autor (2022)

A Figura 3-13 apresenta a sequência da geração da malha de elementos finitos das chapas de extremidade. Como os exemplares possuem dobras, foi necessário gerar a malha por etapas, buscando o melhor acoplamento possível entre nós. É apresentada a seção transversal dos perfis já dividida em elementos finitos (Figura 3-13a); malha na região entre as almas dos perfis (Figura 3-13b) que, por ser uma área retangular, possui distribuição perfeitamente uniforme dos elementos. Devido à presença de dobras nos perfis, a malha é menos uniforme, se adaptando à geometria e dimensões. Por fim, a discretização completa das chapas de extremidade, preenchendo as áreas superior e inferior.

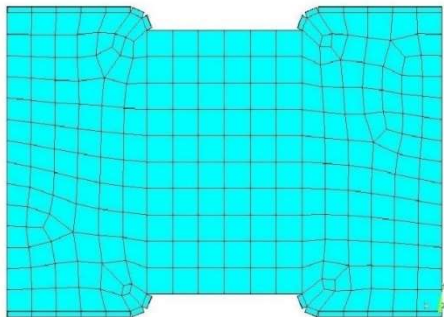
Figura 3-13: Detalhes da malha de elementos finitos das chapas de extremidade do modelo 2U150x50x3,75 com 5 cm entre perfis e comprimento de 500 mm



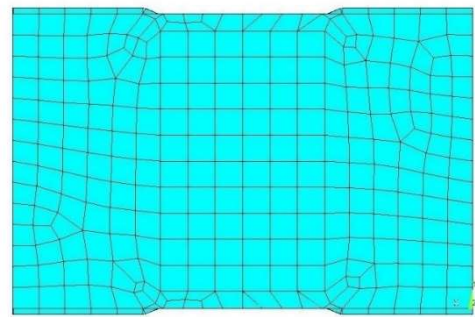
(a) Seção transversal dos perfis



(b) Malha uniforme entre as almas dos perfis



(c) Adaptação da malha devido às dobras

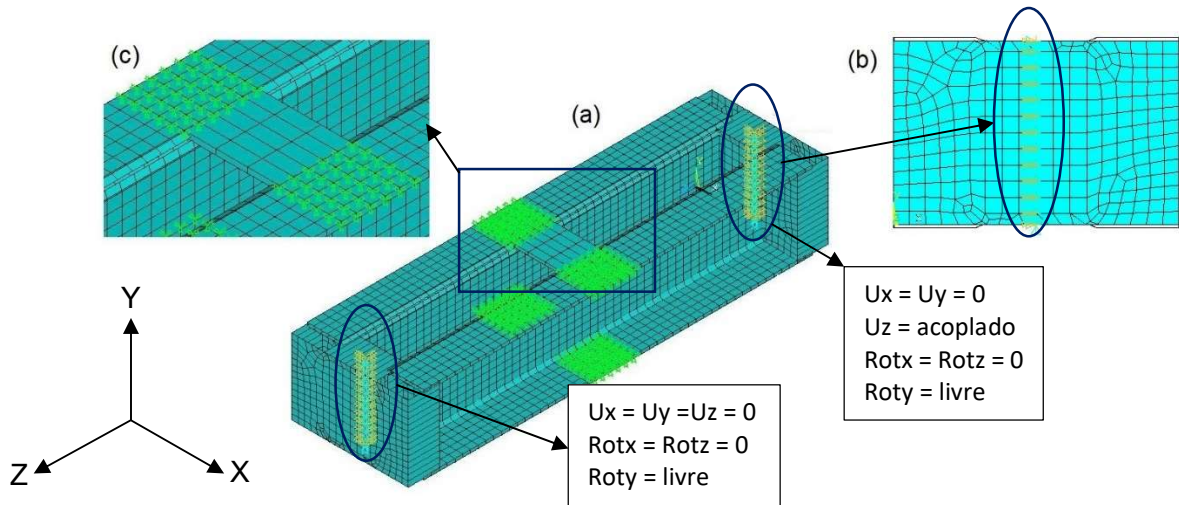


(d) Malha completa da chapa de extremidade

Fonte: Autor (2022)

A Figura 3-14 apresenta a discretização do modelo em seção duplo U100x50x3,75 com 5 cm entre perfis, 500 mm de comprimento e com uma chapa horizontal de travejamento. Quanto às condições de vinculação impostas ao modelo, devido ao acoplamento de nós das chapas de extremidade, estes são coincidentes com o eixo y (Figura 3-14b). Observa-se também o acoplamento de nós muito próximos dos perfis e da chapa horizontal (Figura 3-14c).

Figura 3-14: Discretização do modelo em seção duplo U100x50x3,75 com 5 cm entre perfis, 500 mm de comprimento e com uma chapa horizontal de travejamento

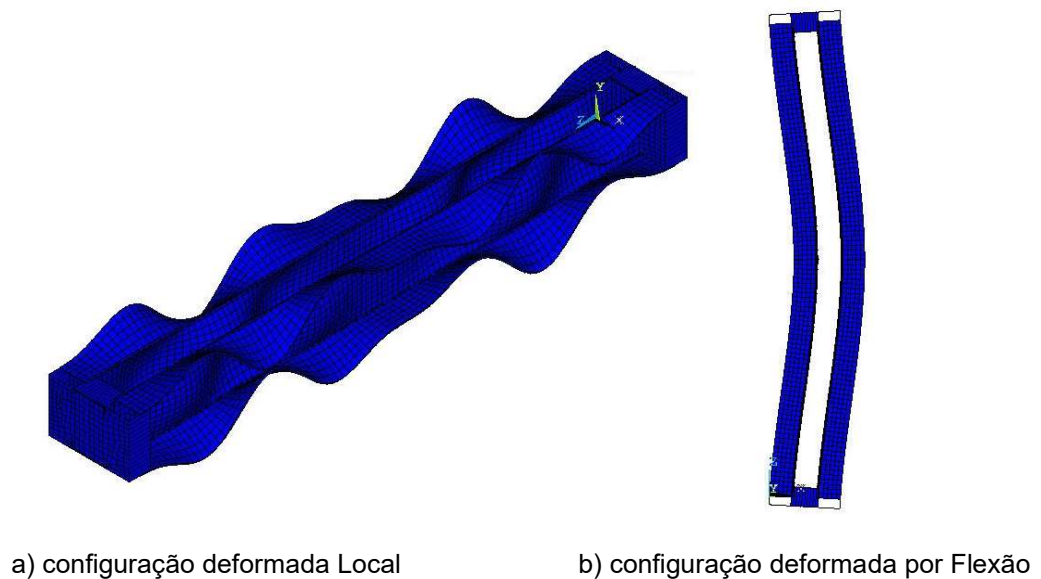


Fonte: Autor (2022)

A Figura 3-15 apresenta um exemplo das configurações deformadas local e global de flexão utilizadas para atualização da geometria do modelo com perfis duplo U100x50x2 com 5 cm entre perfis e 1000 mm de comprimento.

Foi adotada imperfeição geométrica inicial referente à configuração deformada local de $0,14t$ e $L_{\text{barra}}/1500$ para imperfeição geométrica inicial referente à configuração deformada por flexão.

Figura 3-15: Exemplo das deformadas adotadas para atualização da geometria



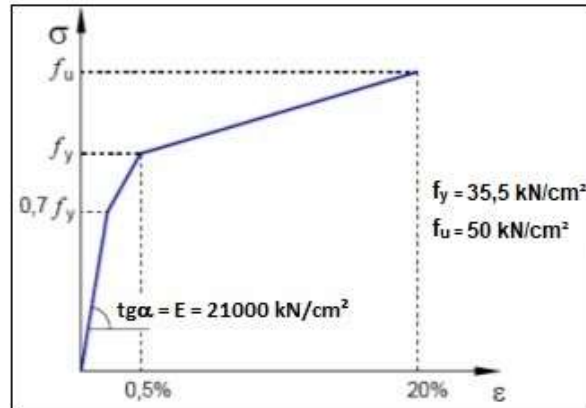
a) configuração deformada Local

b) configuração deformada por Flexão

Fonte: Autor (2022)

O Modelo trilinear foi adotado para representar o comportamento do aço e os principais parâmetros do modelo são mostrados na Figura 3-16.

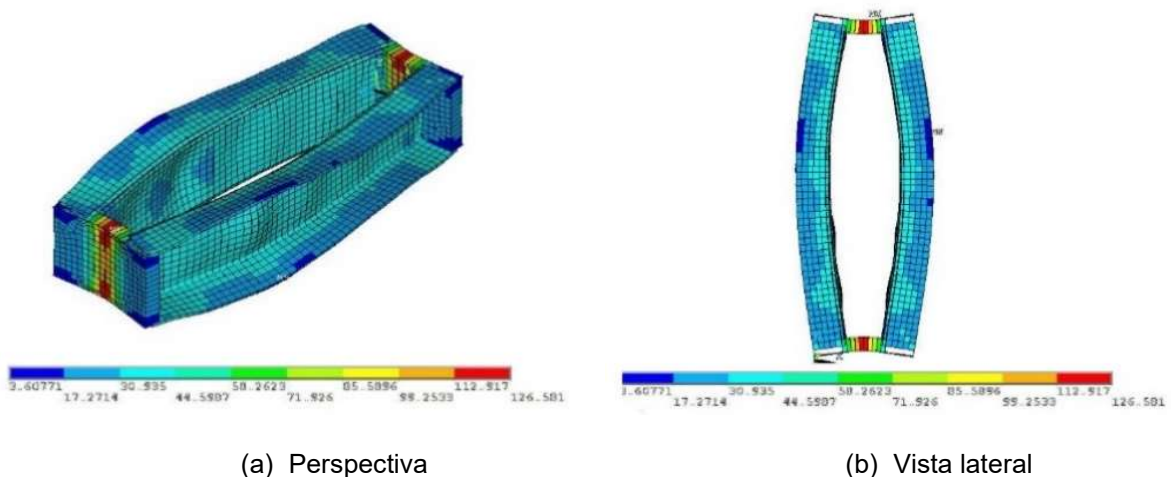
Figura 3-16: Curva tensão x deformação: modelo trilinear com os valores adotados para as simulações



Fonte: Autor (2022)

Nas análises numéricas iniciais foi constatada a importância da espessura das chapas de extremidade. A Figura 3-17 apresenta os resultados das tensões de von Mises para o modelo 2U100x50x3,75 com 5 cm entre perfis, e chapa de extremidade com espessura de 2 cm. A deformação apresentada está em escala ampliada em dez vezes para facilitar a visualização do comportamento do modelo. Houve concentração de tensões nas chapas de apoio, absorvendo tensões dos perfis e produzindo uma deformação que induziu os perfis à instabilidade global.

Figura 3-17: Configuração deformada e distribuição das tensões de von Mises para chapa de extremidade com 2 cm de espessura

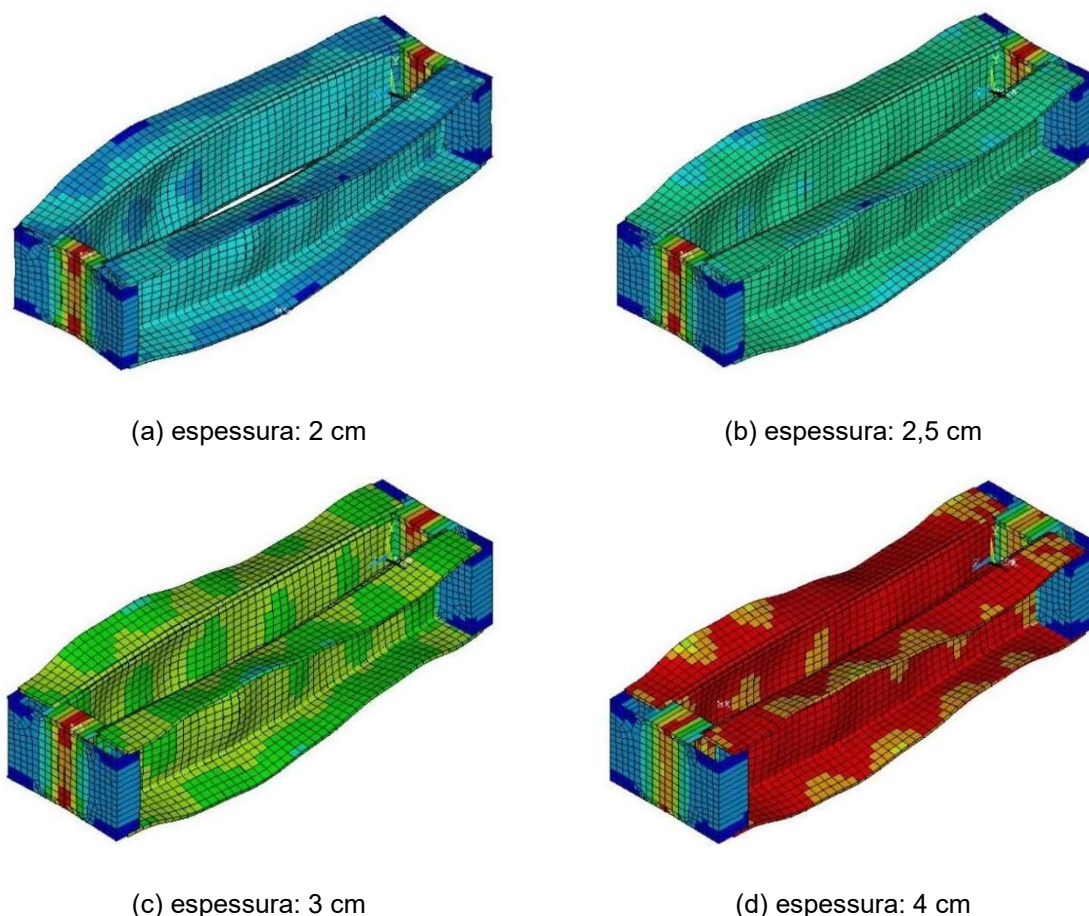


Fonte: Autor (2022)

Dada a influência da chapa de extremidade, foi feita uma análise deste parâmetro simulando modelos com diferentes espessuras das chapas. Tais modelos são formados por seção 2U100x50x3,75 e comprimento de 500 mm. A Figura 3-18 apresenta a configuração deformada ampliada em dez vezes e as tensões de von Mises para chapas de extremidade

com espessuras de: (a) 2 cm, (b) 2,5 cm, (c) 3 cm e (d) 4 cm. Notou-se que o aumento da espessura das chapas de extremidade, mantendo as propriedades do aço, causou redução da deformação. Também é visto que os perfis absorveram mais as tensões e a influência da instabilidade global por flexão foi reduzida.

Figura 3-18: Configuração deformada e distribuição das tensões de von Mises em função da espessura da chapa de extremidade



Fonte: Autor (2022)

Desta forma, a espessura de 4 cm atendeu bem às análises para distância entre perfis de 2,5 e 5 cm. Porém, ao testar modelos com 10, 15 e 20 cm entre perfis, foi constatado que as chapas de extremidade apresentavam concentração de tensões muito superior aos perfis e se deformavam excessivamente, mesmo aumentando sua espessura para 8 cm. Diante de tal comportamento, manteve-se a espessura de 4 cm, porém, fez-se a alteração das propriedades do aço das chapas de extremidade para modelos com 10 cm ou mais entre perfis, aumentando o valor do módulo de elasticidade na ordem de um milhão de vezes e aplicando comportamento linear, de modo a evitar que as deformações influenciasses os modos de instabilidade dos perfis.

Em função da boa correlação entre os resultados das simulações numéricas e resultados experimentais, os modelos numéricos foram considerados validados e utilizados para análises paramétricas cujos resultados são apresentados no capítulo a seguir.

4. Análise paramétrica: resultados e discussão

Uma vez validada, a modelagem numérica foi utilizada para investigar a influência dos seguintes parâmetros: tipo de travejamento, espaçamento entre perfis, número de chapas separadoras, comprimento da barra composta e esbeltez global. Na Tabela 4-1 é apresentada uma síntese dos parâmetros bem como os valores analisados na análise paramétrica.

Tabela 4-1: Resumo dos arranjos e parâmetros geométricos analisados

Travejamento por chapas	t (mm)	d (cm)	L_{barra} (mm)	λ_y	N_{CH}
Horizontais	2 e 3,75	2,5, 5 e 20	500 a 5000	4,37 a 164,69	0 a 9
Diagonais	2 e 3,75	2,5, 5 e 20	500 a 5000	4,37 a 164,69	2 a 20
Diagonais e horizontais	2 e 3,75	2,5, 5 e 20	500 a 5000	4,37 a 164,69	3 a 39

t: espessura dos perfis e das chapas de travejamento.
d: distância entre faces internas dos perfis.
L_{barra}: comprimento da barra composta.
 λ_y : esbeltez global em torno do eixo que mobiliza os travejamentos.
N_{CH}: número de chapas de travejamento.

A apresentação dos resultados, sobretudo de força normal resistente, foi dividida em três partes, em função do tipo de travejamento: primeiro as análises para barras compostas com travejamento em quadro, na sequência as barras com travejamento treliçado e, por fim, a avaliação da influência do tipo de travejamento. Para cada tipo de travejamento é avaliada a influência do número de barras separadoras, comprimento da barra composta e distância entre perfis.

Tabelas contendo todos os resultados são apresentadas no Apêndice A.

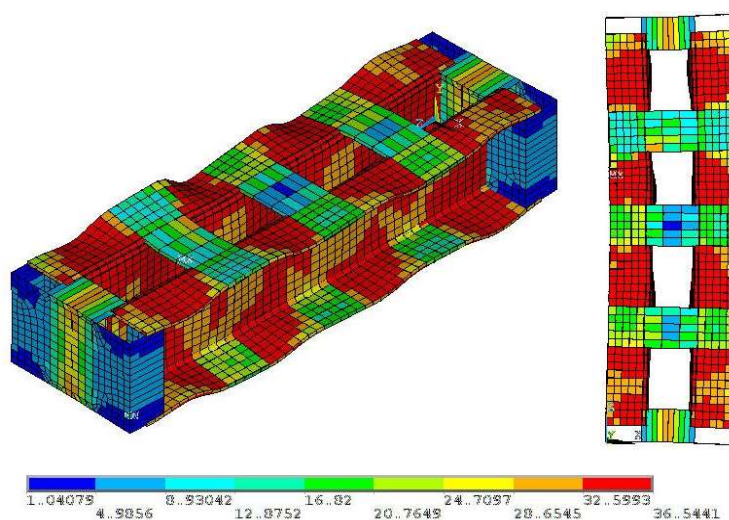
4.1 Barras compostas com Travejamento em Quadro

Para analisar barras compostas com travejamento em quadro foram considerados perfis U100x50x2 e U100x50x3,75 em seção duplo U travejados entre si por chapas separadoras horizontais. Para ambos os perfis houve variação do número de chapas separadoras, distância entre perfis e comprimento da barra composta. Utilizando simulações numéricas foram analisados 213 modelos e extraídos a força resistente de compressão e os modos de instabilidade.

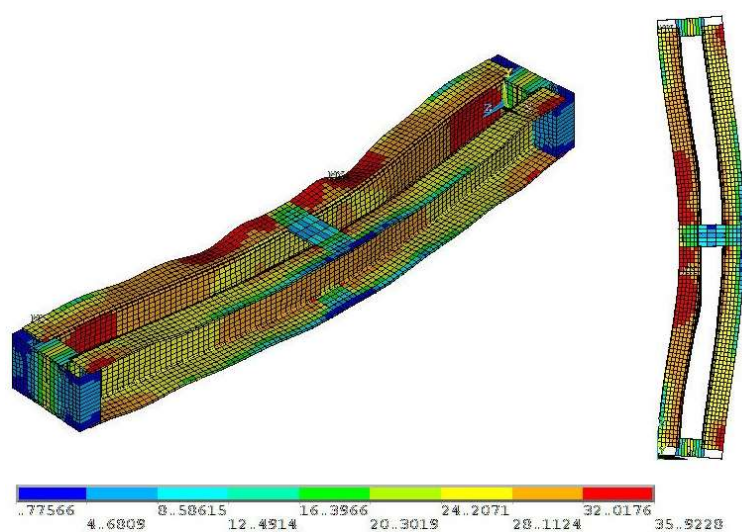
A Figura 4-1a apresenta a configuração deformada e distribuição das tensões de von Mises para o modelo U100x50x3,75, 500mm de comprimento, 5 cm entre perfis e conectados

por 3 chapas separadoras horizontais. Na vista em perspectiva, observa-se a predominância da instabilidade local, na vista lateral nota-se a instabilidade global por flexão, mesmo em menor magnitude que a instabilidade local. De forma análoga, na Figura 4-1b é apresentada a configuração deformada e as tensões de von Mises para o modelo U100x50x3,75 com 1000 mm de comprimento, perfis espaçados em 5 cm e ligados por 1 chapa separadora horizontal. Diferentemente da situação anterior, neste caso há predominância da instabilidade global por flexão e, de maneira secundária, há instabilidade local, porém esta não é determinante para a instabilidade do conjunto.

Figura 4-1 – Configuração deformada e tensões de von Mises (kN/cm²) para perfis U150x50x3,75



(a) 500 mm de comprimento, 5 cm entre perfis e 3 chapas separadoras



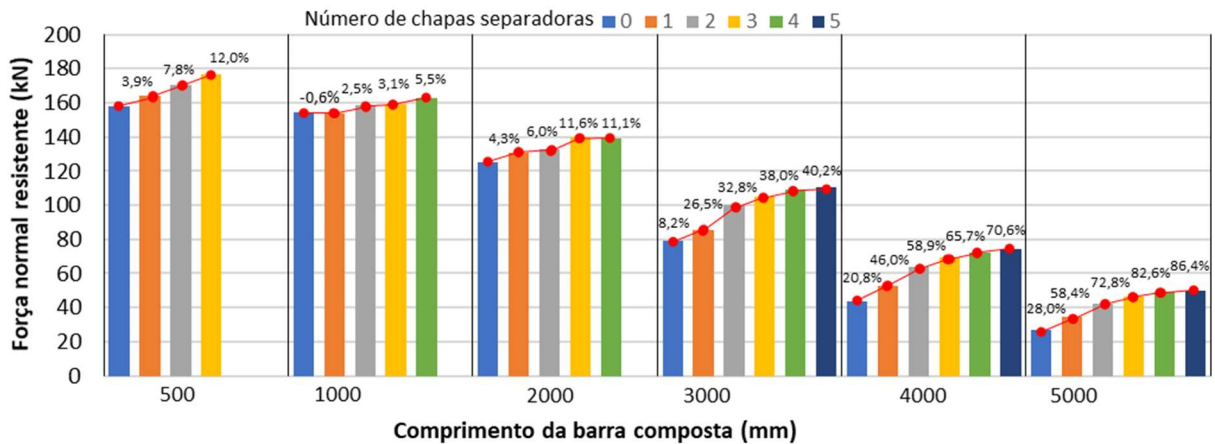
(b) 1000 mm de comprimento, 5 cm entre perfis e 1 chapa separadora

Fonte: Autor (2022)

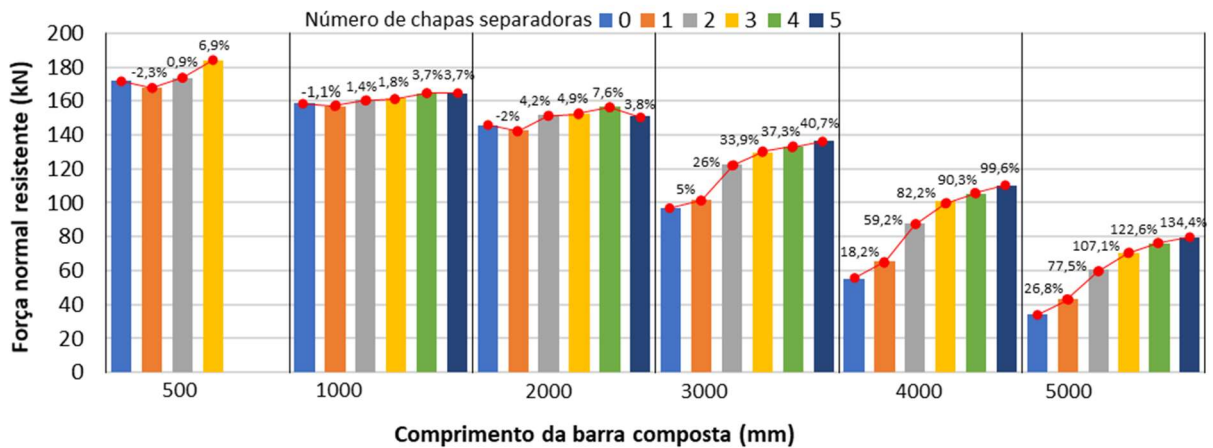
Foram analisadas as configurações deformadas, distribuição das tensões de von Mises e identificados os modos de instabilidade para todos os modelos simulados.

A Figura 4-2 apresenta um panorama geral dos valores de força normal resistente de compressão para travejamento em quadro considerando os 5 comprimentos de barra composta, as 3 distâncias entre perfis e os dois perfis avaliados. Também são apresentadas as variações percentuais da força resistente em relação aos modelos sem chapa separadora.

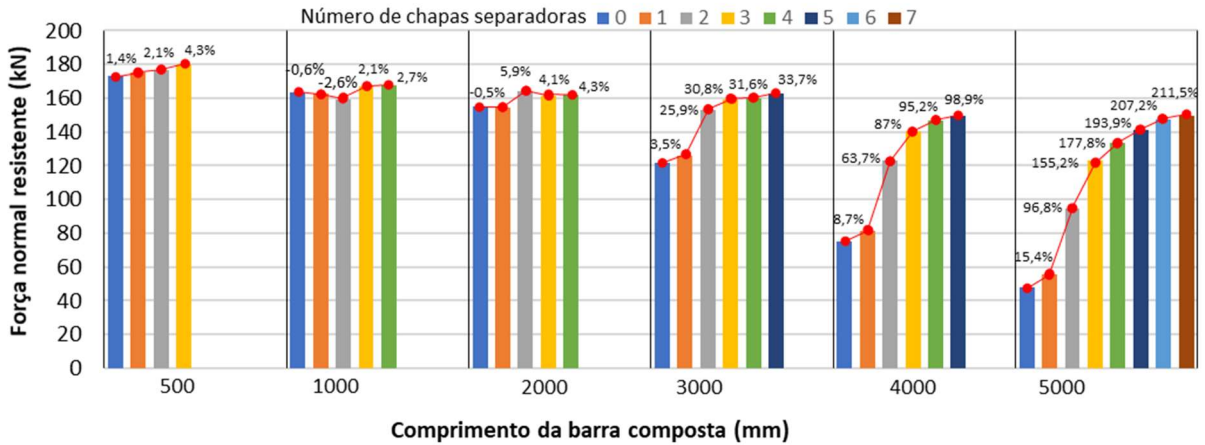
Figura 4-2 – Força normal resistente e variação percentual: modelos com travejamento em quadro



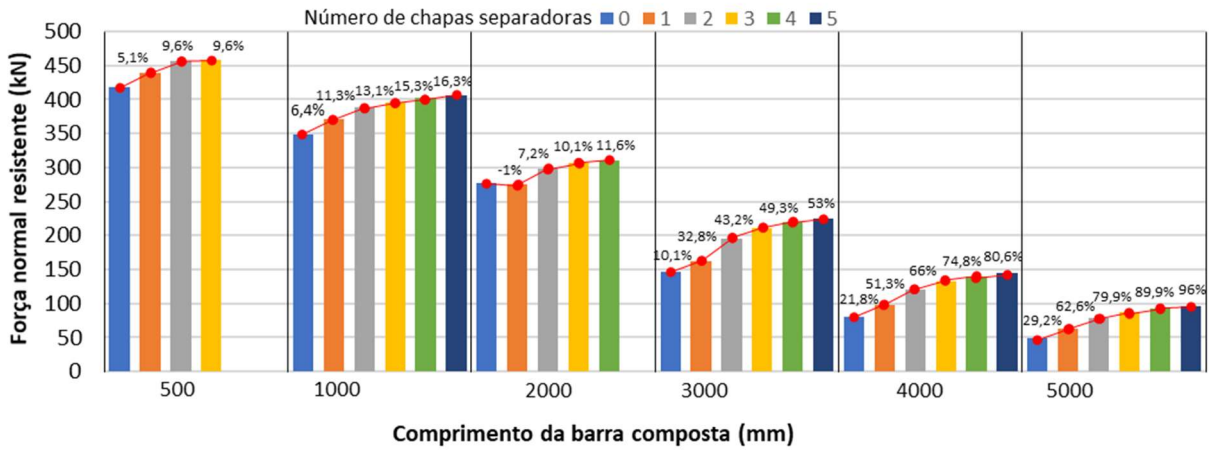
a) U100x50x2 – 2,5 cm entre perfis



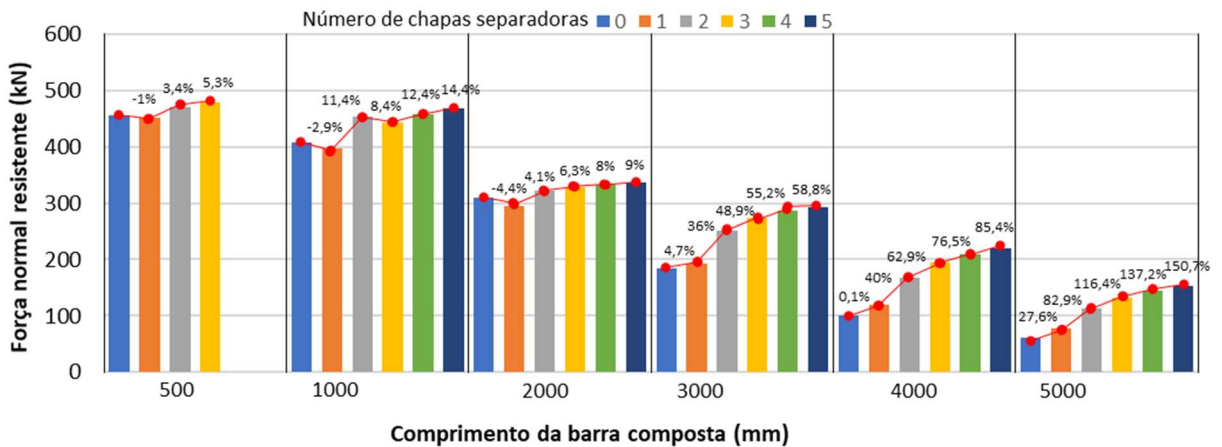
b) U100x50x2 – 5 cm entre perfis



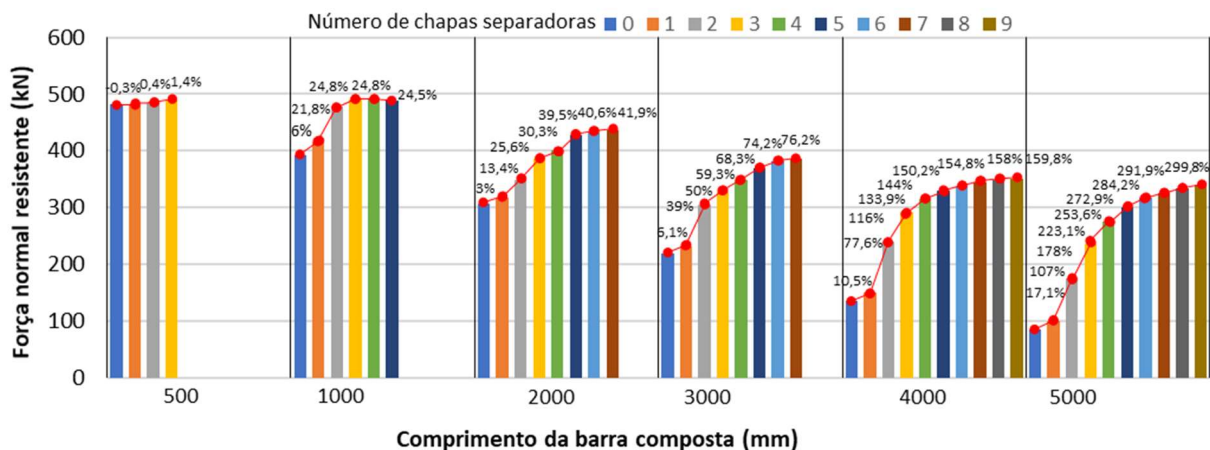
c) U100x50x2 – 20 cm entre perfis



d) U100x50x3,75 – 2,5 cm entre perfis



e) U100x50x3,75 – 5 cm entre perfis



f) U100x50x3,75 – 20 cm entre perfis

Fonte: Autor (2022)

A seguir, os valores de força normal resistente à compressão serão analisados em função dos parâmetros investigados.

4.1.1 Influência do comprimento da barra composta

Como esperado, os valores de força resistente da Figura 4-2 mostram que a capacidade resistente da barra composta diminui com o aumento do comprimento ou da esbeltez global. Quanto aos modos de instabilidade, barras compostas mais longas (comprimentos de 3000, 4000 e 5000 mm) apresentaram maior incidência da instabilidade global por flexão, como esperado. Este modo de instabilidade ocorreu em 79% dos casos analisados.

Na Tabela 4-2 são apresentados os intervalos de variação da força normal resistente para os perfis U100x50x2 e U100x50x3,75.

Observa-se que as variações aumentam com o aumento do comprimento da barra composta. Nas barras com perfis de 2 mm de espessura as variações são significativas para comprimentos a partir de 3000 mm; para comprimentos menores as variações não superaram a 12% em relação à barra isolada. Em contrapartida, a espessura de 3,75 mm se mostrou mais sensível ao comprimento da barra composta com variação máxima de 299,8% e 24,5% de aumento já para comprimento de 1000 mm, frente a 5,5% para espessura de 2 mm.

Tabela 4-2: Intervalo de variação da força normal resistente

Perfis U100x50x2 - Espaçamento entre perfis (cm)			
Comprimento (mm)	2,5	5,0	20
500	3,9 a 12%	-2,3% a 6,9%	1,4% a 4,3%
1000	-0,6% a 5,5%	-1,1% a 3,7%	-0,6% a 2,7%
2000	4,3% a 11,1%	-2% a 7,6%	-0,5% a 4,3%
3000	8,2% a 40,2%	5% a 40,7%	3,5% a 33,7%
4000	20,8% a 70,6%	18,2% a 99,6%	8,7% a 98,9%
5000	28% a 86,4%	26,8% a 134,4%	15,4% a 211,5%

Perfis U100x50x3,75 - Espaçamento entre perfis (cm)			
Comprimento (mm)	2,5	5,0	20
500	5,1 a 9,6%	-1% a 5,3%	-0,3% a 1,4%
1000	6,4% a 16,3%	-2,9% a 14,4%	6% a 24,5%
2000	-1% a 11,6%	-4,4% a 9%	3% a 41,9%
3000	10,1% a 53%	4,7% a 58,8%	6,1% a 76,2%
4000	21,8% a 80,6%	0,1% a 85,4%	10,5% a 159,8%
5000	29,2% a 96%	27,6% a 150,7%	17,1% a 299,8%

4.1.2 Influência do número de chapas separadoras horizontais

Os gráficos da Figura 4-2 mostram que não há proporcionalidade entre o aumento do número de chapas separadoras e a força normal resistente. Há um crescimento não linear da força normal resistente com tendência de estabilização da variação. A Tabela 4-3 apresenta as variações totais da força normal resistente devido à inserção das chapas separadoras. A variação total se refere à variação entre os modelos de barras isoladas e aquele com o maior número de chapas separadoras inseridas em cada modelo, mantendo fixos os demais parâmetros geométricos.

Tabela 4-3: Variação total da força normal resistente: variação entre modelos sem chapas separadoras e com o maior número de chapas investigado para cada modelo

Comprimento (mm)	Variação total da força normal resistente					
	U100x50x2			U100x50x3,75		
	2,5 cm	5 cm	20 cm	2,5 cm	5 cm	20 cm
500	12%	6,9%	4,3%	9,6%	5,3%	1,4%
1000	5,5%	3,7%	2,7%	16,3%	14,4%	24,5%
2000	11,1%	7,6%	4,3%	11,6%	9%	41,9%
3000	40,2%	40,7%	33,7%	53%	58,8%	76,2%
4000	70,6%	99,6%	98,9%	80,6%	85,4%	159,8%
5000	86,4%	134,4%	211,5%	96%	150,7%	299,8%

Em todos os casos observou-se que a inserção das chapas separadoras teve maior influência nos modelos mais longos, ou seja, barras compostas com maior esbelteza global. Por exemplo, para espessura de 3,75 mm e 20 cm entre perfis, o menor comprimento avaliado (500 mm) apresentou aumento de apenas 1,4% na força normal resistente; por outro lado, a barra com 5000 mm apresentou aumento de aproximadamente 300%.

Observou-se também que o modo de instabilidade influencia a capacidade resistente. Por exemplo, se comparadas as variações dos modelos com 5 e 20 cm entre perfis, para 2 mm de espessura (alta predominância da instabilidade local) não houve variações significativas na maioria dos casos, exceto para 5000 mm de comprimento, que apresentou aumento de 77,1%. Por outro lado, os ganhos foram significativos para 3 mm de espessura, sobretudo para 4000 e 5000 mm (instabilidade global predominante nestes casos) com 74,4% e 149,1% de aumento, respectivamente.

Contudo, em alguns casos houve variação negativa, por exemplo, para os menores comprimentos avaliados (500, 1000 e 2000 mm) este efeito ocorreu (Figura 4-2e). Nestes casos foi observado que a ausência de chapas separadoras (Figura 4-3a) causou uma distribuição mais uniforme das tensões ao longo do comprimento do perfil. Ao acrescentar uma chapa central (Figura 4-3b), os perfis se deformaram conjuntamente aumentando as tensões na região central (metade do comprimento). Nas barras com duas chapas (Figura 4-3c) a deformação se distribuiu mais uniformemente nos perfis e a concentração de tensões na região central foi amenizada.

Portanto, a presença de uma chapa separadora pode causar concentração de tensões na região central de um dos perfis diminuindo, assim, a força normal resistente à compressão.

A Figura 4-3 apresenta as configurações deformadas e tensões de von Mises referentes à situação exemplificada.

Figura 4-3: Influência do número de chapas separadas na configuração deformada e tensões de von Mises para perfis 100x50x3,75, 5 cm entre perfis e comprimento de 2000 mm



(a) sem chapas separadoras

(b) uma chapa separadora

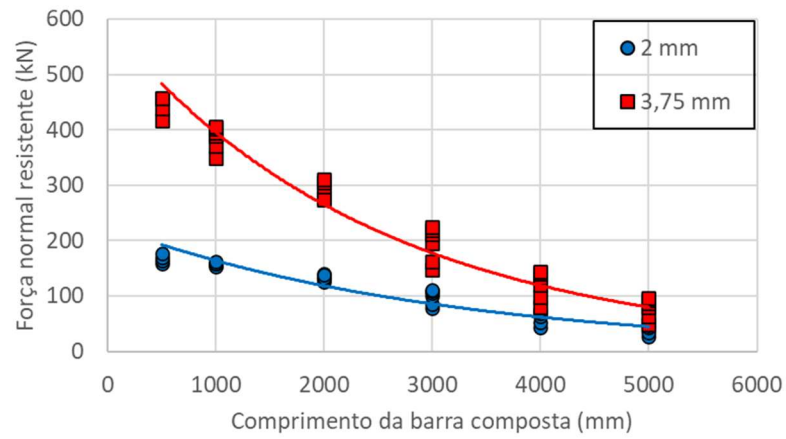
(c) duas chapas separadoras

Fonte: Autor (2022)

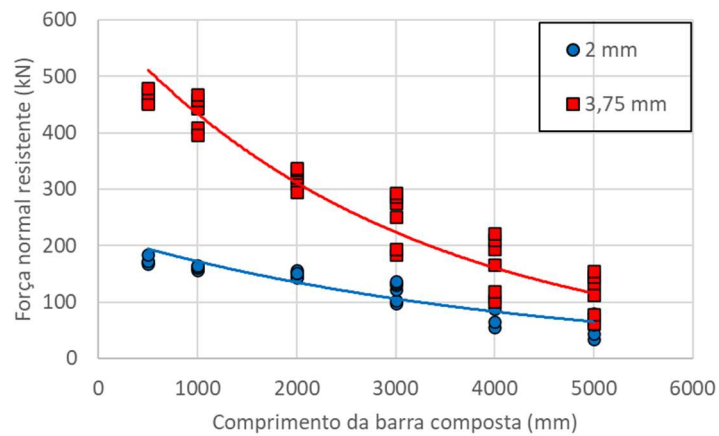
4.1.3 Influência da espessura dos perfis

A Figura 4-4 apresenta a variação da força normal resistente de compressão em função do comprimento da barra composta. Para esta análise a distância entre perfis foi mantida fixa e os modelos foram separados em função da espessura (2 e 3,75 mm). Os resultados foram agrupados para diferentes números de chapas separadoras horizontais e criadas linhas de tendência.

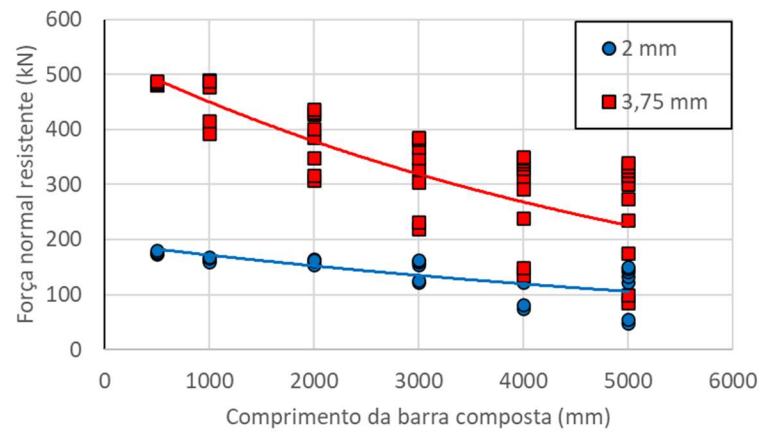
Figura 4-4: Influência da espessura dos perfis



(a) 2,5 cm entre perfis



(b) 5 cm entre perfis



(c) 20 cm entre perfis

Fonte: Autor (2022)

Os modelos compostos por perfis mais espessos se mostraram mais resistentes, sobretudo aqueles mais curtos (menor esbelteza global). Perfis com menores comprimentos são mais susceptíveis à instabilidade local e o aumento da espessura leva ao aumento da força normal resistente nos modelos mais curtos. À medida que o comprimento da barra composta aumenta, os valores de força normal resistente se aproximam entre si diminuindo o efeito da variação de espessura.

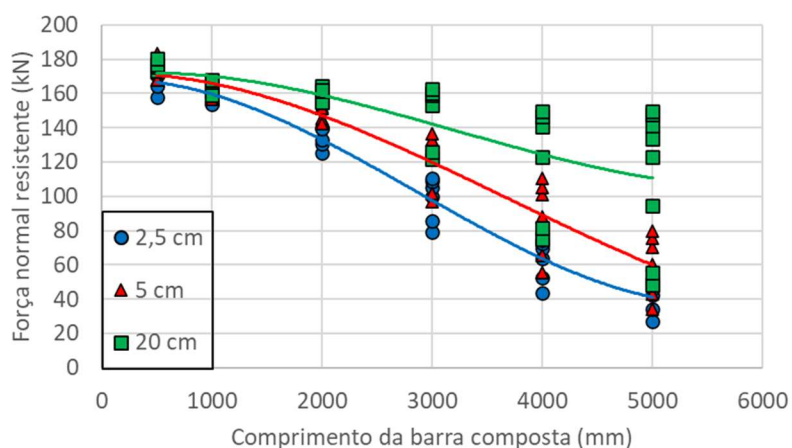
A variação da espessura também influenciou o modo de instabilidade principal; 64% dos modelos com 2 mm de espessura apresentaram instabilidade local enquanto nos modelos com 3,75 mm de espessura o percentual foi de apenas 24,8%.

Ainda em relação aos modos de instabilidade, o modo global se tornava predominante com o aumento do comprimento (maior esbelteza global) da barra composta. Porém, este efeito não ocorreu nos modelos com 2 mm de espessura e 20 cm de distância entre perfis; nestes casos a instabilidade local foi predominante. Assim, barras compostas com perfis de menores espessuras são fortemente influenciadas pela instabilidade local, mesmo para modelos muito esbeltos globalmente.

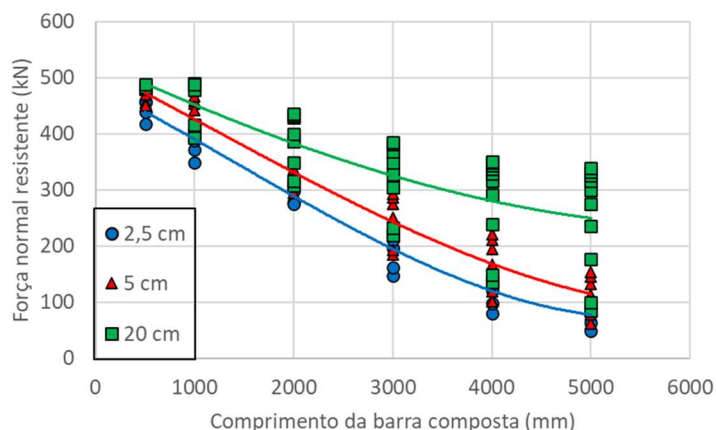
4.1.4 Influência da distância entre perfis

A Figura 4-5 apresenta a variação da força normal resistente pelo comprimento, mantendo fixa a espessura e organizando os resultados em função da distância entre perfis (2,5, 5 e 20 cm). Nestes gráficos foram incluídas as curvas de tendência.

Figura 4-5: Influência da distância entre perfis



(a) 2 mm de espessura



(b) 3,75 mm de espessura

Fonte: Autor (2022)

Há uma relação direta entre o aumento da distância entre perfis e o aumento da força normal resistente na direção analisada, ou seja, para instabilidade em torno do eixo de simetria que mobiliza os travejamentos. Este efeito ocorre devido ao afastamento entre os perfis aumentar o momento de inércia da seção composta na direção estudada.

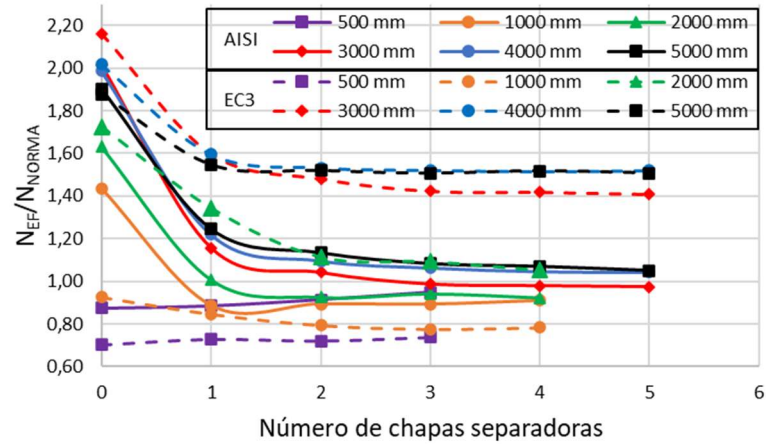
A exemplo de análises anteriores, neste caso também foi observado que os modelos com barras compostas mais longas foram mais influenciados pela distância entre os perfis.

Os modelos com 2 mm de espessura apresentaram, para distâncias entre perfis de 2,5 cm, 5 cm e 20 cm, instabilidade local como modo de instabilidade principal, respectivamente em 62,5%, 47,0% e 82,4% dos casos. Em contrapartida, nos modelos com 3,75 mm de espessura em apenas 1,2%, 2,4% e 34,8% dos casos a instabilidade local foi predominante, respectivamente para 2,5, 5 e 20 cm entre perfis. Portanto, houve aumento significativo da ocorrência de instabilidade local quando os perfis foram espaçados de 20 cm.

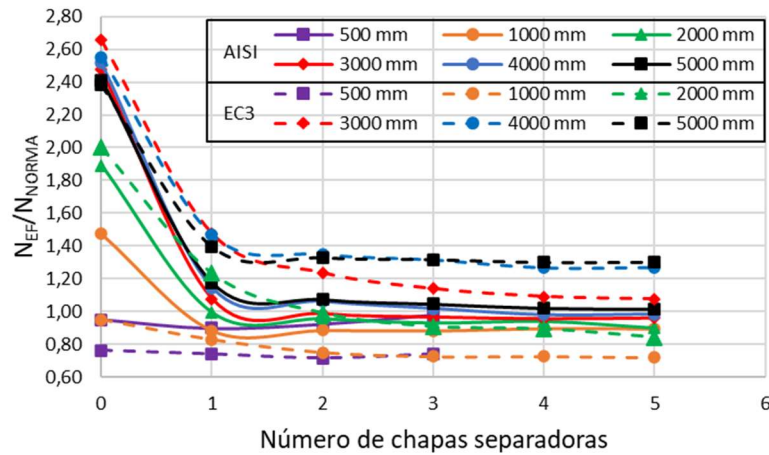
4.1.5 Análise comparativa: simulação numérica vs. procedimentos normativos

A Figura 4-6 apresenta gráficos da relação entre valores de força resistente extraídos da simulação numérica (N_{EF}) e teóricos calculados utilizando as recomendações do ANSI/AISI S100 (2020) e do Eurocode 3 (2006). Os valores teóricos foram nominados como N_{NORMA} nas análises a seguir. Os resultados teóricos de barras isoladas se mostraram mais próximos dos modelos sem chapas separadoras e, portanto, foram utilizados nas comparações. No caso das barras com chapas separadoras foram utilizados os procedimentos recomendados para barras compostas.

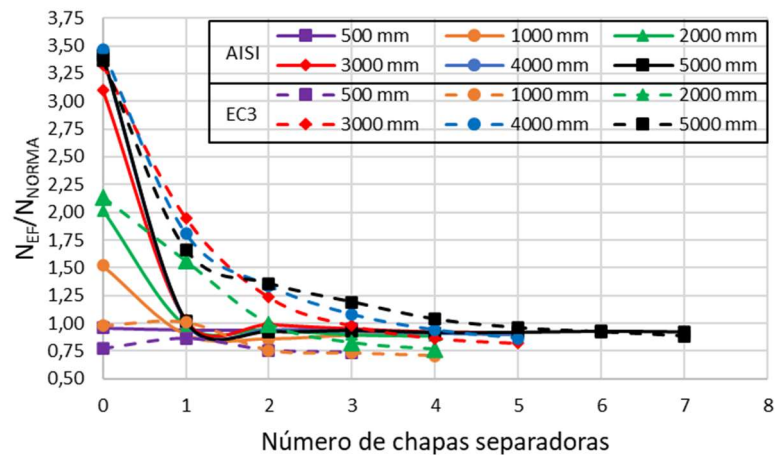
Figura 4-6: Relação N_{EF}/N_{NORMA} para barras compostas com travejamento em quadro



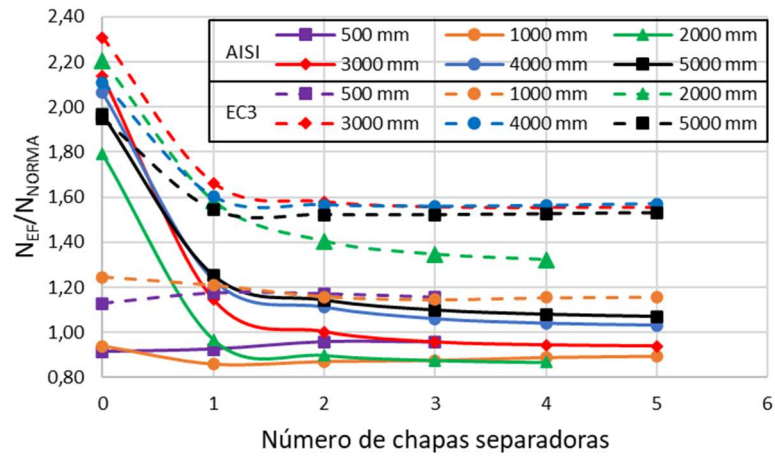
(a) U100x50x2 – 2,5 cm entre perfis



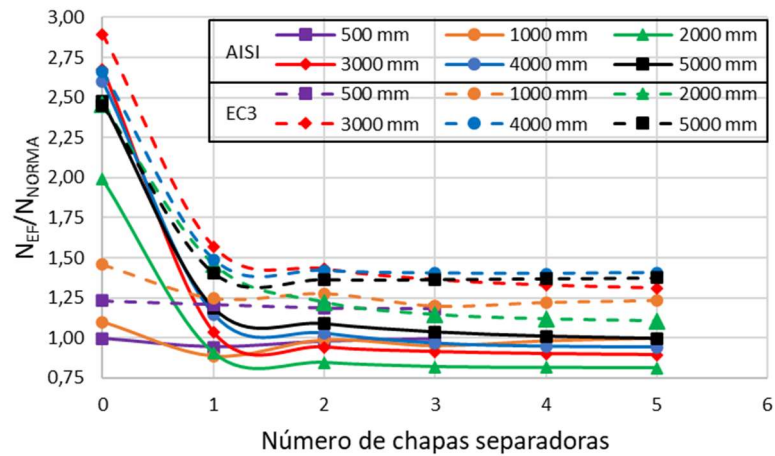
(b) U100x50x2 – 5 cm entre perfis



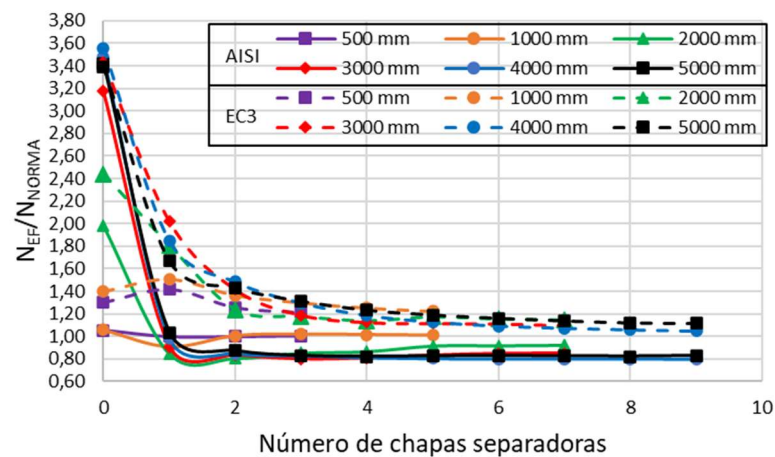
(c) U100x50x2 – 20 cm entre perfis



(d) U100x50x3,75 – 2,5 cm entre perfis



(e) U100x50x3,75 – 5 cm entre perfis



(f) U100x50x3,75 – 20 cm entre perfis

Fonte: Autor (2022)

No caso das barras isoladas há uma tendência de ambos os procedimentos normativos serem mais conservadores com o aumento do comprimento da barra composta. Tais procedimentos consideram a força resistente à compressão de uma barra e multiplicam este valor por dois. Nesta situação comumente ocorre compressão nas mesas e tração na alma do perfil U, sendo este o elemento mais rígido da seção transversal. Porém, quando simulada a compressão centrada dos modelos sem chapa separadora, ou barras isoladas, cada perfil independente recebe a carga com uma excentricidade que tende a tracionar as mesas e comprimir a alma. A influência da excentricidade diminui com o aumento do comprimento da barra composta, aumentando a incidência do modo de instabilidade global por flexão e deslocando os perfis na mesma direção (Figura 4-1b). Porém, mesmo que as almas dos dois perfis não sofram compressão devido à excentricidade, ainda haverá um dos perfis nesta condição favorável. Portanto, a maior incidência de tensões de compressão na alma de um perfil, ou de ambos, contribui para maiores valores de força normal resistente em comparação com os resultados normativos.

Com a presença dos travejamentos, ou seja, barras compostas, as forças resistentes normativas oriundas do Eurocode 3 (2006) foram menores que as previstas pelo ANSI/AISI S100 (2020), exceto para os modelos com 2 mm de espessura e comprimentos de 500 e 1000 mm.

A menor distância entre perfis de 2,5 cm resultou em maior diferença entre os valores normativos das duas normas, com as previsões do Eurocode 3 (2006) subestimando os resultados em 86,8% dos casos. Em contrapartida, os valores previstos pelo ANSI/AISI S100 (2020) foram superestimados em 52,8% dos casos.

Com o afastamento dos perfis, as forças resistentes previstas pelas duas normas se aproximam dos valores obtidos nas simulações numéricas, porém ocorre aumento da incidência de resultados normativos superestimados. Por exemplo, o Eurocode 3 (2006) não superestimou os valores da modelagem numérica para a espessura de 3,75 mm. Contudo, para 2 mm de espessura e 20 cm entre perfis, a força resistente foi superestimada em 60,7% dos casos. Da mesma forma, para 20 cm entre perfis a ANSI/AISI S100 (2020) superestimou seus resultados em 89,3% e 80% das vezes, respectivamente para 2 e 3,75 mm.

No geral, os valores de força resistente previstos pela ANSI/AISI S100 (2020) foram superestimados, sobretudo com o afastamento dos perfis. Porém, é importante ressaltar que embora esta norma seja específica para perfis formados a frio, contempla apenas barras compostas com perfis em contato. Outra exigência da ANSI/AISI S100 (2020) é que a esbeltez entre conexões não ultrapasse à metade da esbeltez global da barra composta. Contudo, a maioria dos modelos analisados no presente estudo não atende a tal condição.

Quanto ao Eurocode 3 (2006), seu procedimento não é específico para perfis formados a frio e é válido quando há pelo menos três módulos iguais de travejamento, ou seja, duas chapas separadoras ou mais. Sua aplicação aos modelos analisados no presente estudo resultou em valores subestimados de força resistente, sobretudo para 3,75 mm de espessura e os valores obtidos para barras compostas com uma chapa central se mostraram coerentes em comparação com os modelos com mais travejamentos.

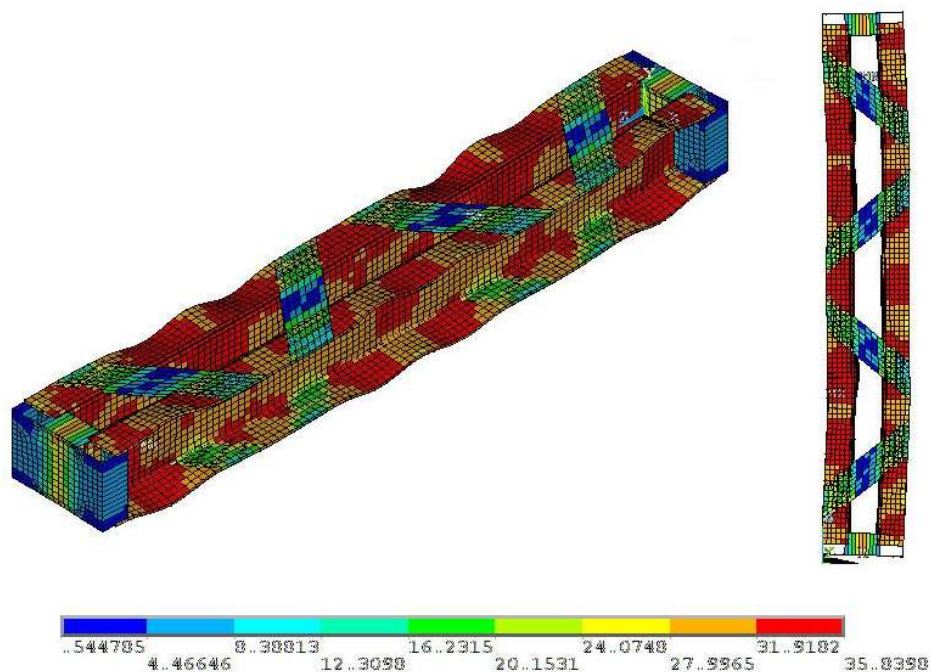
4.2 Barras compostas com travejamento treliçado

Os modelos com travejamento treliçado são constituídos por perfis duplo U100x50x2 e U100x50x3,75. Além da espessura dos perfis, foi analisada a influência dos seguintes parâmetros geométricos: comprimento da barra composta, distância entre perfis e tipo de travejamento treliçado. Foi realizada análise numérica de 82 modelos, sendo 41 destes com travejamento treliçado com chapas diagonais e o restante com chapas diagonais e horizontais.

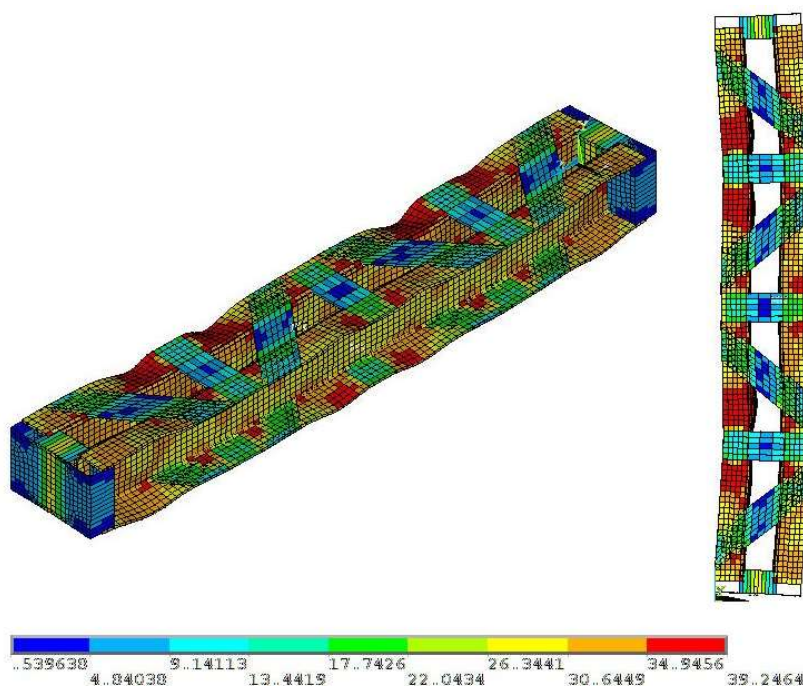
De forma análoga ao item 4.1, as tabelas contendo todos os resultados são apresentadas no Apêndice A.

A Figura 4-7 ilustra a configuração deformada e distribuição das tensões de von Mises para barra composta com dois perfis U100x50x3,75, 1000 mm comprimento, 5 cm de espaçamento entre perfis, travejados por 4 chapas diagonais (Figura 4-7a) e chapas diagonais e horizontais (Figura 4-7b). Para ambas as situações, na vista em perspectiva observa-se a predominância da instabilidade local e, na vista lateral é possível visualizar a instabilidade global por flexão, em menor magnitude.

Figura 4-7 – Configuração deformada e tensões de von Mises (kN/cm²) para barra duplo U100x50x3,75 com 5 cm entre perfis, comprimento de 1000 mm e variação do travejamento



a) travejamento com 4 chapas diagonais



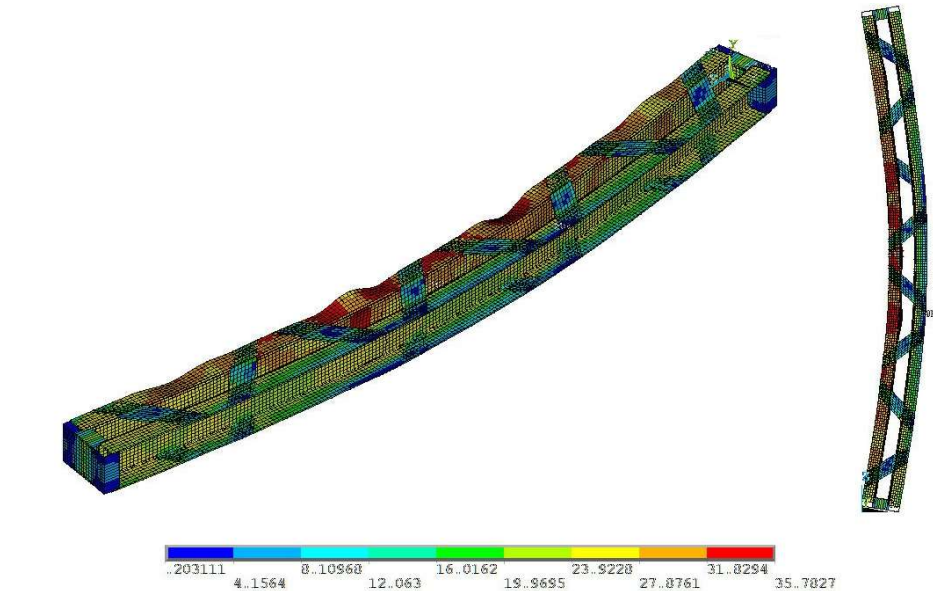
b) travejamento com chapas diagonais e horizontais

Fonte: Autor (2022)

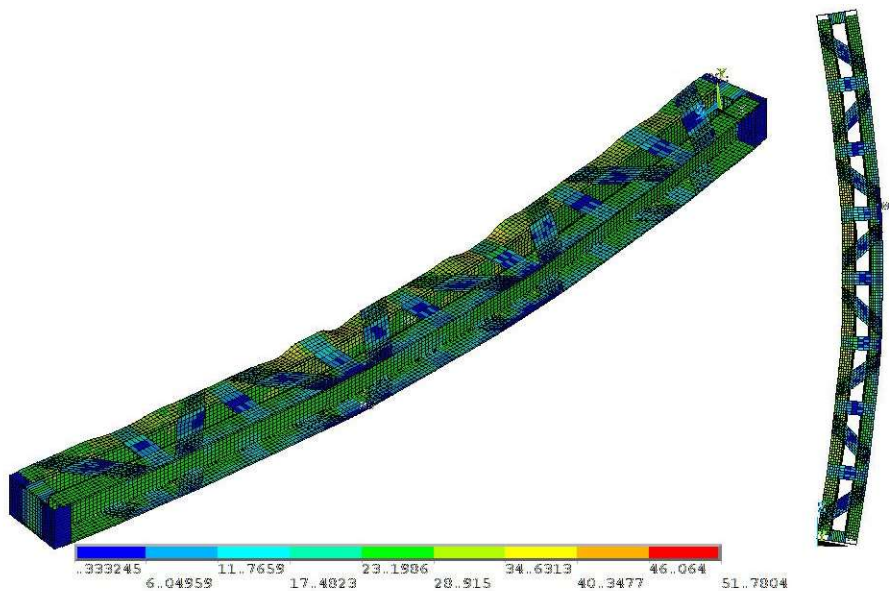
Considerando os mesmos arranjos (duplo U100x50x3,75; 5 cm entre perfis), nas barras compostas mais longas, comprimento de 2000 mm (Figura 4-8), houve predominância da instabilidade global por flexão e, de maneira secundária, instabilidade local não

determinante para a instabilidade do conjunto. Na Figura 4-8 foram considerados, respectivamente, travejamento com 8 chapas diagonais (Figura 4-8a) e travejamento com chapas diagonais e horizontais (Figura 4-8b).

Figura 4-8– Configuração deformada e tensões de von Mises (kN/cm²) para barra duplo U100x50x3,75, 5 cm entre perfis, 2000 mm de comprimento e variação do travejamento



a) travejamento com 8 chapas diagonais



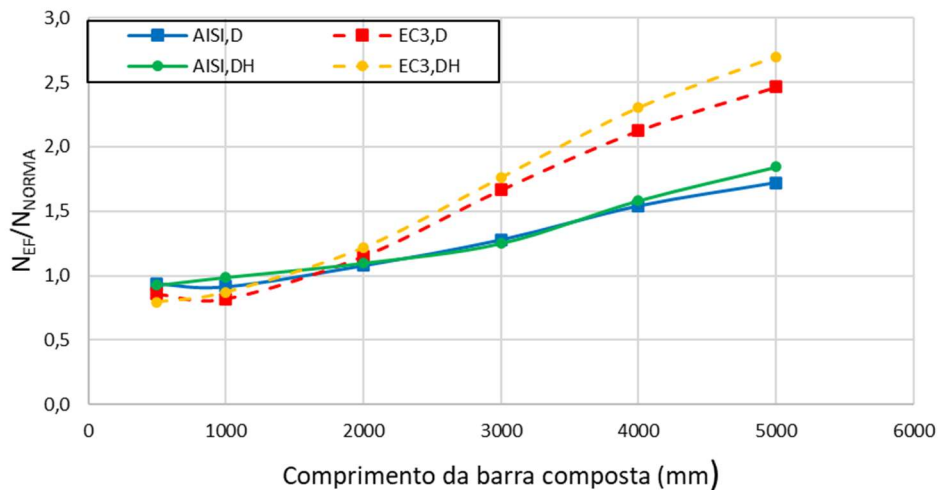
b) travejamento com chapas diagonais e horizontais

Fonte: Autor (2022)

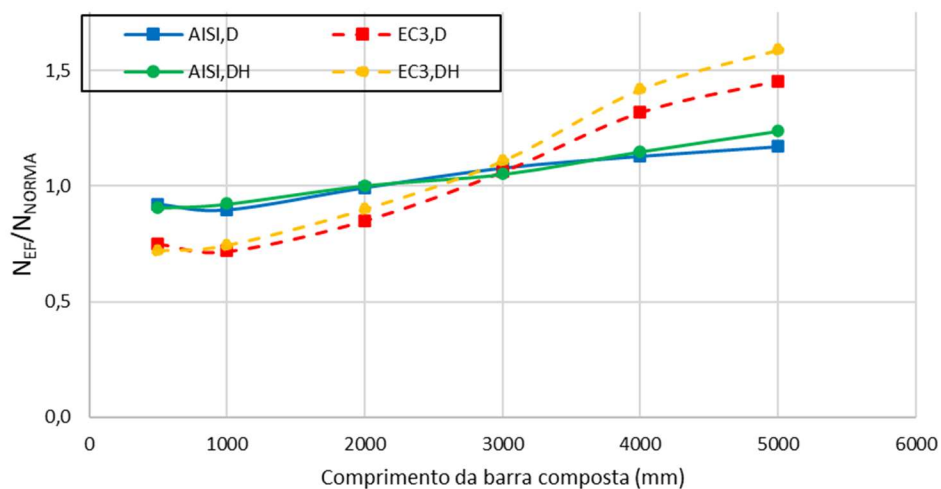
4.2.1 Análise comparativa: simulação numérica vs. procedimentos normativos

Os valores de força normal resistente (N_{EF}) obtidos nas simulações numéricas foram comparados a valores teóricos calculados segundo procedimentos do ANSI/AISI S100 (2020) e do Eurocode 3 (2006). Nestas comparações foi utilizada a relação N_{EF}/N_{NORMA} sendo que N_{NORMA} corresponde à força normal resistente prevista segundo procedimentos normativos. A Figura 4-9 apresenta a variação da relação entre forças resistentes em função do comprimento da barra composta e da distância entre perfis. As legendas indicam nomenclaturas referentes às normas utilizadas na comparação e quanto ao tipo de travejamento (D para travejamento apenas por chapas diagonais e DH por diagonais e horizontais).

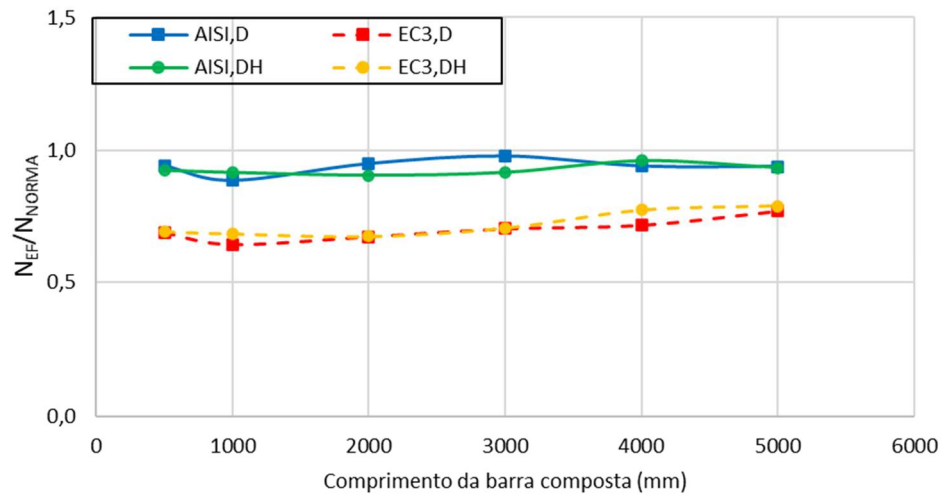
Figura 4-9: Relação N_{EF}/N_{NORMA} para travejamento treliçado



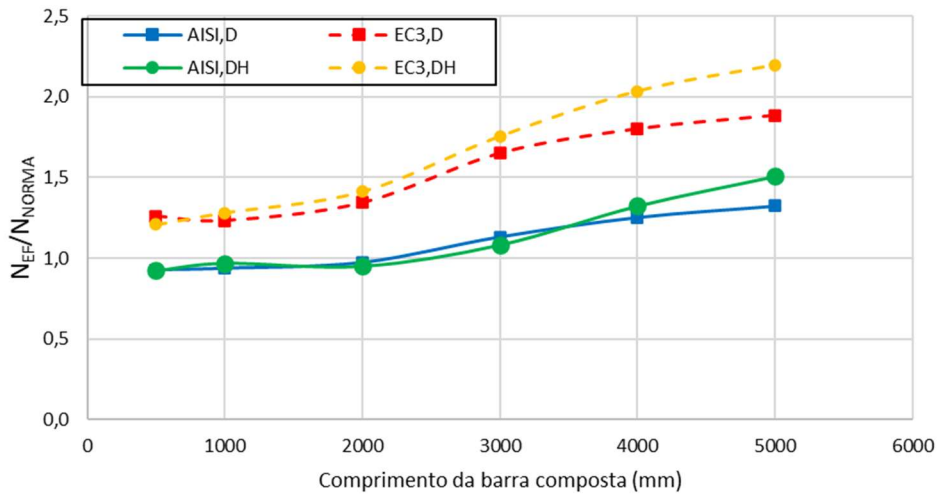
a) U100x50x2 – 2,5 cm entre perfis



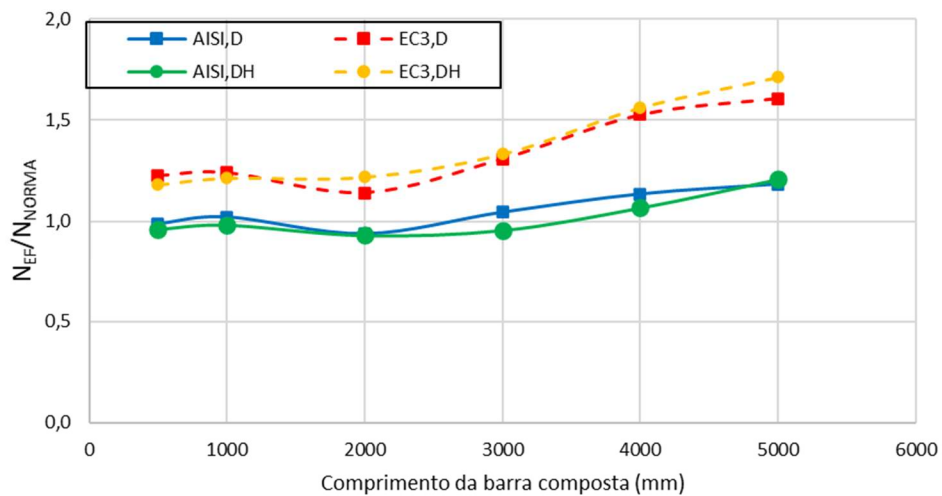
b) U100x50x2 – 5 cm entre perfis



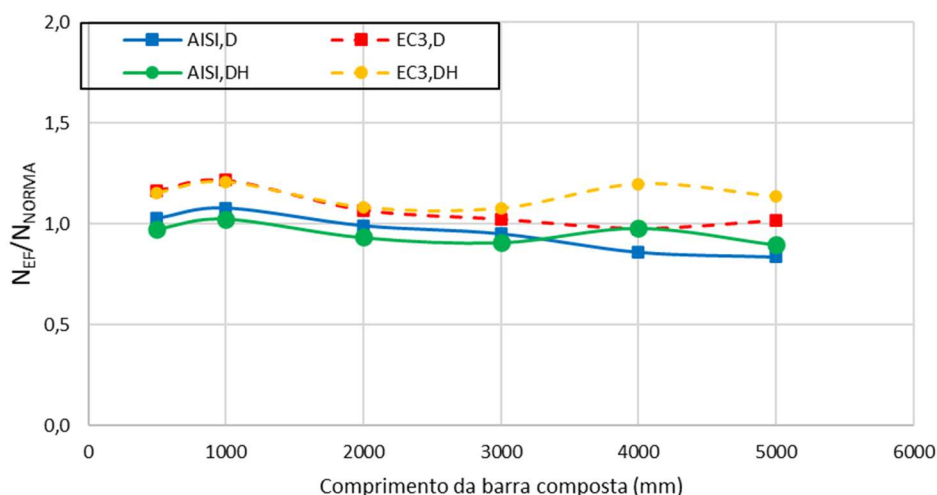
c) U100x50x2 – 20 cm entre perfis



d) U100x50x3,75 – 2,5 cm entre perfis



e) U100x50x3,75 – 5 cm entre perfis



f) U100x50x3,75 – 20 cm entre perfis

Fonte: Autor (2022)

Para os modelos cujos perfis têm 3,75 mm de espessura, a força resistente prevista segundo o Eurocode 3 (2006) foi inferior ao valor da modelagem numérica em praticamente todos os modelos; para um único caso isto não aconteceu. Em contrapartida, nos modelos com perfis de 2 mm, 61,1% dos modelos tiveram a força normal resistente normativa maior que a oriunda da modelagem numérica. Isto ocorreu sobretudo para perfis espaçados de 20 cm. Para modelos com 500 mm de comprimento, independentemente da espessura, 66,7% dos valores normativos superaram a força resistente oriunda da modelagem numérica. Contudo, os modelos com tal comprimento não possuem o travejamento mínimo exigido pelo Eurocode 3 (2006) que é de três módulos iguais.

No caso da norma ANSI/AISI S100 (2020), 58,3% dos valores previstos estavam acima dos obtidos nas modelagens numéricas, independentemente da espessura do perfil (2 mm ou 3,75 mm). Para perfis espaçados de 20 cm, o procedimento superestimou a força normal resistente para os modelos com 2 mm de espessura e de 75% daqueles com 3,75 mm.

Ao comparar os dois procedimentos normativos percebe-se que o Eurocode 3 (2006) apresenta valores menores que a ANSI/AISI S100 (2020) para todos os modelos com 3,75 mm de espessura. Em contrapartida, para os modelos com 2 mm de espessura, o Eurocode 3 (2006) apresentou valores menores nos modelos mais longos e para distâncias entre perfis foi de 2,5 e 5 cm; e valores maiores que a ANSI/AISI S100 (2020) para os perfis espaçados de 20 cm.

Os gráficos referentes aos modelos com 3,75 mm de espessura (Figuras 4-9d, 4-9e e 4-9f) apresentaram o mesmo comportamento. Quanto à espessura de 2 mm, não houve diferença significativa de comportamento para perfis afastados de 2,5 e 5 cm, porém, nos

perfis afastados de 20 cm houve mudança expressiva (Figura 4-9c). A mudança de comportamento é explicada pela predominância da instabilidade local, diferentemente do que ocorreu nos demais casos analisados.

4.2.2 Efeito do tipo de travejamento: travejamento treliçado e em quadro

Os valores de força normal resistente à compressão obtidos nas modelagens numéricas de barras com travejamento treliçado foram comparados àqueles dos modelos travejados em quadro. Para tal comparação foi adotada a distância longitudinal entre pontos de conexão dos travejamentos com os perfis, ou seja, o parâmetro a do Eurocode 3 (2006).

Em alguns casos o número de chapas separadoras horizontais dos modelos com travejamento em quadro não foi suficiente para igualar a distância a com as conexões treliçadas, principalmente para os maiores comprimentos. Porém, como houve uma tendência de estabilização da força normal resistente com o aumento do número de chapas horizontais, o tipo de travejamento parece não ter muita influência.

A Tabela 4-4 apresenta os valores de força normal resistente para modelos treliçados e com travejamento em quadro obtidos na análise numérica.

Tabela 4-4: Comparação da força normal resistente entre modelos treliçados e travejados em quadro

Conjunto	L_{barra}	$N_{T,D}$ (kN)	$N_{H,D}$ (kN)	$N_{T,D}/N_{H,D}$	$N_{T,DH}$ (kN)	$N_{H,DH}$ (kN)	$N_{T,DH}/N_{H,DH}$
100x50x2 2,5 cm	500	168,7	158,1	1,07	171,9	164,3	1,05
	1000	159,0	153,6	1,04	176,5	159,4	1,11
	2000	155,0	133,0	1,17	166,8	139,3	1,20
	3000	136,0	104,9	1,30	144,9	110,8	1,31
	4000	110,0	74,5	1,48	119,6	74,5	1,60
	5000	86,7	49,9	1,74	95,1	49,9	1,90
100x50x2 5 cm	500	166,8	171,8	0,97	169,0	167,8	1,01
	1000	158,9	156,9	1,01	168,7	161,5	1,04
	2000	156,9	164,4	0,95	167,7	151,0	1,11
	3000	145,1	129,9	1,12	152,4	136,4	1,12
	4000	126,9	110,4	1,15	137,1	110,4	1,24
	5000	100,2	79,7	1,26	109,8	79,7	1,38
100x50x2 20 cm	500	172,2	173,0	1,00	173,3	175,5	0,99
	1000	161,2	162,5	0,99	171,3	166,7	1,03
	2000	165,1	164,4	1,00	166,3	162,0	1,03
	3000	163,5	159,2	1,03	164,6	162,8	1,01
	4000	156,6	149,4	1,05	169,2	149,4	1,13
	5000	156,5	149,8	1,04	160,6	149,8	1,07

Continua...

...continuação da Tabela 4-4.

Conjunto	L_{barra}	$N_{T,D}$ (kN)	$N_{H,D}$ (kN)	$N_{T,D}/N_{H,D}$	$N_{T,DH}$ (kN)	$N_{H,DH}$ (kN)	$N_{T,DH}/N_{H,DH}$
100x50x3,75 2,5 cm	500	421,3	417,4	1,01	438,4	438,8	1,00
	1000	405,5	371,6	1,09	438,2	394,8	1,11
	2000	322,0	297,7	1,08	344,5	310,1	1,11
	3000	249,5	210,9	1,18	267,7	225,3	1,19
	4000	175,4	144,4	1,21	199,0	144,4	1,38
	5000	125,7	95,7	1,31	146,9	95,7	1,53
100x50x3,75 5 cm	500	453,4	455,5	1,00	459,4	451,0	1,02
	1000	456,0	396,3	1,15	456,9	442,7	1,03
	2000	357,4	321,5	1,11	385,4	336,7	1,14
	3000	314,8	275,1	1,14	322,2	293,3	1,10
	4000	266,2	220,8	1,21	273,3	220,8	1,24
	5000	203,6	153,9	1,32	217,4	153,9	1,41
100x50x3,75 20 cm	500	475,3	481,7	0,99	470,2	480,4	0,98
	1000	495,8	416,0	1,19	491,6	489,7	1,00
	2000	429,5	348,4	1,23	437,3	428,5	1,02
	3000	391,3	328,3	1,19	413,3	385,6	1,07
	4000	352,7	329,2	1,07	433,4	329,2	1,33
	5000	344,2	339,4	1,01	384,8	339,4	1,13

L_{barra} : comprimento da barra composta.

$N_{T,D}$: força normal resistente dos modelos numéricos travejados apenas por barras diagonais.

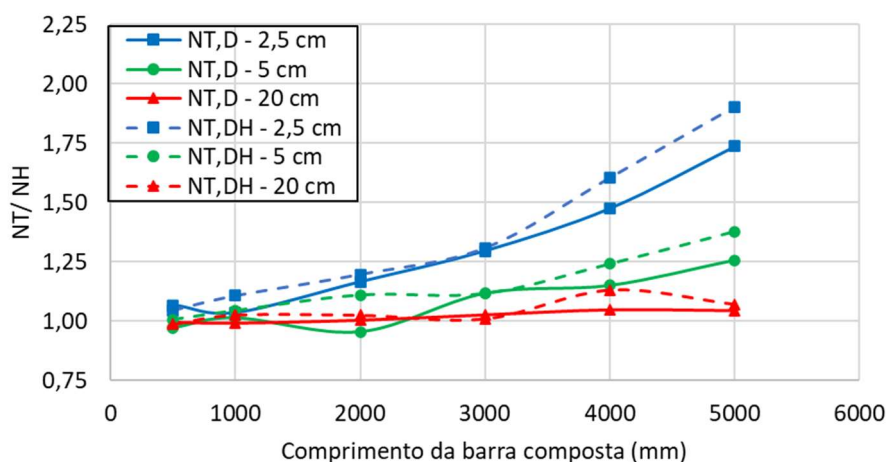
$N_{H,D}$: força normal resistente dos modelos numéricos travejados em quadro referentes aos modelos de barras diagonais de acordo com o parâmetro "a" do Eurocode 3 (2006).

$N_{T,DH}$: força normal resistente dos modelos numéricos travejados por barras diagonais e horizontais.

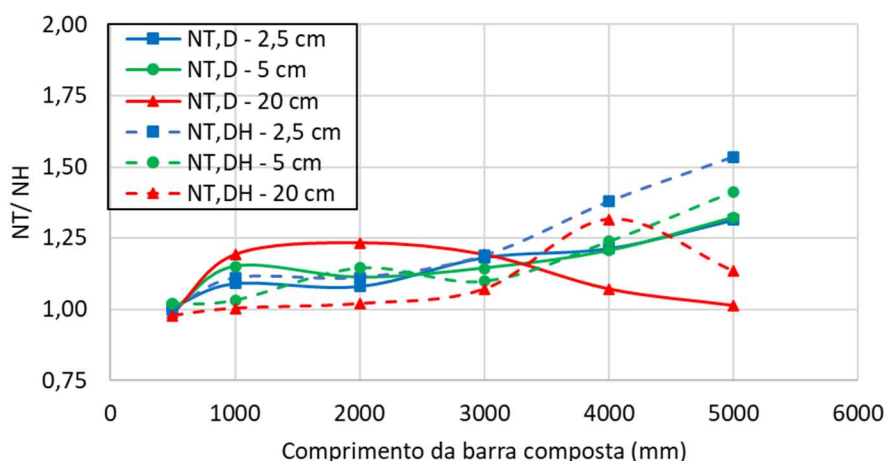
$N_{H,DH}$: força normal resistente dos modelos numéricos travejados em quadro referentes aos modelos de barras diagonais e horizontais de acordo com o parâmetro "a" do Eurocode 3 (2006).

Observa-se que, de modo geral, os modelos treliçados apresentaram maior força normal resistente, sendo o aumento mais evidente para barras mais esbeltas (esbeltez global). Os valores da Tabela 4-4 foram organizados em gráficos (Figura 4-10) a fim de facilitar a comparação da força normal resistente entre os modelos treliçados e de travejamento em quadro. Tanto nos gráficos quanto na Tabela, $N_{T,D}$ corresponde aos modelos treliçados apenas por chapas diagonais, $N_{T,DH}$ modelos com diagonais e horizontais e N_H modelos apenas com chapas separadoras horizontais.

Figura 4-10: Comparação da força normal resistente entre modelos treliçados e travejados em quadro



a) U100x50x2



b) U100x50x3,75

Fonte: Autor (2022)

Nas barras compostas com 500 mm de comprimento praticamente não houve aumento de força normal resistente. Dos doze casos analisados as maiores variações foram de 5% e 7%, ambas para os modelos com 2 mm de espessura e 2,5 cm entre perfis. As demais variações não ultrapassaram 2% para tal comprimento da barra composta.

A distância entre perfis teve pouca influência os maiores ganhos na força normal resistente ocorreram para modelos com 2,5 cm entre perfis, ou seja, quando este parâmetro aumenta a esbeltez global. Na análise comparativa dos doze modelos com 5000 mm de comprimento, o aumento da força resistente variou entre 31% e 90% quando a distância entre perfis foi de 2,5 cm, enquanto nos demais casos a variação ficou entre 1% e 41%.

Os modelos com espessura de 2 mm (Figura 4-10a) apresentaram comportamento semelhante para as diferentes distâncias entre perfis pois, de maneira geral, o travejamento

por chapas diagonais e horizontais é superior ao travejamento apenas por diagonais. Destaque deve ser dado aos modelos com 3,75 mm de espessura e 20 cm entre perfis pois alguns modelos travejados apenas por chapas diagonais, quando comparados com travejamento em quadro, foram superiores aos modelos com diagonais e horizontais sob mesma comparação.

Este comportamento diverso deve-se aos valores referentes ao travejamento em quadro apresentarem diferenças significativas para os comprimentos de 1000, 2000 e 3000 mm sendo, respectivamente 17,7%, 23% e 17,5%. Assim sendo, apesar dos modelos com diagonais e horizontais apresentaram força normal resistente muito próxima ou maior que para o travejamento apenas por diagonais, os resultados dos modelos com o travejamento em quadro contribuíram para a modificação do comportamento da curva referente a 3,75 mm de espessura e 20 cm entre perfis, face às demais curvas, nos comprimentos citados.

Assim, os resultados indicam que pode ser vantajoso a mudança do tipo de travejamento para arranjos que aumentem o índice de esbeltez global.

4.2.3 Comparação do consumo de aço entre modelos treliçados

Os modelos com travejamento treliçado possuem a mesma quantidade de diagonais para barras compostas de mesmo comprimento e distância entre perfis, ou seja, a diferença entre um modelo e outro reside apenas na inserção das chapas horizontais. Assim sendo, era esperado que a força normal resistente aumentasse com a adição de novas chapas. Porém, é interessante investigar se o acréscimo no consumo de aço é vantajoso. Para isso, na Tabela 4-5 são comparadas a força normal resistente e o consumo de aço nos modelos treliçados. São indicadas também as relações da força normal resistente pelo consumo de aço (N_{EF}/C).

Tabela 4-5: Comparação da força normal resistente (kN) e consumo de aço (kg) nos modelos com travejamento treliçado

Conjunto	L_{barra}	$N_{EF,D}$ (kN)	C_D (kg)	$N_{EF,D}/C_D$	$N_{EF,DH}$ (kN)	C_{DH} (kg)	$N_{EF,DH}/C_{DH}$
100x50x2 2,5 cm	500	168,7	3,3	51,35	171,9	3,4	50,80
	1000	159,0	6,6	24,20	176,5	6,9	25,71
	2000	155,0	13,1	11,79	166,8	13,8	12,06
	3000	136,0	19,7	6,90	144,9	20,8	6,97
	4000	110,0	26,3	4,18	119,6	27,7	4,31
	5000	86,7	32,9	2,64	95,1	34,7	2,74
100x50x2 5 cm	500	166,8	3,3	49,93	169,0	3,5	48,88
	1000	158,9	6,7	23,79	168,7	7,0	23,99
	2000	156,9	13,4	11,74	167,7	14,2	11,83
	3000	145,1	20,0	7,24	152,4	21,3	7,14
	4000	126,9	26,7	4,75	137,1	28,5	4,81
	5000	100,2	33,4	3,00	109,8	35,6	3,08

Continua...

...continuação da Tabela 4-5.

Conjunto	L_{barra}	$N_{\text{EF,D}}$ (kN)	C_D (kg)	$N_{\text{EF,D}}/C_D$	$N_{\text{EF,DH}}$ (kN)	C_{DH} (kg)	$N_{\text{EF,DH}}/C_{\text{DH}}$
100x50x2 20 cm	500	172,2	3,7	46,90	173,3	3,9	44,39
	1000	161,2	7,3	21,95	171,3	7,5	22,90
	2000	165,1	14,7	11,24	166,3	15,8	10,56
	3000	163,5	22,0	7,42	164,6	23,5	7,01
	4000	156,6	29,4	5,33	169,2	31,7	5,33
	5000	156,5	36,7	4,26	160,6	39,5	4,07
100x50x3,75 2,5 cm	500	421,3	6,0	70,30	438,4	6,2	70,99
	1000	405,5	12,0	33,83	438,2	12,5	34,96
	2000	322,0	24,0	13,43	344,5	25,2	13,64
	3000	249,5	36,0	6,94	267,7	38,0	7,05
	4000	175,4	47,9	3,66	199,0	50,7	3,93
	5000	125,7	59,9	2,10	146,9	63,4	2,32
100x50x3,75 20 cm	500	475,3	6,7	70,79	470,2	7,2	65,74
	1000	495,8	13,4	36,92	491,6	13,7	35,92
	2000	429,5	26,9	15,99	437,3	28,9	15,15
	3000	391,3	40,3	9,71	413,3	43,0	9,61
	4000	352,7	53,7	6,57	437,0	58,2	7,45
	5000	344,2	67,2	5,13	384,8	72,3	5,32

L_{barra} : comprimento da barra composta.

$N_{\text{EF,D}}$: força normal resistente dos modelos travejados apenas por barras diagonais.

$N_{\text{EF,DH}}$: força normal resistente dos modelos travejados por barras diagonais e horizontais.

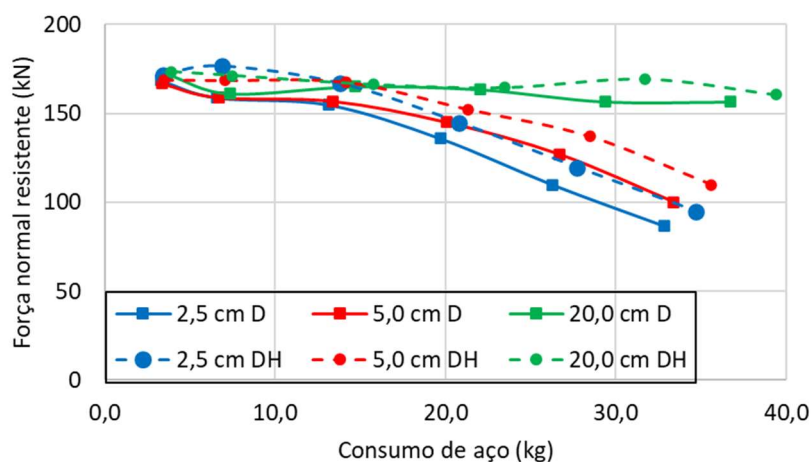
C_D : Consumo de aço dos modelos travejados apenas por barras diagonais.

C_{DH} : Consumo de aço dos modelos travejados por barras diagonais e horizontais.

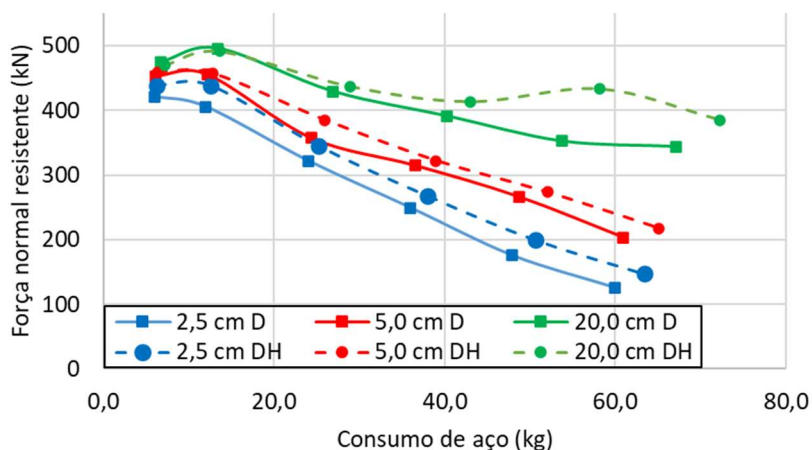
Observa-se que os valores das relações da força normal resistente pelo consumo de aço (N_{EF}/C) são muito próximos em praticamente todas as situações. Em apenas duas situações o aumento foi maior que 10% quando foram inseridas as chapas horizontais.

Com os dados da Tabela 4-5 foram elaborados dois gráficos (Figuras 4-11) que mostram a força resistente de compressão *versus* o consumo de aço dos modelos treliçados.

Figura 4-11: Força normal resistente (kN) pelo consumo de aço (kg) para os modelos treliçados



a) U100x50x2



b) U100x50x3,75

Fonte: Autor (2022)

Observa-se que o tipo de arranjo treliçado provocou pequenas alterações no consumo de aço e não produziu aumentos significativos na força normal resistente à compressão axial, principalmente para comprimentos menores (menor esbeltez global).

Contudo, é importante destacar que a escolha do tipo de travejamento tem influência não somente na força normal resistente e o consumo de aço, mas também no grau de dificuldade do processo de fabricação das barras compostas. Além disso, tanto do ponto de vista do desempenho estrutural à compressão quanto econômico, as barras compostas mais esbeltas apresentaram maior potencial para adoção de arranjos treliçados.

5. Conclusões

Este capítulo foi dividido em duas partes: conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo principal analisar a capacidade resistente à compressão de barras compostas. Assim, ao longo do trabalho foram desenvolvidas análises numéricas, via Método dos Elementos Finitos, para validação de modelos que permitissem a extrapolação para diferentes arranjos. Na sequência, análises paramétricas foram realizadas para investigar a influência de parâmetros geométricos e, por fim, avaliar a aplicabilidade de procedimentos normativos.

A seguir são apresentadas as principais conclusões deste estudo:

- Na etapa de validação dos modelos numéricos de barras compostas treliçadas utilizando os resultados experimentais de Bonab *et al.* (2013) foi identificada a influência significativa da magnitude das imperfeições geométricas iniciais para a representatividade das simulações numéricas.
- Modelos mais longos são mais sensíveis à inserção de chapas separadoras horizontais; em comparação com as barras isoladas, nas barras compostas a inserção de barras separadoras resulta em maior aumento da força normal resistente.
- O aumento do número de chapas separadoras horizontais não apresenta variação linear da força resistente à compressão, com uma tendência de estabilização.
- A distância entre perfis influencia diretamente no comportamento estrutural à instabilidade em torno do eixo de simetria entre os perfis, aumentando a força normal resistente e diminuindo a influência da instabilidade global por flexão.
- Para barras compostas travejadas em quadro, o Eurocode 3 (2006) apresentou valores menores de força resistente que a ANSI/AISI S100 (2020) na maioria dos casos.
- Para a menor distância entre perfis de 2,5 cm as previsões do Eurocode 3 (2006) subestimaram os resultados em 86,8% dos casos. Em contrapartida, os

valores previstos pelo ANSI/AISI S100 (2020) foram superestimados em 52,8% dos casos.

- Com o afastamento dos perfis, as forças resistentes previstas pelas duas normas se aproximaram entre si e dos valores numéricos, porém aumentou a incidência de resultados normativos superestimados.
- A aplicação das recomendações do Eurocode 3 (2006) aos modelos analisados resultou em forças resistentes menores que as obtidas nas simulações numéricas dos modelos treliçados com 3,75 mm de espessura. Porém, para 2 mm a maioria dos valores foi superestimada.
- Quanto à aplicação do procedimento do ANSI/AISI S100 (2020), a força normal resistente à compressão foi superestimada para a maioria das barras compostas treliçadas, sobretudo para aquelas com 2 mm de espessura.
- Mantendo a distância entre travejamentos conforme recomenda o Eurocode 3 (2006), os modelos treliçados apresentaram maior força resistente que os travejados em quadro, principalmente para os maiores comprimentos.
- O tipo de travejamento teve maior influência nos modelos de maior esbeltez global, ou seja, para maiores comprimentos e perfis mais próximos.

Apesar do volume considerável de resultados gerados pelo presente estudo, as diversas configurações geométricas possíveis para as barras compostas tornam necessários estudos complementares.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Diante da revisão de literatura realizada e dos resultados deste trabalho, a seguir são oferecidas algumas sugestões para novos estudos:

- Devido à escassez de estudos, indica-se realizar análises experimentais de barras compostas treliçadas com perfis formados a frio, principalmente para os arranjos mais comuns de dois perfis.
- Entre os parâmetros geométricos a serem estudados, sugere-se analisar perfis U e Ue com diferentes seções transversais: variando as larguras de alma e mesa e abrangendo uma gama maior de espessuras.

- Avaliar numericamente o comportamento estrutural dos arranjos contemplados por este trabalho sob compressão excêntrica e comparar os resultados da força normal resistente e modos de instabilidade.

Referências bibliográficas

Almeida, S. J. C. (2007). **Análise numérica de perfis de aço formados a frio comprimidos considerando imperfeições geométricas iniciais**. São Carlos. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **ANSI/AISI S100**: North American Specification for the design of cold-formed steel structural members. Washington, D.C., 2020.

ANSYS. **Structural nonlinearities**. v.13.0, Houston, USA, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010). **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço contínuas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

Bastos, C. C. D. O. “**Estabilidade Estrutural de Colunas Treliçadas Espaciais Constituídas de Perfis de Aço Formados a Frio**”. Tese de doutorado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Rio de Janeiro. 2019.

Bonab, A. P; Hashemi, B. H; Hosseini, M. Experimental evaluation of the elastic buckling and compressive capacity of laced columns. **Journal of Constructional Steel Research**. 86:66-73. 2013.

Chodraui, G. M. B; Shifferaw, Y; Malite, M; Schafer, B. W. **Cold-formed steel angles under axial compression**. 18th International Speciality Conference on Cold-Formed Steel Structures. University of Missouri-Rolla. Orlando. EUA. 2006.

Dabaon, M; Ellobody, E, Ramzy, K. Experimental investigation of built-up cold-formed steel section battened columns. **Journal of Constructional Steel Research**. 2015a.

Dabaon, M; Ellobody, E, Ramzy, K. Nonlinear behavior of built-up cold-formed steel section battened columns. **Journal of Constructional Steel Research**. 2015b.

Dar, M. A.; Sahoo, D. R.; Jain, A. K. Axial compression behavior of laced cold-formed steel built-up columns with unstiffened angle sections. **Journal of Constructional Steel Research**. 2019.

Dar, M. A.; Sahoo, D. R.; Jain, D. K.; Sharma, S. Monotonic tests and numerical validation of cold-formed steel battened built-up columns. **Thin-Walled Structures**. 2021.

DLUBAL SOFTWARE GMBH. **Design Cold-Formed Steel According to EN 1993-1-3 with Dlubal Software**. 2020. Disponível em: <https://www.dlubal.com/en/support-and-learning/learning/videos/001246#gallery-ss>. Acesso em: 27 jun. 2020.

Eurocode 3: **Design of Steel Structures. Part 1.1: General structural rules**. Brussels: CEN-European Committee for Standardisation. [EN1993–1–1]. 2006.

Kalochairetis, K. E; Gantes, C. J. Numerical and analytical investigation of collapse loads of laced built-up columns. **Computers and Structures**. 2011.

Maia, W. F; Vieira Jr, L. C. M; Schafer, B. W; Malite, M. Experimental and numerical investigation of cold-formed steel double angle members under compression. **Journal of Constructional Steel Research**. 2016.

Muthuraman, M; Anuradha, R; Awoyera, P. P; Gobinath, R. Numerical simulation and specification provisions for buckling characteristics of a built-up steel column sections subjected to axial loading. **Engineering Structures**. 2020

Rocha, M. S; Maia, W. F. “**Estudo do comportamento de perfis de aço formados a frio em seção duplo “u” costa a costa submetidos à compressão**”. São Paulo EXPO; Cidade: São Paulo; 8º Construmetal, ABCEM – Associação Brasileira da Construção Metálica. 2019.

Schafer, B. W; Peköz, T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. **Journal of Constructional Steel Research**. 1998.

Vijayanand, S.; Anbarasu, M. Behavior of CFS built-up battened columns: Parametric study and design recommendations. **Structural Engineering and Mechanics**. 2021.

Vijayanand, S.; Anbarasu, M. Strength and behavior of cold-formed steel built-up battened columns: tests and numerical validation. **Journal of Structural Engineering**. 2020.

Apêndice A: Tabelas de resultados

Este apêndice é dedicado a apresentar as tabelas de resultados das simulações realizadas no presente estudo, nas quais são indicados os parâmetros analisados, os resultados obtidos quanto à carga crítica de colapso, os modos de instabilidade identificados e as relações comparativas.

As Tabelas A-1 a A-6 representam os resultados das simulações dos modelos com travejamento em quadro, enquanto que as Tabelas A-7 e A-8 são referentes aos modelos com travejamento treliçado.

Tabela A-1: Comparação entre os resultados para travejamento em quadro das análises numéricas e os obtidos pelos procedimentos normativos (Seção 2U 100x50x2 com 2,5 cm entre perfis)

L_{barra} (mm) (λ_y)	N_{CH}	a (mm)	a/r_i	N_{EF} (kN)	Modo de instabilidade	Variação (%)	N_{AISI} (kN)	$N_{\text{EF}}/N_{\text{AISI}}$	N_{EC3} (kN)	$N_{\text{EF}}/N_{\text{EC3}}$
500 ($\lambda_y=16,47$)	0	500	32	158,1	L + F	-	179,7	0,88	202,5	0,78
	1	250	16	164,3	L + F	3,92	185,6	0,89	225,4	0,73
	2	167	11	170,4	L + F	7,81	186,5	0,91	236,3	0,72
	3	125	8	177,0	L + F	11,98	186,8	0,95	239,9	0,74
1000 ($\lambda_y=32,94$)	0	1000	63	154,6	L + F	-	138,8	1,11	135,6	1,14
	1	500	32	153,6	L + F	-0,63	173,3	0,89	181,7	0,85
	2	333	21	158,5	L + F	2,52	177,3	0,89	199,8	0,79
	3	250	16	159,4	L + F	3,13	178,7	0,89	205,7	0,78
2000 ($\lambda_y=65,88$)	4	200	13	163,0	L + F	5,47	179,3	0,91	208,4	0,78
	0	2000	126	125,4	L + F	-	50,95	2,46	55,4	2,26
	1	1000	63	130,7	L + F	4,25	129,6	1,01	97,3	1,34
	2	667	42	133,0	L + F	6,03	143,5	0,93	119,2	1,12
3000 ($\lambda_y=98,82$)	3	500	32	140,0	L + F	11,64	148,5	0,94	128,0	1,09
	4	400	25	139,3	L + F	11,12	150,8	0,92	132,3	1,05
	0	3000	189	79,0	F + L	-	22,35	3,53	27,5	2,88
	1	1500	95	85,5	L + F	8,24	73,89	1,16	53,5	1,60
4000 ($\lambda_y=131,75$)	2	1000	63	100	L + F	26,54	96,01	1,04	67,5	1,48
	3	750	47	104,9	L + F	32,81	106,3	0,99	73,7	1,42
	4	600	38	109,0	L + F	37,96	111,2	0,98	76,8	1,42
	5	500	32	110,8	L + F	40,19	113,6	0,97	78,6	1,41
4000 ($\lambda_y=131,75$)	0	4000	253	43,7	F + L	-	12,49	3,50	16,1	2,71
	1	2000	126	52,8	F + L	20,75	43,25	1,22	33,1	1,60
	2	1333	84	63,8	F + L	46,03	58,18	1,10	41,7	1,53
	3	1000	63	69,4	F + L	58,92	65,28	1,06	45,7	1,52
	4	800	51	72,4	F + L	65,68	69,16	1,05	47,8	1,51
5	667	42	74,5	F + L	70,56	71,45	1,04	49,1	1,52	

Continua...

...continuação da Tabela A-1

L_{barra} (mm) (λy)	N_{CH}	a (mm)	a/r_i	N_{EF} (kN)	Modo de instabilidade	Varição (%)	N_{AISI} (kN)	$N_{\text{EF}}/N_{\text{AISI}}$	N_{EC3} (kN)	$N_{\text{EF}}/N_{\text{EC3}}$
5000 ($\lambda y=164,69$)	0	5000	316	26,8	F + L	-	7,96	3,37	10,6	2,54
	1	2500	158	34,3	F + L	27,99	27,55	1,25	22,2	1,55
	2	1667	105	42,4	F + L	58,36	37,47	1,13	27,9	1,52
	3	1250	79	46,3	F + L	72,80	42,81	1,08	30,7	1,51
	4	1000	63	48,9	F + L	82,64	45,79	1,07	32,3	1,52
5	833	53	49,9	L + F	86,36	47,58	1,05	33,1	1,51	

L: comprimento da barra composta.

 λy : esbelteza da barra em relação ao eixo que mobiliza as conexões. N_{CH} : número de chapas separadoras.

A: comprimento destravado da barra ou distância entre as chapas separadoras.

 r_i : raio de giração mínimo da barra individual. N_{EF} : força normal resistente obtida na análise numérica.

L: instabilidade local e F é instabilidade por flexão.

"Varição": percentagem de variação da força normal resistente em relação à barra sem chapas.

 N_{AISI} : força normal resistente obtida com base na ANSI/AISI S100 (2020). N_{EC3} : força normal resistente obtida com base no Eurocode 3 (2006).

Tabela A-2: Comparação entre os resultados para travejamento em quadro das análises numéricas e os obtidos pelos procedimentos normativos (Seção 2U 100x50x2 com 5 cm entre perfis)

L_{barra} (mm) (λy)	N_{CH}	a (mm)	a/r_i	N_{EF} (kN)	Modo de instabilidade	Varição (%)	N_{AISI} (kN)	$N_{\text{EF}}/N_{\text{AISI}}$	N_{EC3} (kN)	$N_{\text{EF}}/N_{\text{EC3}}$
500 ($\lambda y=12,04$)	0	500	32	171,8	L + F	-	181,3	0,95	199,2	0,86
	1	250	16	167,8	L + F	-2,33	186,7	0,90	226,0	0,74
	2	167	11	173,4	L + F	0,91	187,6	0,92	241,6	0,72
	3	125	8	183,6	L + F	6,85	187,9	0,98	247,2	0,74
1000 ($\lambda y=24,07$)	0	1000	63	158,7	L + F	-	143,9	1,10	136,2	1,17
	1	500	32	156,9	L + F	-1,14	177,5	0,88	189,3	0,83
	2	333	21	160,9	L + F	1,36	181,6	0,89	214,2	0,75
	3	250	16	161,5	L + F	1,77	182,9	0,88	222,7	0,73
	4	200	13	164,6	L + F	3,72	183,5	0,90	226,6	0,73
5	167	11	164,6	L + F	3,73	183,8	0,90	228,8	0,72	
2000 ($\lambda y=48,15$)	0	2000	126	145,5	L + F	-	56,84	2,56	59,3	2,46
	1	1000	63	142,6	L + F	-1,97	143,1	1,00	115,8	1,23
	2	667	42	151,6	L + F	4,18	158,2	0,96	153,1	0,99
	3	500	32	152,7	L + F	4,92	163,6	0,93	168,2	0,91
	4	400	25	156,6	L + F	7,63	166	0,94	175,4	0,89
5	333	21	151,0	L + F	3,80	167,4	0,90	179,4	0,84	
3000 ($\lambda y=72,22$)	0	3000	189	97,0	F + L	-	24,89	3,90	31,3	3,10
	1	1500	95	101,8	F + L	4,98	94,56	1,08	69,1	1,47
	2	1000	63	122,3	F + L	26,04	124,1	0,99	99,0	1,24
	3	750	47	129,9	F + L	33,88	134,6	0,96	114,1	1,14
	4	600	38	133,2	F + L	37,30	139,6	0,95	122,1	1,09
5	500	32	136,4	F + L	40,67	142,4	0,96	126,9	1,08	

Continua...

...continuação da Tabela A-2

L_{barra} (mm) (λy)	N_{CH}	a (mm)	a/ri	N_{EF} (kN)	Modo de instabilidade	Varição (%)	N_{AISI} (kN)	$N_{\text{EF}}/N_{\text{AISI}}$	N_{EC3} (kN)	$N_{\text{EF}}/N_{\text{EC3}}$
4000 ($\lambda y=96,3$)	0	4000	253	55,3	F + L	-	13,9	3,98	18,7	2,95
	1	2000	126	65,3	F + L	18,17	57,1	1,14	44,6	1,47
	2	1333	84	88,0	F + L	59,15	83,01	1,06	65,2	1,35
	3	1000	63	100,8	F + L	82,22	99,03	1,02	76,6	1,32
	4	800	51	105,2	F + L	90,31	107,6	0,98	83,1	1,27
5000 ($\lambda y=120,37$)	5	667	42	110,4	F + L	99,58	112,3	0,98	87,0	1,27
	0	5000	316	34,0	F + L	-	8,856	3,84	12,3	2,76
	1	2500	158	43,1	F + L	26,76	36,6	1,18	30,9	1,40
	2	1667	105	60,3	F + L	77,47	56,15	1,07	45,4	1,33
	3	1250	79	70,4	F + L	107,14	67,27	1,05	53,4	1,32
	4	1000	63	75,7	F + L	122,59	74,09	1,02	58,2	1,30
	5	833	53	79,7	L + F	134,39	78,39	1,02	61,2	1,30

L: comprimento da barra composta.

 λy : esbelteza da barra em relação ao eixo que mobiliza as conexões. N_{CH} : número de chapas separadoras.

A: comprimento destravado da barra ou distância entre as chapas separadoras.

ri: raio de giração mínimo da barra individual.

 N_{EF} : força normal resistente obtida na análise numérica.

L: instabilidade local e F é instabilidade por flexão.

"Varição": porcentagem de variação da força normal resistente em relação à barra sem chapas.

 N_{AISI} : força normal resistente obtida com base na ANSI/AISI S100 (2020). N_{EC3} : força normal resistente obtida com base no Eurocode 3 (2006).

Tabela A-3: Comparação entre os resultados para travejamento em quadro das análises numéricas e os obtidos pelos procedimentos normativos (Seção 2U 100x50x2 com 20 cm entre perfis)

L_{barra} (mm) (λy)	N_{CH}	a (mm)	a/ri	N_{EF} (kN)	Modo de instabilidade	Varição (%)	N_{AISI} (kN)	$N_{\text{EF}}/N_{\text{AISI}}$	N_{EC3} (kN)	$N_{\text{EF}}/N_{\text{EC3}}$
500 ($\lambda y=4,37$)	0	500	32	173,0	L + F	-	183	0,95	162,4	1,07
	1	250	16	175,5	L + F	1,43	187,8	0,93	203,1	0,86
	2	167	11	176,5	L + F	2,05	188,7	0,94	233,5	0,76
	3	125	8	180,4	L + F	4,30	188,9	0,95	245,0	0,74
1000 ($\lambda y=8,73$)	0	1000	63	163,4	L + F	-	149,2	1,10	100,8	1,62
	1	500	32	162,5	L + F	-0,55	181,7	0,89	161,5	1,01
	2	333	21	159,1	L + F	-2,64	185,9	0,86	210,6	0,76
	3	250	16	166,7	L + F	2,05	187,3	0,89	228,5	0,73
2000 ($\lambda y=17,47$)	4	200	13	167,9	L + F	2,73	187,9	0,89	237,7	0,71
	0	2000	126	155,3	L + F	-	64,23	2,42	46,5	3,34
	1	1000	63	154,6	L + F	-0,45	157,6	0,98	99,2	1,56
	2	667	42	164,4	L + F	5,88	173,9	0,95	165,8	0,99
	3	500	32	161,6	L + F	4,06	179,8	0,90	196,6	0,82
	4	400	25	162,0	L + F	4,34	182,5	0,89	212,1	0,76

Continua...

...continuação da Tabela A-3.

L_{barra} (mm) (λy)	N_{CH}	a (mm)	a/r_i	N_{EF} (kN)	Modo de instabili- dade	Varição (%)	N_{AISI} (kN)	$N_{\text{EF}}/$ N_{AISI}	N_{EC3} (kN)	$N_{\text{EF}}/$ N_{EC3}
3000 ($\lambda y=26,20$)	0	3000	189	121,7	F + L	-	28,08	4,33	26,6	4,57
	1	1500	95	125,9	F + L	3,49	122,5	1,03	64,6	1,95
	2	1000	63	153,3	L + F	25,94	154,8	0,99	124,1	1,24
	3	750	47	159,2	L + F	30,84	167,3	0,95	162,8	0,98
	4	600	38	160,2	L + F	31,62	173,3	0,92	184,9	0,87
	5	500	32	162,8	L + F	33,74	176,6	0,92	198,0	0,82
4000 ($\lambda y=34,93$)	0	4000	253	75,1	F + L	-	15,66	4,79	17,3	4,34
	1	2000	126	81,6	F + L	8,71	80,64	1,01	45,2	1,81
	2	1333	84	123,0	L + F	63,74	130,6	0,94	92,1	1,34
	3	1000	63	140,4	L + F	86,99	150,9	0,93	130,3	1,08
	4	800	51	146,6	L + F	95,21	161	0,91	156,2	0,94
	5	667	42	149,4	L + F	98,90	166,6	0,90	172,9	0,86
5000 ($\lambda y=43,67$)	0	5000	316	48,1	F + L	-	9,974	4,83	12,1	3,96
	1	2500	158	55,5	F + L	15,36	54,36	1,02	33,4	1,66
	2	1667	105	94,7	L + F	96,84	102,4	0,93	69,7	1,36
	3	1250	79	122,7	L + F	155,19	131,5	0,93	103,1	1,19
	4	1000	63	133,6	L + F	177,82	146	0,92	129,0	1,04
	5	833	53	141,4	L + F	193,89	154,3	0,92	147,5	0,96
	6	714	45	147,8	L + F	207,20	159,4	0,93	160,3	0,92
7	625	39	149,8	L + F	211,51	162,8	0,92	169,4	0,88	

L: comprimento da barra composta.

λy : esbeltez da barra em relação ao eixo que mobiliza as conexões.

N_{CH} : número de chapas separadoras.

A: comprimento destravado da barra ou distância entre as chapas separadoras.

r_i : raio de giração mínimo da barra individual.

N_{EF} : força normal resistente obtida na análise numérica.

L: instabilidade local e F é instabilidade por flexão.

“Varição”: porcentagem de variação da força normal resistente em relação à barra sem chapas.

N_{AISI} : força normal resistente obtida com base na ANSI/AISI S100 (2020).

N_{EC3} : força normal resistente obtida com base no Eurocode 3 (2006).

Tabela A-4: Comparação entre os resultados para travejamento em quadro das análises numéricas e os obtidos pelos procedimentos normativos (Seção 2U 100x50x3,75 com 2,5 cm entre perfis)

L_{barra} (mm) (λy)	N_{CH}	a (mm)	a/r_i	N_{EF} (kN)	Modo de instabili- dade	Varição (%)	N_{AISI} (kN)	$N_{\text{EF}}/$ N_{AISI}	N_{EC3} (kN)	$N_{\text{EF}}/$ N_{EC3}
500 ($\lambda y=16,17$)	0	500	32	417,4	L + F	-	454,5	0,92	337,1	1,24
	1	250	16	438,8	L + F	5,13	474,3	0,93	372,7	1,18
	2	167	11	457,3	L + F	9,56	477,5	0,96	389,8	1,17
	3	125	8	457,6	L + F	9,62	478,5	0,96	395,5	1,16

Continua...

...continuação da Tabela A-4.

L _{barra} (mm) (λ_y)	N _{CH}	a (mm)	a/r _i	N _{EF} (kN)	Modo de instabili- dade	Varição (%)	N _{AISI} (kN)	N _{EF} / N _{AISI}	N _{EC3} (kN)	N _{EF} / N _{EC3}
1000 ($\lambda_y=32,35$)	0	1000	64	349,1	F + L	-	349,3	1,00	233,5	1,49
	1	500	32	371,6	F + L	6,44	432,9	0,86	307,2	1,21
	2	333	21	388,6	F + L	11,32	446,8	0,87	335,4	1,16
	3	250	16	394,8	F + L	13,09	451,5	0,87	344,6	1,15
	4	200	13	402,5	F + L	15,31	453,6	0,89	348,8	1,15
	5	167	11	406,0	F + L	16,28	454,6	0,89	351,1	1,16
2000 ($\lambda_y=64,70$)	0	2000	128	277,8	F + L	-	126,8	2,19	98,6	2,82
	1	1000	64	274,9	F + L	-1,03	283,7	0,97	173,6	1,58
	2	667	43	297,7	F + L	7,18	331,0	0,90	212,1	1,40
	3	500	32	305,9	F + L	10,11	348,9	0,88	227,3	1,35
	4	400	26	310,1	F + L	11,63	357,2	0,87	234,6	1,32
3000 ($\lambda_y=97,04$)	0	3000	193	147,3	F + L	-	55,6	2,65	49,1	3,00
	1	1500	96	162,1	F + L	10,06	141,6	1,14	97,5	1,66
	2	1000	64	195,7	F + L	32,83	195,0	1,00	124,0	1,58
	3	750	48	210,9	F + L	43,20	220,3	0,96	135,7	1,55
	4	600	39	219,9	F + L	49,29	232,9	0,94	141,6	1,55
	5	500	32	225,3	F + L	52,95	239,9	0,94	145,1	1,55
4000 ($\lambda_y=129,39$)	0	4000	257	80,0	F + L	-	31,1	2,58	28,9	2,77
	1	2000	128	97,4	F + L	21,79	79,0	1,23	60,8	1,60
	2	1333	86	121,1	F + L	51,31	108,8	1,11	77,3	1,57
	3	1000	64	132,8	F + L	66,04	125,2	1,06	85,2	1,56
	4	800	51	139,9	F + L	74,81	134,4	1,04	89,4	1,56
	5	667	43	144,4	F + L	80,55	139,9	1,03	91,9	1,57
5000 ($\lambda_y=161,74$)	0	5000	321	48,8	F + L	-	19,8	2,47	19,0	2,57
	1	2500	160	63,0	F + L	29,19	50,3	1,25	40,8	1,54
	2	1667	107	79,3	F + L	62,55	69,3	1,14	52,1	1,52
	3	1250	80	87,8	F + L	79,87	79,8	1,10	57,7	1,52
	4	1000	64	92,7	F + L	89,87	85,7	1,08	60,7	1,53
	5	833	53	95,7	F + L	96,04	89,3	1,07	62,5	1,53

L: comprimento da barra composta.

 λ_y : esbeltez da barra em relação ao eixo que mobiliza as conexões.N_{CH}: número de chapas separadoras.

A: comprimento destravado da barra ou distância entre as chapas separadoras.

r_i: raio de giração mínimo da barra individual.N_{EF}: força normal resistente obtida na análise numérica.

L: instabilidade local e F é instabilidade por flexão.

"Variação": porcentagem de variação da força normal resistente em relação à barra sem chapas.

N_{AISI}: força normal resistente obtida com base na ANSI/AISI S100 (2020).N_{EC3}: força normal resistente obtida com base no Eurocode 3 (2006).

Tabela A-5: Comparação entre os resultados para travejamento em quadro das análises numéricas e os obtidos pelos procedimentos normativos (Seção 2U 100x50x3,75 com 5 cm entre perfis)

L_{barra} (mm) (λ_y)	N_{CH}	a (mm)	a/r_i	N_{EF} (kN)	Modo de instabilidade	Variação (%)	N_{AISI} (kN)	$N_{\text{EF}}/N_{\text{AISI}}$	N_{EC3} (kN)	$N_{\text{EF}}/N_{\text{EC3}}$
500 ($\lambda_y=11,85$)	0	500	32	455,5	L + F	-	458,5	0,99	331,9	1,37
	1	250	16	451,0	L + F	-1,00	477,9	0,94	373,2	1,21
	2	167	11	471,1	L + F	3,42	481,1	0,98	397,2	1,19
	3	125	8	479,5	L + F	5,27	482,1	0,99	406,0	1,18
1000 ($\lambda_y=23,71$)	0	1000	64	408,3	F + L	-	361,7	1,13	233,7	1,75
	1	500	32	396,3	F + L	-2,94	446,3	0,89	317,5	1,25
	2	333	21	454,6	L + F	11,35	460,6	0,99	355,7	1,28
	3	250	16	442,7	L + F	8,44	465,4	0,95	368,8	1,20
	4	200	13	458,8	L + F	12,37	467,5	0,98	374,9	1,22
2000 ($\lambda_y=47,41$)	5	167	11	467,3	L + F	14,44	468,6	1,00	378,3	1,24
	0	2000	128	308,9	F + L	-	140,4	2,20	104,5	2,95
	1	1000	64	295,4	F + L	-4,38	325,8	0,91	202,1	1,46
	2	667	43	321,5	F + L	4,07	380,2	0,85	263,0	1,22
	3	500	32	328,5	F + L	6,34	400,8	0,82	287,0	1,14
3000 ($\lambda_y=71,12$)	4	400	26	333,5	F + L	7,98	409,7	0,81	298,4	1,12
	5	333	21	336,7	F + L	9,00	414,2	0,81	304,7	1,11
	0	3000	193	184,7	F + L	-	61,5	3,00	55,6	3,32
	1	1500	96	193,4	F + L	4,70	186,5	1,04	123,1	1,57
	2	1000	64	251,2	F + L	35,99	266,4	0,94	175,6	1,43
4000 ($\lambda_y=94,83$)	3	750	48	275,1	F + L	48,93	301,0	0,91	201,7	1,36
	4	600	39	286,7	F + L	55,23	318,1	0,90	215,6	1,33
	5	500	32	293,3	F + L	58,80	327,7	0,90	223,6	1,31
	0	4000	253	100,9	F + L	-	34,3	2,94	33,1	3,05
	1	2000	126	119,1	F + L	0,03	103,8	1,15	80,0	1,49
5000 ($\lambda_y=118,53$)	2	1333	84	166,8	F + L	40,01	162,2	1,03	117,5	1,42
	3	1000	63	194,0	F + L	62,91	201,0	0,97	138,3	1,40
	4	800	51	210,2	F + L	76,47	222,2	0,95	150,0	1,40
	5	667	42	220,8	F + L	85,37	234,5	0,94	157,0	1,41
	0	5000	316	61,4	F + L	-	21,9	2,81	21,8	2,82
5000 ($\lambda_y=118,53$)	1	2500	158	78,3	F + L	27,56	66,0	1,19	55,6	1,41
	2	1667	105	112,3	F + L	82,88	103,1	1,09	82,2	1,37
	3	1250	79	132,8	F + L	116,37	128,1	1,04	97,2	1,37
	4	1000	63	145,7	F + L	137,24	144,1	1,01	106,2	1,37
	5	833	53	153,9	F + L	150,66	154,4	1,00	111,8	1,38

L: comprimento da barra composta.

λ_y : esbelteza da barra em relação ao eixo que mobiliza as conexões.

N_{CH} : número de chapas separadoras.

A: comprimento destravado da barra ou distância entre as chapas separadoras.

r_i : raio de giração mínimo da barra individual.

N_{EF} : força normal resistente obtida na análise numérica.

L: instabilidade local e F é instabilidade por flexão.

"Variação": porcentagem de variação da força normal resistente em relação à barra sem chapas.

N_{AISI} : força normal resistente obtida com base na ANSI/AISI S100 (2020).

N_{EC3} : força normal resistente obtida com base no Eurocode 3 (2006).

Tabela A-6: Comparação entre os resultados para travejamento em quadro das análises numéricas e os obtidos pelos procedimentos normativos (Seção 2U 100x50x3,75 com 20 cm entre perfis)

L_{barra} (mm) (λy)	N_{CH}	a (mm)	a/r_i	N_{EF} (kN)	Modo de instabilidade	Variação (%)	N_{AISI} (kN)	$N_{\text{EF}}/N_{\text{AISI}}$	N_{EC3} (kN)	$N_{\text{EF}}/N_{\text{EC3}}$
500 ($\lambda y=4,37$)	0	500	32	481,7	L + F	-	462,5	1,04	277,2	1,74
	1	250	16	480,4	L + F	-0,27	481,5	1,00	339,1	1,42
	2	167	11	483,7	L + F	0,42	484,8	1,00	384,9	1,26
	3	125	8	488,5	L + F	1,41	485,8	1,01	402,5	1,21
1000 ($\lambda y=8,73$)	0	1000	64	392,4	F + L	-	374,5	1,05	177,6	2,21
	1	500	32	416,0	F + L	6,02	460,1	0,90	275,9	1,51
	2	333	21	477,8	L + F	21,76	474,9	1,01	350,1	1,36
	3	250	16	489,7	L + F	24,79	479,8	1,02	377,1	1,30
	4	200	13	489,7	L + F	24,81	482,0	1,02	391,2	1,25
2000 ($\lambda y=17,47$)	5	167	11	488,7	L + F	24,54	483,1	1,01	399,9	1,22
	0	2000	128	307,3	F + L	-	157,5	1,95	83,0	3,70
	1	1000	64	316,4	F + L	2,95	374,6	0,84	175,0	1,81
	2	667	43	348,4	F + L	13,39	433,2	0,80	281,5	1,24
	3	500	32	386,1	F + L	25,64	453,6	0,85	328,3	1,18
	4	400	26	400,5	L + F	30,34	463,1	0,86	351,9	1,14
	5	333	21	428,5	L + F	39,45	468,2	0,92	365,8	1,17
3000 ($\lambda y=26,20$)	6	286	18	432,1	L + F	40,63	471,2	0,92	374,8	1,15
	7	250	16	436,2	L + F	41,93	473,1	0,92	381,1	1,14
	0	3000	193	218,8	F + L	-	68,9	3,18	47,6	4,60
	1	1500	96	232,2	F + L	6,14	255,7	0,91	115,1	2,02
	2	1000	64	304,2	F + L	39,02	364,6	0,83	215,0	1,41
	3	750	48	328,3	F + L	50,06	411,1	0,80	276,3	1,19
	4	600	39	348,6	L + F	59,34	431,6	0,81	310,3	1,12
	5	500	32	368,2	L + F	68,29	443,0	0,83	330,3	1,11
4000 ($\lambda y=34,93$)	6	429	28	381,2	L + F	74,22	449,9	0,85	343,1	1,11
	7	375	24	385,6	L + F	76,24	454,3	0,85	351,8	1,10
	0	4000	257	134,9	F + L	-	38,4	3,51	30,8	4,37
	1	2000	128	149,0	F + L	10,46	151,6	0,98	80,7	1,85
	2	1333	86	239,6	F + L	77,62	281,7	0,85	161,6	1,48
	3	1000	64	291,4	F + L	115,98	351,1	0,83	224,8	1,30
	4	800	51	315,5	F + L	133,85	388,2	0,81	266,0	1,19
	5	667	43	329,2	F + L	144,02	409,1	0,80	291,9	1,13
	6	571	37	337,5	F + L	150,22	420,9	0,80	308,8	1,09
7	500	32	343,8	F + L	154,84	428,5	0,80	320,4	1,07	
8	444	29	348,1	F + L	158,01	433,8	0,80	328,6	1,06	
9	400	26	350,5	F + L	159,83	437,5	0,80	334,6	1,05	

Continua...

...continuação da Tabela A-6

L_{barra} (mm) (λ_y)	N_{CH}	a (mm)	a/r_i	N_{EF} (kN)	Modo de instabili- dade	Varição (%)	N_{AISI} (kN)	$N_{\text{EF}}/$ N_{AISI}	N_{EC3} (kN)	$N_{\text{EF}}/$ N_{EC3}
5000 ($\lambda_y=43,67$)	0	5000	321	84,9	F + L	-	24,5	3,47	21,6	3,93
	1	2500	160	99,4	F + L	17,14	96,1	1,04	59,7	1,67
	2	1667	107	175,7	F + L	106,96	201,7	0,87	123,1	1,43
	3	1250	80	236,1	F + L	178,03	285,3	0,83	179,9	1,31
	4	1000	64	274,3	F + L	223,14	334,4	0,82	222,6	1,23
	5	833	53	300,2	F + L	253,58	364,2	0,82	252,3	1,19
	6	714	46	316,6	F + L	272,93	383,3	0,83	272,6	1,16
	7	625	40	326,2	F + L	284,20	396,0	0,82	286,8	1,14
	8	556	36	332,7	F + L	291,91	404,9	0,82	297,0	1,12
	9	500	32	339,4	F + L	299,80	410,6	0,83	304,5	1,11

L: comprimento da barra composta.

 λ_y : esbeltez da barra em relação ao eixo que mobiliza as conexões. N_{CH} : número de chapas separadoras.

A: comprimento destravado da barra ou distância entre as chapas separadoras.

 r_i : raio de giração mínimo da barra individual. N_{EF} : força normal resistente obtida na análise numérica.

L: instabilidade local e F é instabilidade por flexão.

"Varição": porcentagem de variação da força normal resistente em relação à barra sem chapas.

 N_{AISI} : força normal resistente obtida com base na ANSI/AISI S100 (2020). N_{EC3} : força normal resistente obtida com base no Eurocode 3 (2006).

As Tabelas A-7 a A-8 apresentam os resultados numéricos e de procedimentos normativos dos modelos com travejamento treliçado, bem como suas relações comparativas.

Tabela A-7: Comparação entre os resultados das análises numéricas e os obtidos pelos procedimentos normativos para travejamento apenas por chapas diagonais

Conjunto	L_{barra}	$N_{\text{EF,D}}$ (kN)	Modo de instabil- idade	$N_{\text{AISI,D}}$ (kN)	$N_{\text{EF,D}}/$ $N_{\text{AISI,D}}$	$N_{\text{EC3,D}}$ (kN)	$N_{\text{EF,D}}/$ $N_{\text{EC3,D}}$
100x50x2 2,5 cm	500	168,7	L+F	179,7	0,94	196,9	0,86
	1000	159,0	L+F	173,4	0,92	193,6	0,82
	2000	155,0	L+F	143,5	1,08	134,6	1,15
	3000	136,0	L+F	106,3	1,28	81,6	1,67
	4000	110,0	F+L	71,4	1,54	51,7	2,13
	5000	86,7	F+L	50,4	1,72	35,2	2,47
100x50x2 5 cm	500	166,8	L+F	181,1	0,92	222,3	0,75
	1000	158,9	L+F	177,3	0,90	221,1	0,72
	2000	156,9	L+F	158,0	0,99	184,4	0,85
	3000	145,1	L+F	134,5	1,08	136,6	1,06
	4000	126,9	F+L	112,3	1,13	96,3	1,32
	5000	100,2	F+L	85,5	1,17	68,9	1,45
100x50x2 20 cm	500	172,2	L+F	182,8	0,94	249,6	0,69
	1000	161,2	L+F	181,5	0,89	249,6	0,65
	2000	165,1	L+F	173,8	0,95	244,6	0,67
	3000	163,5	L+F	167,2	0,98	231,9	0,70
	4000	156,6	L+F	166,4	0,94	217,9	0,72
	5000	156,5	L+F	166,6	0,94	202,8	0,77

Continua...

...continuação da Tabela A-7

Conjunto	L_{barra}	$N_{\text{EF,D}}$ (kN)	Modo de instabil idade	$N_{\text{AISI,D}}$ (kN)	$N_{\text{EF,D}}/$ $N_{\text{AISI,D}}$	$N_{\text{EC3,D}}$ (kN)	$N_{\text{EF,D}}/$ $N_{\text{EC3,D}}$
100x50x3,75 2,5 cm	500	421,3	L+F	454,5	0,93	334,1	1,26
	1000	405,5	L+F	432,9	0,94	328,6	1,23
	2000	322,0	F+L	331,0	0,97	239,5	1,34
	3000	249,5	F+L	220,3	1,13	151,1	1,65
	4000	175,4	F+L	139,9	1,25	97,4	1,80
	5000	125,7	F+L	94,9	1,32	66,7	1,88
100x50x3,75 5 cm	500	453,4	L+F	458,5	0,99	369,8	1,23
	1000	456,0	L+F	446,3	1,02	367,7	1,24
	2000	357,4	F+L	380,3	0,94	313,1	1,14
	3000	314,8	F+L	301,0	1,05	240,4	1,31
	4000	266,2	F+L	234,5	1,14	174,3	1,53
	5000	203,6	F+L	172,0	1,18	126,6	1,61
100x50x3,75 20 cm	500	475,3	L+F	462,5	1,03	407,1	1,17
	1000	495,8	L+F	460,1	1,08	407,1	1,22
	2000	429,5	L+F	433,2	0,99	402,0	1,07
	3000	391,3	F+L	411,1	0,95	382,6	1,02
	4000	352,7	F+L	409,2	0,86	361,3	0,98
	5000	344,2	F+L	410,6	0,84	338,6	1,02

L_{barra} : comprimento da barra composta.

$N_{\text{AISI,D}}$: força normal resistente obtida pela ANSI/AISI S100 (2020) dos modelos travejados apenas por barras diagonais.

$N_{\text{EC3,D}}$: força normal resistente obtida pelo Eurocode 3 (2006) dos modelos travejados apenas por barras diagonais.

$N_{\text{EF,D}}$: força normal resistente dos modelos numéricos travejados apenas por barras diagonais.

$N_{\text{AISI,DH}}$: força normal resistente obtida pela ANSI/AISI S100 (2020) dos modelos travejados por barras diagonais e horizontais.

$N_{\text{EC3,DH}}$: força normal resistente obtida pelo Eurocode 3 (2006) dos modelos travejados por barras diagonais e horizontais.

$N_{\text{EF,DH}}$: força normal resistente dos modelos numéricos travejados por barras diagonais e horizontais.

L: instabilidade local.

F: instabilidade global por flexão.

Tabela A-8: Comparação entre os resultados das análises numéricas e os obtidos pelos procedimentos normativos para travejamento por chapas diagonais e horizontais

Conjunto	L_{barra}	$N_{\text{EF,DH}}$ (kN)	Modo de instabil idade	$N_{\text{AISI,DH}}$ (kN)	$N_{\text{EF,DH}}/$ $N_{\text{AISI,DH}}$	$N_{\text{EC3,DH}}$ (kN)	$N_{\text{EF,DH}}/$ $N_{\text{EC3,DH}}$
100x50x2 2,5 cm	500	171,9	L+F	185,6	0,93	216,8	0,79
	1000	176,5	L+F	178,7	0,99	202,9	0,87
	2000	166,8	L+F	151,9	1,10	137,3	1,21
	3000	144,9	L+F	115,8	1,25	82,3	1,76
	4000	119,6	F+L	75,6	1,58	51,9	2,30
	5000	95,1	F+L	51,6	1,84	35,2	2,70

Continua...

...continuação da Tabela A-8

Conjunto	L_{barra}	$N_{\text{EF,DH}}$ (kN)	Modo de instabilidade	$N_{\text{AISI,DH}}$ (kN)	$N_{\text{EF,DH}}/$ $N_{\text{AISI,DH}}$	$N_{\text{EC3,DH}}$ (kN)	$N_{\text{EF,DH}}/$ $N_{\text{EC3,DH}}$
100x50x2 5 cm	500	169,0	L+F	186,5	0,91	235,1	0,72
	1000	168,7	L+F	182,7	0,92	227,1	0,74
	2000	167,7	L+F	167,2	1,00	186,5	0,90
	3000	152,4	L+F	144,9	1,05	137,5	1,11
	4000	137,1	L+F	119,3	1,15	96,7	1,42
	5000	109,8	F+L	88,7	1,24	69,1	1,59
100x50x2 20 cm	500	173,3	L+F	187,5	0,92	249,6	0,69
	1000	171,3	L+F	187,0	0,92	249,6	0,69
	2000	166,3	L+F	183,7	0,91	245,8	0,68
	3000	164,6	L+F	179,6	0,92	232,5	0,71
	4000	169,2	L+F	176,0	0,96	218,3	0,78
	5000	160,6	L+F	171,8	0,93	203,1	0,79
100x50x3,75 2,5 cm	500	438,4	L+F	474,3	0,92	362,6	1,21
	1000	438,2	L+F	451,5	0,97	341,7	1,28
	2000	344,5	F+L	361,7	0,95	243,7	1,41
	3000	267,7	F+L	246,8	1,08	152,4	1,76
	4000	199,0	F+L	150,1	1,33	97,8	2,04
	5000	146,9	F+L	97,3	1,51	66,8	2,20
100x50x3,75 5 cm	500	459,4	L+F	477,9	0,96	388,8	1,18
	1000	456,9	L+F	465,4	0,98	376,4	1,21
	2000	385,4	F+L	414,2	0,93	316,0	1,22
	3000	322,2	F+L	337,2	0,96	241,7	1,33
	4000	273,3	F+L	256,3	1,07	174,9	1,56
	5000	217,4	F+L	180,1	1,21	126,8	1,71
100x50x3,75 20 cm	500	470,2	L+F	481,5	0,98	407,1	1,15
	1000	491,6	L+F	479,8	1,02	407,1	1,21
	2000	437,3	L+F	468,2	0,93	403,8	1,08
	3000	413,3	F+L	454,3	0,91	383,4	1,08
	4000	433,4	F+L	442,4	0,98	361,8	1,20
	5000	384,8	F+L	428,3	0,90	338,9	1,14

L_{barra} : comprimento da barra composta.

$N_{\text{AISI,DH}}$: força normal resistente obtida pela ANSI/AISI S100 (2020) dos modelos travejados apenas por barras diagonais.

$N_{\text{EC3,DH}}$: força normal resistente obtida pelo Eurocode 3 (2006) dos modelos travejados apenas por barras diagonais.

$N_{\text{EF,D}}$: força normal resistente dos modelos numéricos travejados apenas por barras diagonais.

$N_{\text{AISI,DH}}$: força normal resistente obtida pela ANSI/AISI S100 (2020) dos modelos travejados por barras diagonais e horizontais.

$N_{\text{EC3,DH}}$: força normal resistente obtida pelo Eurocode 3 (2006) dos modelos travejados por barras diagonais e horizontais.

$N_{\text{EF,DH}}$: força normal resistente dos modelos numéricos travejados por barras diagonais e horizontais.

L: instabilidade local.

F: instabilidade global por flexão.