

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Lucas Garcia Ribeiro Silva

**Reuso de contêiners na construção civil: desafios na análise do
comportamento mecânico via Método dos Elementos Finitos e Método das
Faixas Finitas**

Juiz de Fora
2025

Lucas Garcia Ribeiro Silva

Reuso de contêiners na construção civil: desafios na análise do comportamento mecânico via Método dos Elementos Finitos e Método das Faixas Finitas

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora – Faculdade de Engenharia Civil como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Professora Dr^a Maria Ávila Branquinho

Juiz de Fora
2025

Lucas Garcia Ribeiro Silva

Reuso de contêiners na construção civil: desafios na análise do comportamento mecânico via Método dos Elementos Finitos e Método das Faixas Finitas

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora – Faculdade de Engenharia Civil como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 17 de março de 2025:

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MARIA AVILA BRANQUINHO**
Data: 20/03/2025 13:44:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professora Maria Ávila Branquinho, D. Sc - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Documento assinado digitalmente
 **WANDERSON FERNANDO MAIA**
Data: 20/03/2025 16:50:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Wanderson Fernando Maia, D.Sc
Universidade Federal de Juiz de Fora

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO GUILHERME DELGADO TOLEDO**
Data: 20/03/2025 14:33:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eduardo Guilherme Delgado Toledo
ENGETEC Projetos e Engenharia Ltda

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, que não estão aqui para dividir essa conquista, mas foram os primeiros a apoiar, a cativar o sonho e a incentivar os estudos.

À Thais, minha namorada, por todo apoio, carinho, companheirismo nesta caminhada.

Às minhas irmãs, Leila e Luiza, por dividirem essa caminhada comigo ao longo destes anos.

À Professora Dra Maria A. Branquinho, pela disponibilidade para me orientar, pelos ensinamentos, pela paciência e pelo apoio.

Aos professores Dr. Wanderson Maia e professor Msc Cleber Maestri pelos ensinamentos, pela inspiração a seguir na área de estruturas.

Ao Engenheiro Eduardo Guilherme, e a toda equipe da ENGETEC Projetos e Engenharia, pela oportunidade de estágio, por todo o ensinamento e pelas amizades.

Aos meus amigos que trilharam este caminho comigo e estiveram ao meu lado nesta jornada.

“Quando seus desejos forem fortes o suficiente, parecerá que você possui poderes sobre-humanos para alcançá-los.” (Napoleon Hill, 1984).

RESUMO

Os contêineres marítimos possuem grande potencial de reutilização na Construção Civil, contribuindo para a sustentabilidade e para a extensão da vida útil desses produtos. No entanto, para viabilizar seu uso seguro e eficiente, é essencial compreender seu comportamento estrutural de acordo com as normas regulamentadoras da Construção Civil brasileira. Nesse sentido, este estudo visa, por meio de análises numéricas, avaliar o comportamento mecânico dessas estruturas em relação às cargas e aos seus modos de falha, a fim de contribuir para a previsão de seu desempenho mecânico por meio das normas brasileiras. Neste estudo, um contêiner de transporte conforme a norma ISO 668 de 20 pés foi avaliado utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) no *software* ABAQUS e o Método das Faixas Finitas (MFF) no *software* CUFSM (*Unconstrained Finite Strip Method*). Devido à ausência de normas brasileiras específicas para o projeto e avaliação estrutural de contêineres reutilizados, a previsão normativa é realizada com base no Método de Resistência Direta (MRD), de acordo com a ABNT NBR 14762:2010. Ao final do estudo, os valores numéricos obtidos são comparados com os critérios normativos para avaliar a sua aplicabilidade na análise estrutural de contêineres reutilizados. Os resultados desta pesquisa contribuem para o desenvolvimento de diretrizes técnicas que auxiliam Engenheiros e Projetistas na adoção segura e eficiente desses elementos na construção civil.

Palavras-chave: Contêiner, Reutilização, Método dos Elementos Finitos, Método das Faixas Finitas, Método da Resistência Direta.

ABSTRACT

Shipping containers have great potential for reuse in civil construction, contributing to sustainability and extending the service life of these products. However, to enable their safe and efficient use, it is essential to understand their structural behavior according to Brazilian civil construction standard regulations. In this sense, this study presents numerical analyses to evaluate the mechanical behavior of these structures in terms of loading and failure modes as well as their prediction of mechanical behavior through Brazilian standard regulations. In this study, a shipping container following the ISO 668 Standard 20' was evaluated using the finite element method in the ABAQUS software and the finite strip method in the Unconstrained Finite Strip Method (CUFSM) software. Due to the lack of specific Brazilian standards for the design and structural assessment of reused containers, the normative prevision is performed based on the Direct Resistance Method (DRM), according to the ABNT NBR 14762 standard. At the end of the study, the numerical values obtained are compared with the normative criteria to evaluate the applicability of Brazilian standards in the structural analysis of reused containers. The resultsof this research contribute to the development of technical guidelines that assist engineers and designers in the safe and efficient adoption of these elements in civil construction.

Keywords: Containers. Reuse. Finite Strip Method. Finite Element Method. Direct Resistance Method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.....	17
Figura 2 - Perspectiva explodida dos conjuntos estruturais.	22
Figura 3 - Estrutura primaria de um contêiner.	22
Figura 4 - Seção transversal dos paineis de extremidade (EP).....	24
Figura 5 - Seção transversal dos paineis laterais (SP).....	24
Figura 6 - Seção transversal do painel de teto (RP).....	24
Figura 7 - Seção transversal das colunas de canto da porta (DCP).....	25
Figura 8 - Seção transversal das colunas de canto das extremidades (ECP).....	25
Figura 9 - Seção transversal da verga da porta (DH).....	26
Figura 10 - Seção transversal da contraverga da porta (DS).	26
Figura 11 - Seção transversal das vigas superiores de extremidades (TER).....	27
Figura 12 - Seção transversal das vigas inferiores de extremidades (BER).....	27
Figura 13 - Seção transversal da viga superior lateral (TSR).....	28
Figura 14 - Seção transversal da viga inferior lateral (BSR).....	28
Figura 15 - Seção transversal das travessas (CM) – modelo 1.....	29
Figura 16 - Seção transversal das travessas (CM) – modelo 2.....	29
Figura 17 - Seção transversal da chapa (FP) a ser soldada na face superior das travessas.....	30
Figura 18 - Seção transversal da chapa (FP) a ser soldada na face superior das travessas.....	30
Figura 19 - Reforços utilizando placas no modelo 4.....	33
Figura 20- Modelos a serem analisados.....	34
Figura 21 - Carregamentos aplicados nos modelos.....	34
Figura 22 - Modelo ABAQUS adotado no estudo com seções transversais renderizadas.....	39
Figura 23 - Condições de contorno adotadas no estudo.....	40
Figura 24 – Carregamento adotado no estudo.....	40
Figura 25 – Refinamento da malha dos elementos finitos B32 e B32OS.....	41
Figura 26 – Condições de contorno CUFSM.....	42
Figura 27 – LPF x Comprimento de arco.....	43
Figura 28 – Tensão de Von-Mises no momento da falha. Unidade: kN/mm ²	44
Figura 29 – Força x Comprimento de arco, extremidade do perfil BSR.....	44
Figura 30 – Reações de apoio.	45

Figura 31 - Amplificação do nó 1.....	46
Figura 32 – Tensões geradas por compressão centrada obtidas pelo CUFSM.	47
Figura 33– Tensões geradas por momento fletor obtidas pelo CUFSM.....	49
Figura 34 – Tensão (MPa) x Comprimento de Semi-onda, classificando o modo de flambagem participante, na seção ECP.	59
Figura 35 – Modo de flambagem x Comprimento de Semi-onda, na seção ECP.	60
Figura 36 - Condição inicial do contêiner. Unidades (kN/mm ²)	61
Figura 37 – Condição final após aplicação dos carregamentos. Unidades (kN/mm ²)	61
Quadro 1 – Características dos processos de soldagem utilizados nos contêineres	20
Quadro 2– Modelos bases estudados.....	32
Quadro 3 – Resultados das simulações com os modelos carregados.	35
Quadro 4 – Seções utilizadas no modelo.....	38
Quadro 5 – Reações de apoio para a situação de falha.	46
Quadro 6 - Seções estudadas e suas flambagens.....	48
Quadro 7 - Seções estudadas e suas flambagens.....	50
Quadro 8 - Ideias de trabalhos futuros.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os materiais estruturais mais utilizados em construção.	13
Tabela 2 - Dimensões dos contêineres Standard e High Cube.....	19
Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos aços patináveis.....	20
Tabela 4 - Termologia de peças e tradução livre para o português	21
Tabela 5 – Processo de fabricação para cada peça de um contêiner	23
Tabela 6 - Propriedades geométricas das seções dos elementos estruturais de França Junior (2017)	31
Tabela 7– Propriedades dos aços utilizados no contêiner de Giriunas, Sezen, Dupaix (2012).	32
Tabela 8– Propriedades mecânicas do aço patinável.	42
Tabela 9 – Área (A), cetroide(x e y), centro de torção das seções (x_o e y_o) e raio de giração(r_x e r_y).....	51
Tabela 10 - Momento de inercia maior (I_x e I_y) , constante de torção (J) , raio de giração polar (r_o) e constante de empenamento(C_w).....	52
Tabela 11 - Força de flambagem elástica global.	53
Tabela 12 - Forças de flambagem devido ao esforço de compressão centrada	55
Tabela 13 - Forças de flambagem critica devido ao esforço de compressão centrada	56
Tabela 14 - Momentos de flambagem devido ao esforço de flexão simples	58
Tabela 15 - Momentos de flambagem critica devido ao esforço de flexão simples ...	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MRD	<i>Método da Resistência Direta</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MFF	Método das Faixas Finitas
<i>CUFSM</i>	<i>Cross-Section Elastic Buckling Analysis</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$>$	Maior que
$<$	Menor que
\leq	Menor ou igual a
\geq	Maior ou igual a
λ_o	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global
λ_l	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local
λ_{dist}	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão normal, em geral
A	Área da seção bruta
C_w	Coefficiente de empenamento da seção
$I_x; I_y$	Momento de inercia da seção bruta em relação aos eixos X e Y
J	Coefficiente de Torção
$K_x L_x$	Comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo X
$K_y L_y$	Comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo Y
$K_z L_z$	Comprimento efetivo de flambagem global por torção
M_{dist}	Momento fletor de flambagem distorcional elástica
M_e	Momento fletor de flambagem global elástica
M_l	Momento fletor de flambagem local elástica
M_{re}	Valor característico do momento resistente associado a flambagem global
M_{rl}	Valor característico do momento resistente associado a flambagem local
M_{rdist}	Valor característico do momento resistente associado a flambagem distorcional
$N_{c,re}$	Valor característico da força axial de compressão resistente, associado a flambagem global
$N_{c,rl}$	Valor característico da força axial de compressão resistente, associado a flambagem local
$N_{c,rdist}$	Valor característico da força axial de compressão resistente, associado a flambagem distorcional
N_{dist}	Força axial de flambagem distorcional elástica
N_e	Força axial de flambagem global
N_l	Força axial de flambagem local

N_{ex}	Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo X
N_{ey}	Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo Y
N_{ez}	Força axial de flambagem global elástica por torção
W	Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação a fibra extrema que atinge o escoamento
f_y	Resistência ao escoamento do aço
r_o	Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção
r_x	Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal X
r_y	Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal Y
x	Distância do centroide em relação a linha média da parte mais à esquerda da seção, em relação ao eixo X
y	Distância do centroide em relação a linha média da parte mais a baixo da seção em relação ao eixo Y
x_o	Distância do centro de torção ao centroide, na direção do eixo X.
y_o	Distância do centro de torção ao centroide, na direção do eixo Y.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO	14
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2 METODOLOGIA	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Modelos de container segundo França Junior (2017) e Felipe (2021)	19
3.1.1 Elementos constituintes dos contêineres	20
3.1.2 Seções transversais e propriedades geométricas	24
3.2 Giriunas, Sezen, Dupaix (2012)	31
4 MODELO NÚMÉRICO	37
4.1 Método dos Elementos Finitos - <i>ABAQUS</i>	37
4.1.1 Modelo	38
4.1.2 Malha	41
4.2 CUFSM	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1 ABAQUS	43
5.2 CUFSM	46
5.3 ABNT NBR 14762 (2010) - MRD	52
5.3.1 Compressão centrada	54
5.3.2 Flexão Simples	56
5.4 ABAQUS x CUFSM x MRD	59
6 CONCLUSÕES	63
6.1 Trabalhos futuros	63
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

As construções modulares surgiram em 1833, com a construção da Igreja de Santa Maria, em Chicago (SAVASSI e CHICA, 2022). No entanto, atualmente com o crescimento das pautas ambientais e climáticas, sua utilização está se tornando cada vez mais popular na construção civil. Optar por sistemas construtivos modulares traz uma obra mais limpa e de maior qualidade, na medida em que grandes partes dos processos construtivos ocorre *offsite*, ou seja, em fábrica (SAVASSI e CHICA, 2022). Todavia, os materiais e processos construtivos destes sistemas também devem estar alinhados com estas pautas sustentáveis.

O processo de produção do aço é altamente intensivo em energia, conforme demonstrado na Tabela 1. Desta forma, para que possa ser visto como um material sustentável, é necessário que ele apresente uma grande longevidade, para deste modo, compensar o gasto em sua produção. A fim de atender às demandas socioambientais, os profissionais da construção civil vêm buscando alternativas que prolonguem a vida útil dos materiais. Desta forma, os contêineres marítimos se destacam como uma das alternativas adotadas para o uso de sistemas modulares em aço, isso porque, ao perderem as características necessárias para o transporte de carga, ainda podem ser adaptados dentro de projetos de construção civil, como residências, lojas, escolas, hotéis etc. (FRANÇA JUNIOR, 2017).

Tabela 1 - Comparação entre os materiais estruturais mais utilizados em construção.

Material	Densidade (g/cm ³)	Energia para produção (MJ/m ³)	Resistência (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência / densidade
Concreto	2,4	1920	20 - 50	20000	8
Aço	7,8	234000	250 - 345	205000	32
Madeira conífera	0,6	600	50	10000	83
Madeira dicotiledônea	0,9	600	75	15000	83

Fonte: CALIL (1997).

Segundo FRANÇA JUNIOR (2017) ao fim da vida útil como elemento de transporte, os containers marítimos são descartados de forma indevida. A opção pela reciclagem desse material demandaria um consumo significativo de energia, tornando o processo menos vantajoso do ponto de vista econômico e ambiental. Desta forma,

reutilizá-los como sistema construtivo modular é uma forma de estender sua vida útil – tornando-se uma opção ao se tratar de sustentabilidade – e configura-se como uma opção com um custo menor, por se tratar de reaproveitamento, para atender a demandas sociais (FRANÇA JUNIOR, 2017).

Neste contexto, o presente trabalho busca avaliar numericamente a capacidade resistente de contêineres marítimos, para que sua utilização na construção civil como sistema construtivo modular possa ser feita com qualidade e segurança à sociedade.

1.1 OBJETIVO

Por meio de estudos numéricos e normativos, o presente estudo visa avaliar o comportamento mecânico de contêineres marítimos reaproveitados na construção civil como edificações a fim de contribuir para a previsão de seu desempenho mecânico por meio da norma brasileiro para Perfis Formados a Frio. Neste contexto, o trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- i. Avaliar numericamente o comportamento global do container pelo Método dos Elementos Finitos (MEF);
- ii. Avaliar o comportamento das barras para os modos de flambagem local e distorcional via Método das Faixas Finitas (MFF);
- iii. Avaliar a aplicabilidade da ABNT NBR 14762 (2010), em especial o Método da Resistência Direta (MRD), para a previsão da capacidade resistente deste sistema construtivo.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado em seis capítulos, de modo que o primeiro trata da introdução ao assunto, seguido da metodologia (capítulo 2) utilizada para desenvolver o trabalho.

No terceiro capítulo, foi realizada a revisão bibliográfica de três trabalhos que serviram de base para a execução deste. Deste modo, os dois primeiros trabalhos apresentados serviram como referência para obter características geométricas e mecânicas dos contêineres. Já o terceiro, foi utilizado principalmente para auxiliar o desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos.

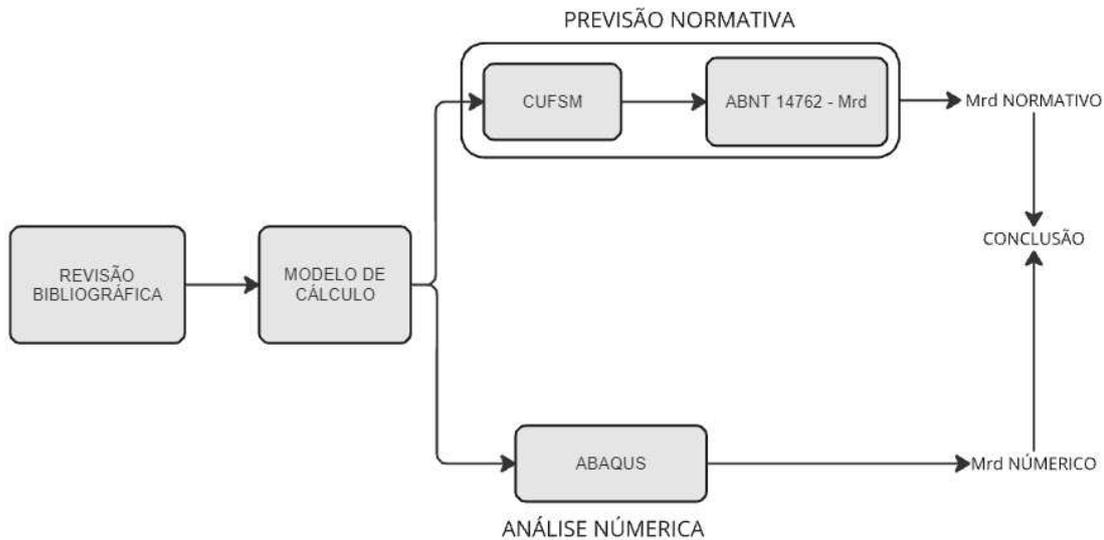
O quarto capítulo relata sobre os modelos numéricos utilizados para desenvolver o trabalho, explicando como cada um foi definido, para que então no quinto capítulo possa trazer os resultados e comentários a respeito do trabalho.

Encerrando com o sexto capítulo onde está a conclusão sobre o estudo realizado e indicações de inspirações para trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA

Para atingir o objetivo deste trabalho, ele está estruturado conforme Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autor (2025)

O estudo se inicia com a revisão bibliográfica a fim de que o assunto tratado tenha como base evidências científicas e relevância para a área de interesse. Esta etapa se estende até o término do estudo a fim de, também, embasar as conclusões. Sendo aqui, definido o container utilizado como modelo para o trabalho.

Definidos os modelos de estudo, é efetuada a previsão teórica da capacidade resistente dos principais componentes estruturais dos contêineres com base no Método da Resistência Direta (MRD) da ABNT NBR 14762 (2010). Para tal, a análise global de estabilidade elástica dos elementos estruturais é efetuada no *software* *CUFSM – Cross-Section Elastic Buckling Analysis* – de Schafer (2006).

Paralelamente, os contêineres definidos na revisão bibliográfica são avaliados numericamente, por meio do *software* *Abaqus*, para que, a partir de modelos com base no Método dos Elementos Finitos, seja determinada a capacidade última dos contêineres estudados.

Para finalizar, foi realizado uma comparação entre os resultados obtidos. Sendo avaliado a possibilidade da utilização da ABNT NBR 14762 (2010) para definir a capacidade resistente dos contêineres, e, se estes são viáveis para a construção civil.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão de três trabalhos sobre análise estrutural de contêineres. Os dois primeiros – França Junior (2017) e Felipe (2021) – são de interesse devido à exposição das propriedades geométricas do contêiner, mostrando os modelos existentes e os componentes da estrutura. Na sequência, é apresentado o trabalho de Giriunas, Sezen, Dupaix (2012), onde o interesse está na análise numérica realizada e nos resultados obtidos.

3.1 Modelos de container segundo França Junior (2017) e Felipe (2021)

Os contêineres são padronizados de acordo com a norma norte americana ISO 668 (ISO, 2013), por isso, suas medidas são dadas em pés (') e polegadas ("). Segundo Felipe (2021) os modelos mais utilizados *Standard* e o *High Cube* são os de 20' e 40', sendo estas medidas referente aos comprimentos deles. Todos os contêineres possuem largura padrão de 8' (2438mm) e as demais dimensões externas e internas (mínimas) estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões dos contêiners Standard e High Cube

Nomenclatura Comercial	Dimensões externas (mm)			Dimensões internas mínimas (mm)		
	Altura	Comprimento	Largura	Altura	Comprimento	Largura
20' Standard	2591	6058	2438	2350	5867	2330
20' HC	2896			2655		
40' Standard	2591	12192	2438	2350	11998	2330
40' HC	2896			2655		

Fonte: FELIPE (2021)

De acordo com FELIPE (2021), a maioria dos contêineres é fabricada com aços de baixa liga e alta resistência à corrosão atmosférica, conhecidos como aços patináveis. As normas que definem a composição química e as propriedades mecânicas desses aços incluem as norte-americanas ASTM A242, A588 e A709, bem como as brasileiras NBR 5921 CFR500, 5008 CGR500, 5920 CFR500 e 7007 AR350 COR (CBCA, 2020).

De forma resumida, as propriedades mecânicas dos aços patináveis estão organizadas na Tabela 3, enquanto os elementos de ligação por solda estão apresentados no Quadro 1.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos aços patináveis.

E (GPa)	Coefficiente de Poisson (ν)	f_y (MPa)
200	0,3	345

Fonte: FELIPE (2021)

Quadro 1 – Características dos processos de soldagem utilizados nos contêineres

Eletrodo revestido	MIG / MAG	Arco submerso	Eletrodo Tubular
E 7018 W	ER 8018 S-G	F 7AO EW	E 71T8 Ni1
E 7018 G			E 80T1 W

Fonte: FELIPE (2021)

3.1.1 Elementos constituintes dos contêineres

Os contêineres possuem diversas peças individuais que precisam ser combinadas para formarem a estrutura final (França Junior, 2017). Para melhor entendimento, serão utilizadas siglas baseadas na língua inglesa, que foram traduzidas na Tabela 4 (FRANÇA JUNIOR, 2017).

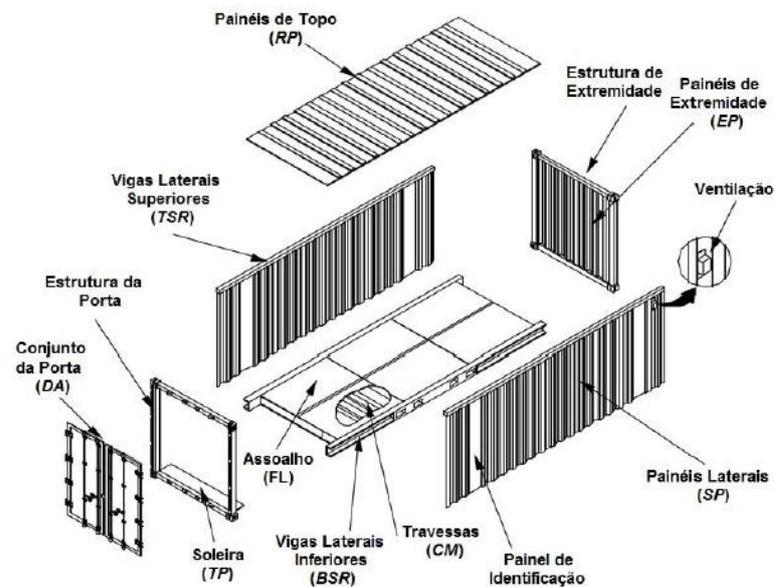
Tabela 4 - Terminologia de peças e tradução livre para o português

Inglês	Português (BR)	Sigla
Corner Fittings	Conectores de canto	CF
Door Corner Post	Colunas de canto da porta	DCP
End Corner Post	Colunas de canto de extremidade	ECP
Door Header	Verga da porta	DH
Door Sill	Contraverga da porta	DS
Top End Rail	Vigas superiores de extremidade	TER
Bottom End Rail	Vigas inferiores de extremidade	BER
Top Side Rail	Vigas superiores laterais	TSR
Bottom Side Rail	Vigas inferiores laterais	BSR
Cross Member	Travessas	CM
Forklift Pocket	Encaixe transversal para empilhadeira	FP
Gooseneck Tunnel	Encaixe longitudinal para empilhadeira	GT
Endwall Panel	Painéis de extremidade	EP
Sidewall Panel	Painéis laterais	SP
Roof Panel	Painéis de topo	RP
Flooring	Assoalho	FL
Threshold Plate	Soleira	TP
Door Assembly	Conjunto da porta	DA

Fonte: França Junior (2017)

Essas peças são organizadas de modo a formar um prisma de seis faces, estas faces são denominadas de acordo com sua posição, sendo 2 faces laterais, a face da porta, a face superior e a face frontal (França Junior 2017). Cada face é um conjunto estrutural, formado pelos elementos estruturais, conforme a Figura 2.

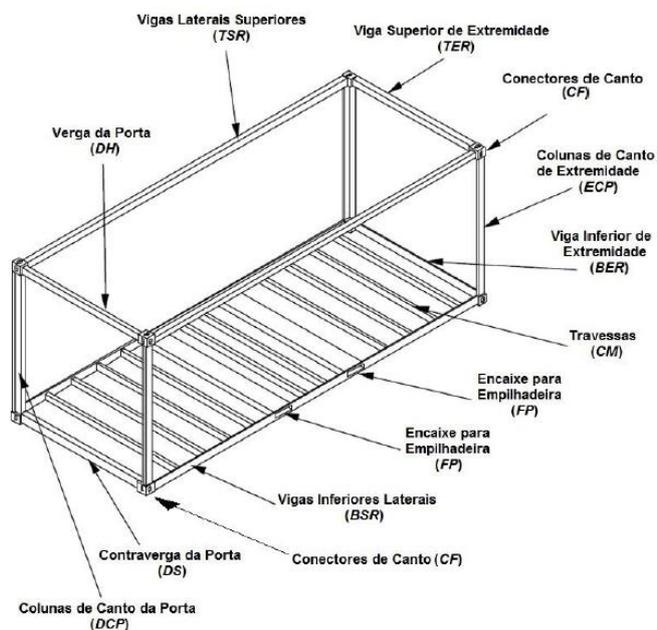
Figura 2 - Perspectiva explodida dos conjuntos estruturais.



Fonte: França e Junior (2017)

Segundo FRANÇA JUNIOR (2017) os elementos reticulares são compostos por perfis de seções não convencionais em sua maioria, mostrado no item 3.1.2, e representada na Figura 3.

Figura 3 - Estrutura primaria de um contêiner.



Fonte: França Junior (2017)

Os diversos elementos apresentados devem ser combinados para formar cada face da estrutura. Desta forma, os processos de fabricação para cada peça estão organizados conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Processo de fabricação para cada peça de um contêiner

Elementos	Sigla	Processo de Fabricação
Estrutura da porta		
Conectores de canto	CF	Fundição
Colunas de canto da porta (interno)	DCP	Laminação
Colunas de canto da porta (externo)	DCP	
Verga da porta	DH	Conformação a frio
Contraverga da porta	DS	
Conjunto da porta	DA	
Estrutura da extremidade		
Conectores de canto	CF	Fundição
Colunas de canto de extremidade	ECP	Conformação a frio
Viga superior de extremidade	TER	Laminação e Conformação a frio
Viga inferior de extremidade	BER	
Painéis de extremidade	EP	Conformação a frio
Estrutura de topo		
Painéis de teto	RP	Conformação a frio
Estrutura Inferior		
Vigas inferiores laterais	BSR	
Travessas	CM	
Chapas para encaixe da empilhadeira	FP	Conformação a frio
Encaixe para transporte	GT	
Estruturas Laterais		
Vigas superiores laterais	TSR	Laminação
Painéis laterais	SP	Conformação a frio

Fonte: França Junior (2017)

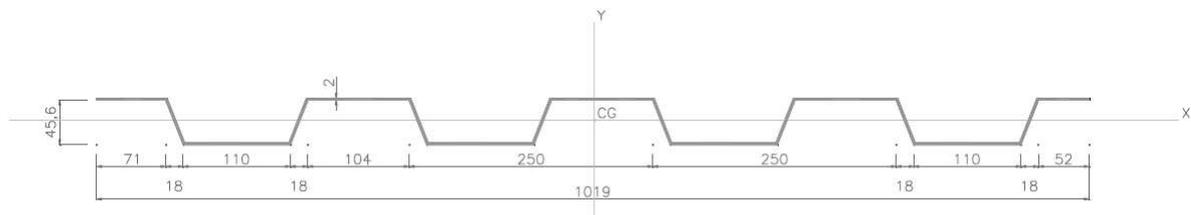
Então, tendo em vista que os contêineres possuem perfis com conformações a frio, e a quente (laminados), sua análise deve respeitar a norma vigente para estudo específico. No caso dos PFF, trata-se da ABNT NBR 14762 (2010).

3.1.2 Seções transversais e propriedades geométricas

Cada elemento possui sua própria seção transversal, sendo apresentado aqui os perfis utilizados apenas nos modelos de 20' (FELIPE, 2021).

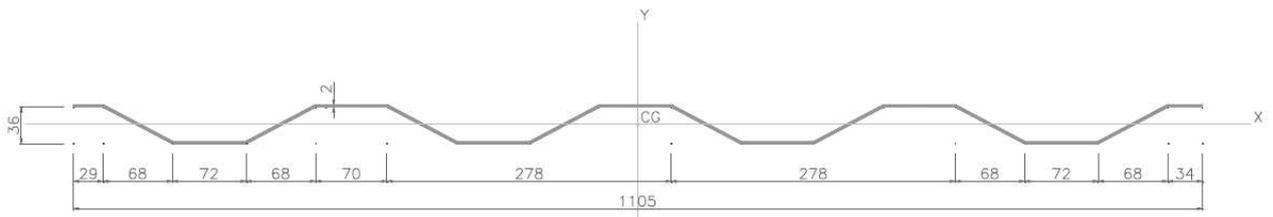
Primeiramente é apresentado a seção transversal do painel de extremidade (EP), os painéis laterais (SP) e por últimos os painéis de topo (RP) nas Figuras 4, 5 e 6 respectivamente. As dimensões apresentadas nas Figuras 4 à 18 estão em milímetros.

Figura 4 - Seção transversal dos painéis de extremidade (EP).



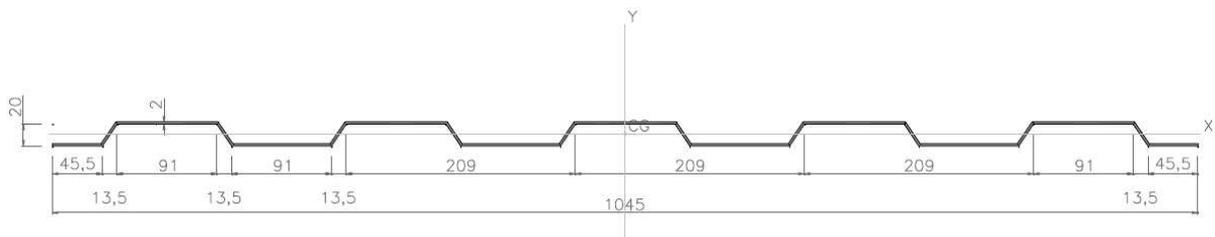
Fonte: França Junior (2017)

Figura 5 - Seção transversal dos painéis laterais (SP).



Fonte: França Junior (2017)

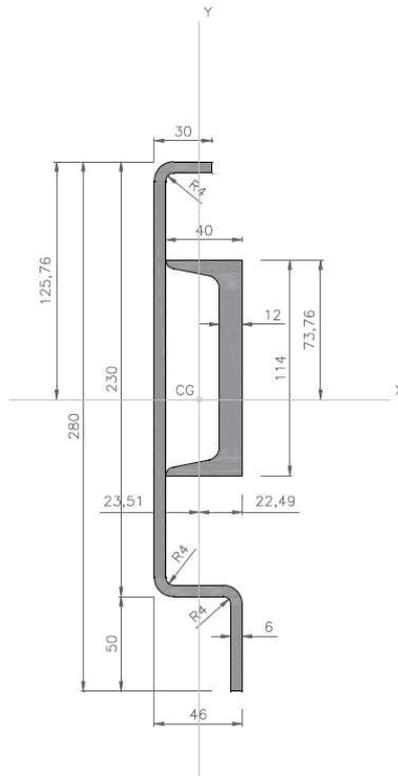
Figura 6 - Seção transversal do painel de teto (RP).



Fonte: França Junior (2017)

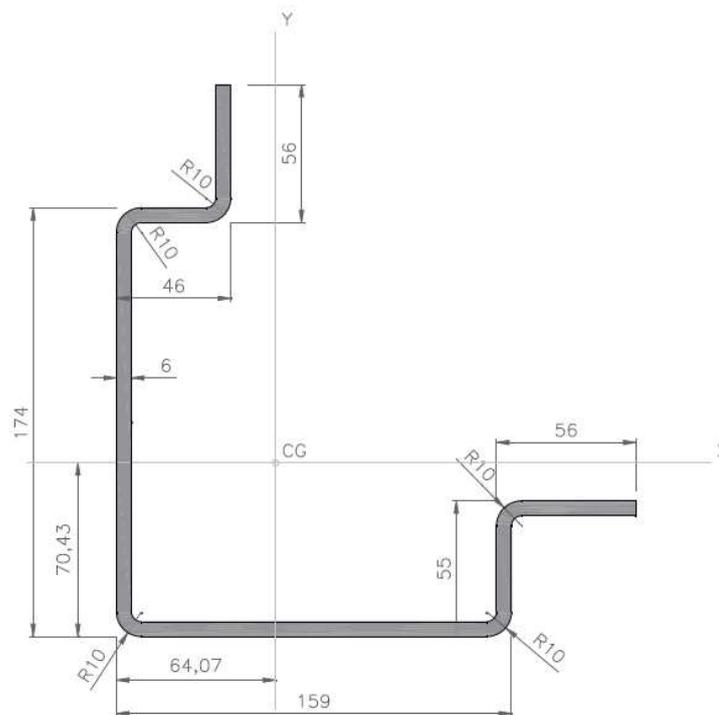
As colunas de canto de porta (DCP) e coluna de canto de extremidade (ECP) serão apresentadas nas Figuras 7 e 8 respectivamente.

Figura 7 - Seção transversal das colunas de canto da porta (DCP).



Fonte: França Junior (2017)

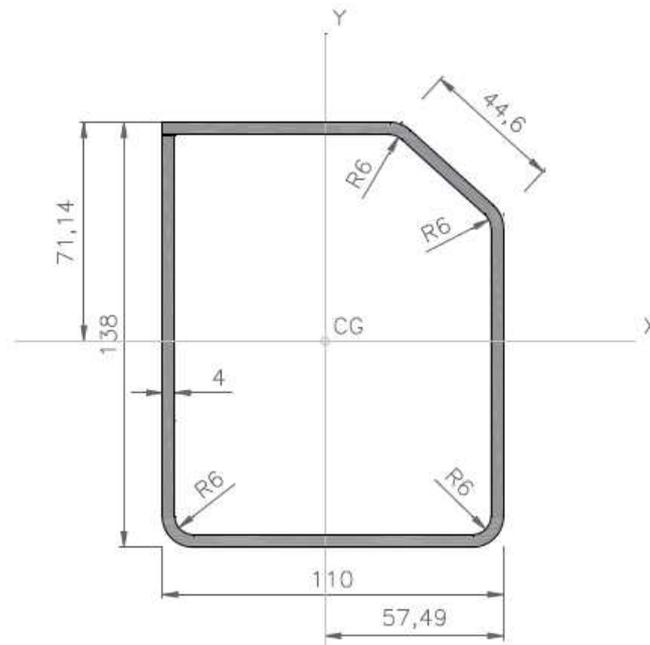
Figura 8 - Seção transversal das colunas de canto das extremidades (ECP).



Fonte: França e Junior (2017)

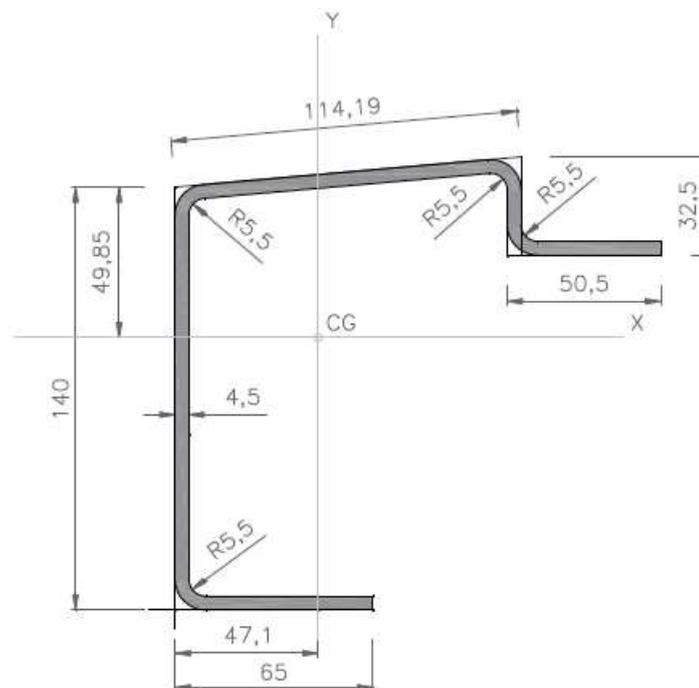
A verga da porta (DH) e a contraverga da porta (DS) estão representadas nas Figuras 9 e 10 respectivamente.

Figura 9 - Seção transversal da verga da porta (DH).



Fonte: França e Junior (2017)

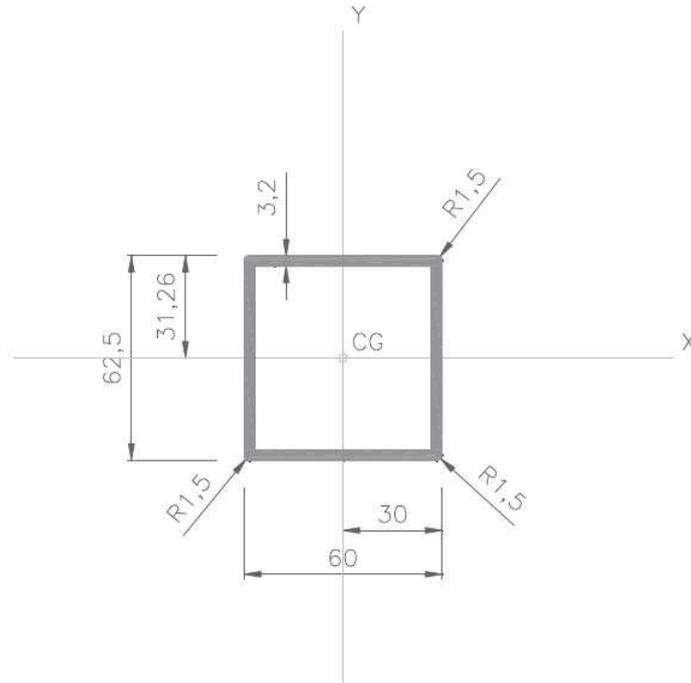
Figura 10 - Seção transversal da contraverga da porta (DS).



Fonte: França e Junior (2017)

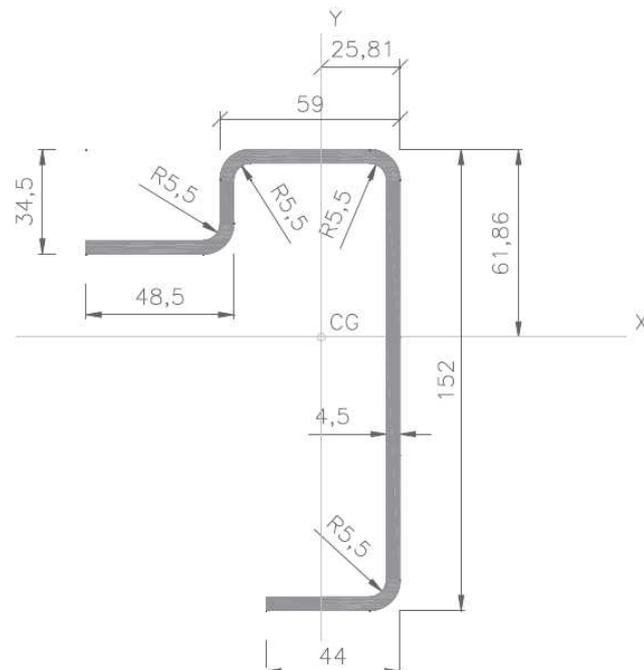
As vigas superiores de extremidades (TER), vigas inferiores de extremidade (BER), vigas superiores laterais (TSR) e vigas inferiores laterais (BSR) estão ilustrados nas Figuras de 11 a 14 respectivamente.

Figura 11 - Seção transversal das vigas superiores de extremidades (TER).



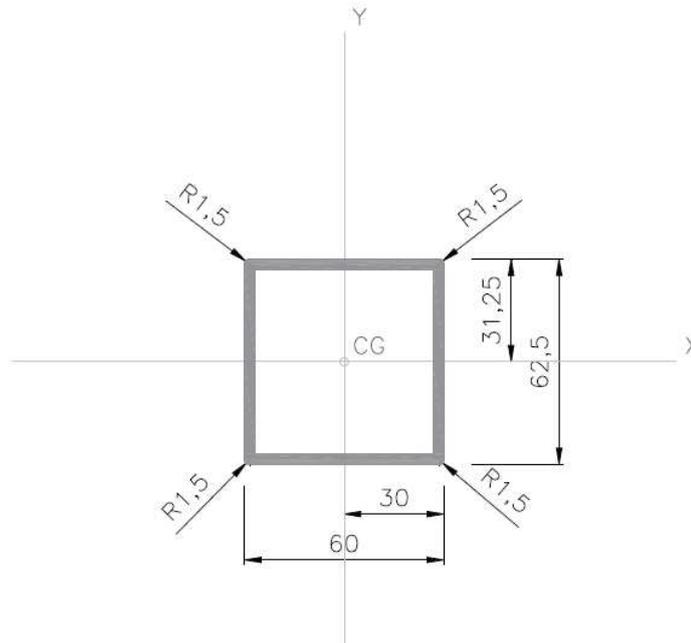
Fonte: França e Junior (2017)

Figura 12 - Seção transversal das vigas inferiores de extremidades (BER).



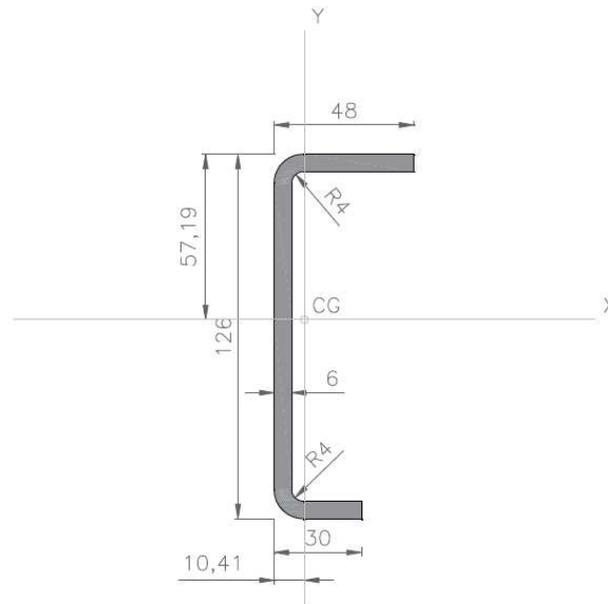
Fonte: França e Junior (2017)

Figura 13 - Seção transversal da viga superior lateral (TSR)



Fonte: França e Junior (2017)

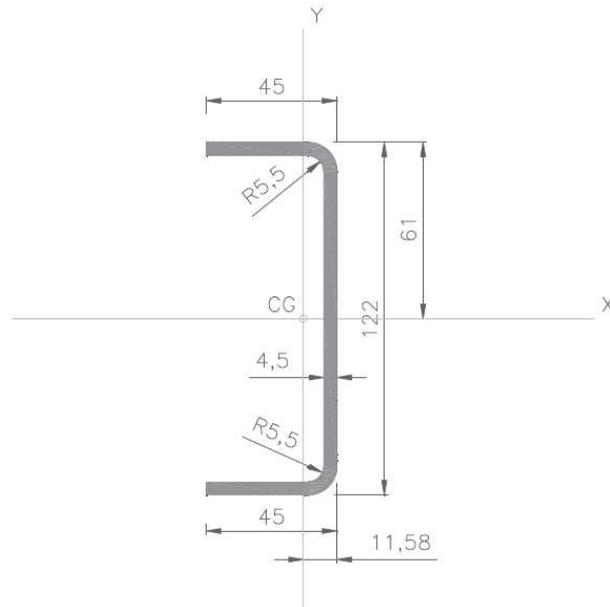
Figura 14 - Seção transversal da viga inferior lateral (BSR)



Fonte: França e Junior (2017)

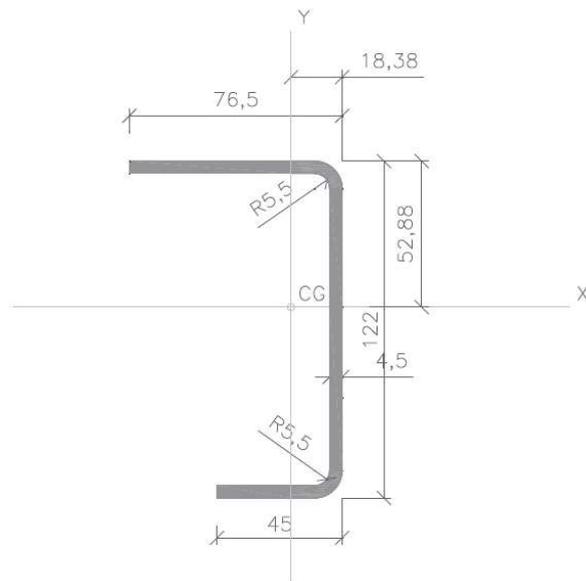
As travessas (CM) estão representadas na Figura 15 e 16 sendo duas opções que podem ser utilizadas nesses contêineres. Nas Figuras 17 e 18 está o encaixa transversal para empilhadeira (FP), que são três chapas a serem soldadas nas travessas, uma na face superior e duas na face inferior.

Figura 15 - Seção transversal das travessas (CM) – modelo 1.



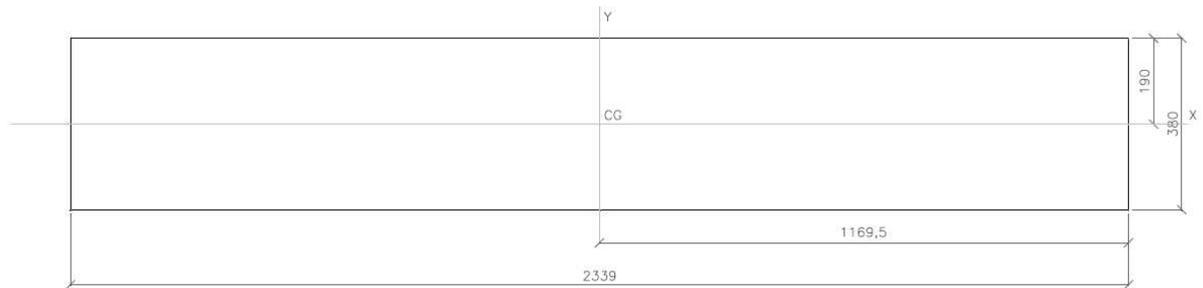
Fonte: França e Junior (2017)

Figura 16 - Seção transversal das travessas (CM) – modelo 2



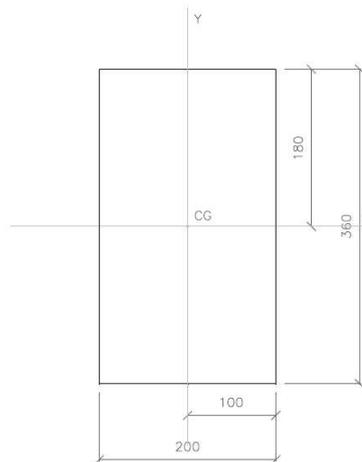
Fonte: França e Junior (2017)

Figura 17 - Seção transversal da chapa (FP) a ser soldada na face superior das travessas.



Fonte: França e Junior (2017)

Figura 18 - Seção transversal da chapa (FP) a ser soldada na face superior das travessas.



Fonte: França e Junior (2017)

A Tabela 6 mostra as informações referentes às propriedades geométricas das seções apresentadas anteriormente.

Tabela 6 - Propriedades geométricas das seções dos elementos estruturais de França Junior (2017)

ELEMENTO	ÁREA (mm²)	I_x (mm⁴)	I_y (mm⁴)
DCP	3005.87	14635673.94	12922922.58
ECP	2749.18	18326565.54	11129665.67
DH	1817.87	4854787.16	3448296.82
DS	1668.28	4949056.13	3979290.19
TER	740.95	430103.48	403264.65
BER ₁	1380.13	3881985.65	1190830.1
TSR	740.95	430103.48	403264.65
BSR	1115.95	2252333.68	162456.13
CM ₁	883.56	1830954.37	158319.19
CM ₂	1025.31	2252812.28	465320.91
FP ₁	1090	823.5	12256974
FP ₂	2160	6480	23328000
EP	5068.77	2093571.14	1740546623
SP ₁	2353.06	497295.75	239444878.7
SP ₂	5671.36	1200630.59	2540478411
RP	11427.42	984952.51	25843248497

Fonte: Adaptado de França Junior (2017)

Onde os momentos de inércia (I_x e I_y) foram calculados no centro de gravidade de cada seção.

3.2 Giriunas, Sezen, Dupaix (2012)

O container escolhido por Giriunas, Sezen, Dupaix (2012) para realização do presente trabalho foi o de 20 pés *Standard*, conforme Tabela 2. As propriedades dos aços utilizados na estrutura foram definidas conforme Tabela 7.

Tabela 7– Propriedades dos aços utilizados no contêiner de Giriunas, Sezen, Dupaix (2012).

Local de Utilização	Coefficiente de Poisson	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de escoamento (MPa)
Conectores de canto	0,3	200	275
Colunas da porta	0,3	200	285
Demais componentes	0,3	200	343

Fonte: Adaptado de Giriunas, Sezen, Dupaix (2012).

Os autores definiram cinco modelos base, que estão listados no Quadro 2.

Quadro 2– Modelos bases estudados.

Modelo 1	Componentes criados e divididos em malhas uniformes no software <i>Abaqus</i> . Elementos de casca para paredes e teto, elementos lineares para vigas, colunas e travessas. Não possui conectores de canto, seções próximas às reais.
Modelo 2	Componentes criados e divididos em malhas uniformes no software <i>Abaqus</i> . Elementos de casca para paredes e teto, elementos lineares para vigas, colunas e travessas. Não possui conectores de canto, seções ainda mais próximas às reais.
Modelo 3	Vigas, colunas e travessas conforme modelo 2. No entanto houve maior detalhamento das paredes e teto. Adicionou-se conectores de canto como elemento sólido.
Modelo 4	Utilizou o software <i>SolidWorks</i> para criação dos elementos 3D e definiu a malha de elementos finitos pelo software <i>Hypermesh</i> . Posteriormente, foram importados para o <i>Abaqus</i> onde foi realizada a análise estrutural do contêiner. Os conectores de canto foram mantidos como elementos sólidos.
Modelo 5	Utilizou-se o software <i>SolidWorks</i> para criação dos elementos 3D e definiu a malha de elementos finitos pelo software <i>Hypermesh</i> . No entanto houve maior refinamento da malha das paredes e teto. Posteriormente foram importados para o <i>Abaqus</i> onde foi realizada a análise estrutural do contêiner. Os conectores de canto foram mantidos como elementos sólidos.

Fonte: Adaptado de Giriunas, Sezen, Dupaix (2012).

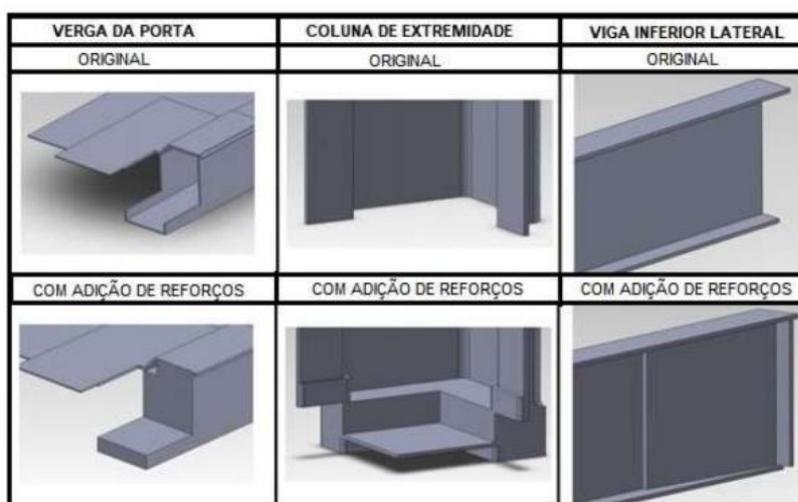
A diferença entre modelos mostrados no Quadro 2 é pela complexidade e refinamento de cada um, sendo o primeiro o mais básico e o quinto o mais refinado. Os autores optaram por essa diferenciação para analisar qual apresentaria a maior eficiência computacional, preservando os principais recursos estruturais do container. Deste modo, pretendiam entender onde poderiam ocorrer simplificações sem grandes perdas na precisão da análise.

Em todos os modelos, os pisos foram excluídos, e as portas foram tratadas como parede, da mesma forma que a face oposta a ela. Sendo modelada a mesma chapa nestas faces.

Segundo Giriunas, Sezen, Dupaix (2012), para decidir qual modelo seria utilizado, foi aplicada uma carga externa até que algum componente atingisse o início do escoamento, sendo utilizada a análise linear. O modelo 3 apresentou tensões muito diferente dos demais, enquanto o 1 e 2 atingiram o escoamento com uma carga acima do esperado. Já os modelos 4 e 5 apresentaram resultados que se comparam ao esperado de um contêiner real. Por questões computacionais, o modelo 4 foi escolhido pelos autores para ser utilizado no restante do trabalho.

Todavia, o modelo 4 apresentou um acúmulo de tensões incompatíveis em várias áreas do contêiner. Para solucionar esta questão, Giriunas, Sezen, Dupaix (2012) realizaram reforços conforme Figura 19, utilizando placas em alguns componentes e aumentando a densidade da malha aplicada.

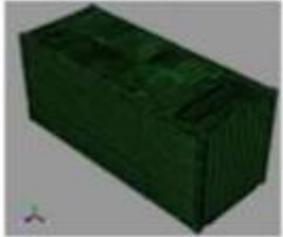
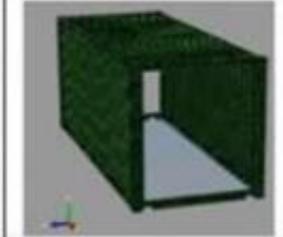
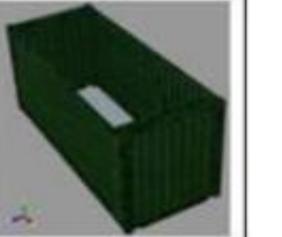
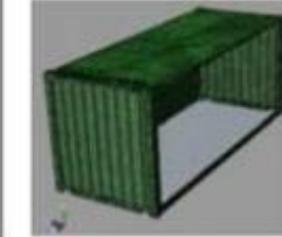
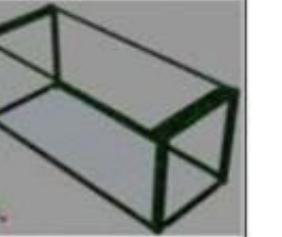
Figura 19 - Reforços utilizando placas no modelo 4



Fonte: Giriunas (2012)

Para realizar as análises, foram gerados oito modelos a partir do modelo base definido, sendo ilustrados na Figura 20.

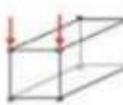
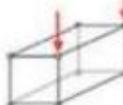
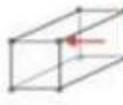
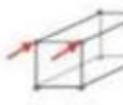
Figura 20- Modelos analisados

M1	M2	M3	M4
			
CONTÊINER ORIGINAL	PAREDES LATERAIS REMOVIDAS	PAREDES DE EXTREMIDADE REMOVIDAS	TETO REMOVIDO
M5	M6	M7	M8
			
PAREDES LATERAIS E DE EXTREMIDADE REMOVIDAS	UMA PAREDE LATERAL REMOVIDA	UMA PAREDE DE EXTREMIDADE REMOVIDA	TODAS AS PAREDES REMOVIDAS

Fonte: Giriunas, Sezen, Dupaix (2012)

Cada um dos modelos foi submetido a 5 carregamentos diferentes, de acordo com a Figura 21. Estes carregamentos foram baseados em testes prescritos na norma ISO1496-1(1990), sendo essa a única referência para comparação dos dados. A carga era aumentada a uma taxa constante e até que atingisse o escoamento ou a rigidez diminuísse.

Figura 21 - Carregamentos aplicados nos modelos

CARREGAMENTO 1	CARREGAMENTO 2	CARREGAMENTO 3	CARREGAMENTO 4	CARREGAMENTO 5
				
COMPRESSÃO CONCENTRADA (4 CONECTORES)	COMPRESSÃO CONCENTRADA (2 CONECTORES - MENOR LADO)	COMPRESSÃO CONCENTRADA (2 CONECTORES - MAIOR LADO)	TRANSVERSAL CONCENTRADA (PARA DENTRO)	LONGITUDINAL CONCENTRADA (PARA DENTRO)

Fonte: Giriunas, Sezen, Dupaix (2012)

Ao realizar as simulações, para cada carregamento houve falha em um diferente modelo, sendo estes descritos no Quadro 3 (GIRIUNAS, SEZEN, DUPAIX, 2012).

Quadro 3 – Resultados das simulações com os modelos carregados.

Carregamento 1	Paredes de extremidade foram os componentes mais resistentes à carga. A remoção do teto e das paredes laterais não tiveram efeito nos valores máximos de carga aplicada.
Carregamento 2	Paredes laterais foram os componentes mais resistentes. Paredes de extremidade foram pouco eficazes para transporte das cargas. O teto não influenciou na rigidez ou resistência.
Carregamento 3	Apresentou uma resposta fora do padrão. Conforme se retirava componentes, se tornando mais flexível, foi capaz de suportar maior carregamento, maiores deslocamentos e apresentou escoamento conforme o modelo base. As paredes de extremidade foram os componentes mais resistentes e na sua ausência as paredes laterais forneceram rigidez e distribuíram bem as cargas.
Carregamento 4	Paredes de extremidade foram os componentes críticos. O teto forneceu pouca rigidez sem as paredes laterais. As paredes laterais também apresentaram capacidade limitada para suportar carga.
Carregamento 5	Paredes laterais foram os componentes críticos. Os modelos com as paredes laterais e teto foram os mais rígidos. Componentes diferentes atingiram o escoamento em modelos sem teto.

Fonte: Adaptado de Giriunas, Sezen, Dupaix (2012).

4 MODELO NÚMÉRICO

Foram utilizados dois modelos numéricos para desenvolver o estudo. No primeiro utilizou-se o software ABAQUS, por meio do Método dos Elementos Finitos. Já no segundo foi utilizado o *software* CUFSM, por meio do Método das Faixas Finitas, onde aproveitou-se os valores para realizar o cálculo de acordo também com a ABNT NBR 14762(2010).

No presente estudo, foram empregadas as seções transversais de França Junior (2017). Desta forma, as propriedades mecânicas foram adotadas conforme Tabela 3.

4.1 Método dos Elementos Finitos - *ABAQUS*

De acordo com Giriunas, Sezen, Dupaix (2012) foi escolhido o container 20' Standard, com o modelo 8, sem utilização de chapas de fechamento, e o carregamento 1, onde há uma carga aplicada nas 4 extremidades do contêiner.

Desta forma, o container foi modelado em modelo de pórtico. Sendo as ligações da base rotuladas, e as ligações entre pilares e vigas rígidas. Foram utilizadas as seções como definidas por França Junior (2017) – detalhes no capítulo 4.1.1.

O elemento finito de viga escolhido foi o B32 e B32OS, onde, segundo Branquinho et.al (2019) atende as condições de contorno para seções de perfil formado a frio simplesmente apoiadas.

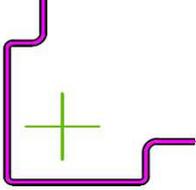
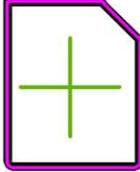
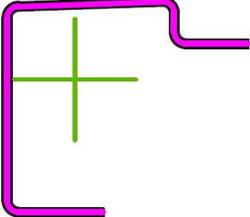
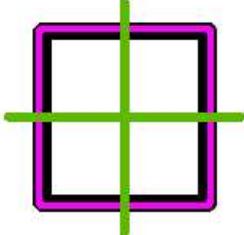
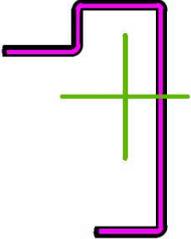
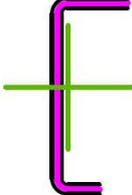
Para considerar a não linearidade geométrica, os cálculos realizados foram utilizando o método de RIKS.

O estudo no ABAQUS foi realizado considerando que a unidade de força em kilo-newton (kN) e as unidades de comprimento em milímetro (mm).

4.1.1 Modelo

No modelo, foram consideradas as seções conforme o Quadro 4.

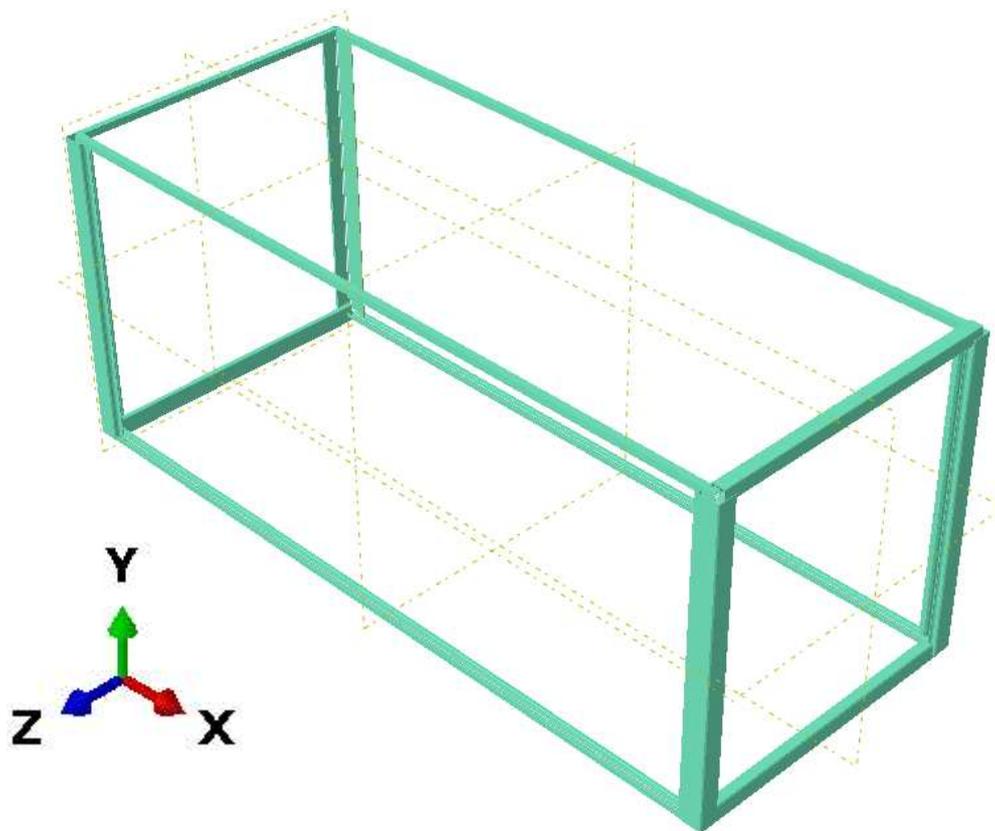
Quadro 4 – Seções utilizadas no modelo.

<p>ECP – Colunas de canto. Elemento finito: B32OS</p>	
<p>DH – Verga da porta. Elemento finito: B32</p>	
<p>DS – Contra verga da porta. Elemento Finito: B32OS</p>	
<p>TER E TSR – vigas superiores. Elemento Finito: B32.</p>	
<p>BER – viga inferior de extremidade. Elemento Finito: B32OS.</p>	
<p>BSR – viga inferior lateral. Elemento Finito: B32OS.</p>	

Fonte: Autor.

Para esta primeira análise, foram efetuadas algumas simplificações no modelo MEF. Como não foram consideradas as portas, as quatro colunas foram consideradas como colunas de canto (ECP). No entanto, as vergas e contra vergas não foram alteradas. Também não foram consideradas as chapas de fechamento lateral, tampouco as estruturas de travessas, como pode ser mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Modelo ABAQUS adotado no estudo com seções transversais renderizadas.

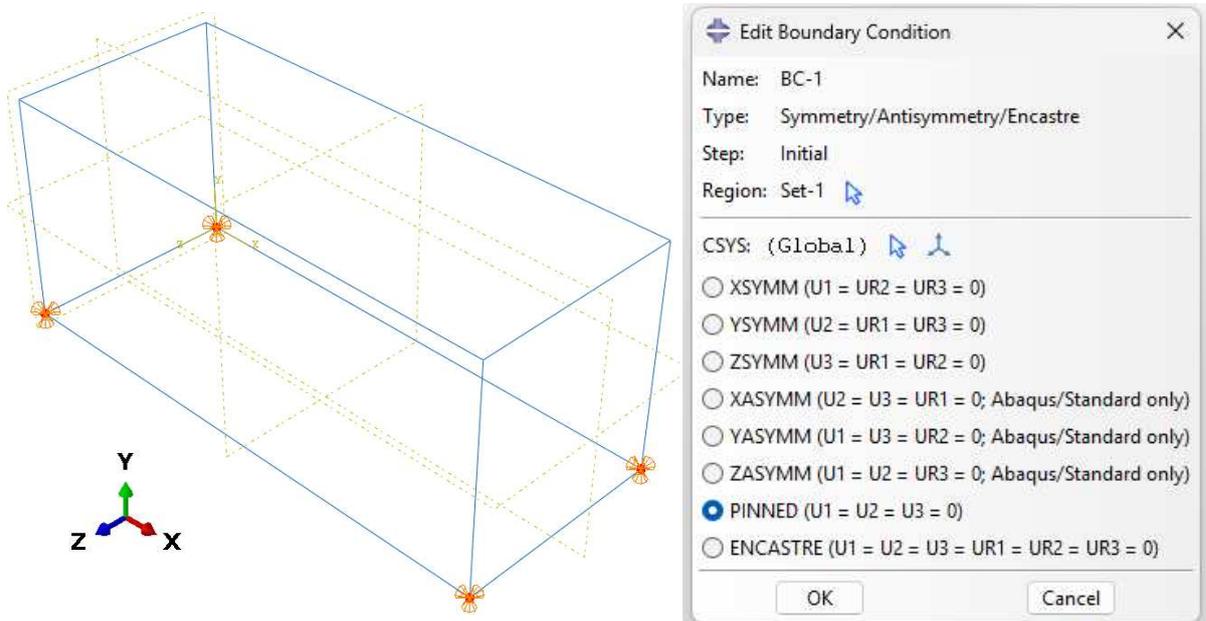


Fonte: Autor.

Foi adotado para o modelo as dimensões conforme França Junior (2017), onde o comprimento (eixo X) é de 6058mm, a largura (eixo Z) é 2438mm, e a altura (eixo Y) é de 2591mm. Além disso foi considerado, para o comportamento do material, regime elasto-plástico perfeito com módulo de elasticidade igual a 200GPa e tensão de escoamento igual a 345kN/m², conforme Giriunas, Sezen, Dupaix (2012).

As condições de contorno foram definidas como o container simplesmente apoiado, como mostrado na Figura 23, conforme efetuado por Giriunas, Sezen, Dupaix (2012).

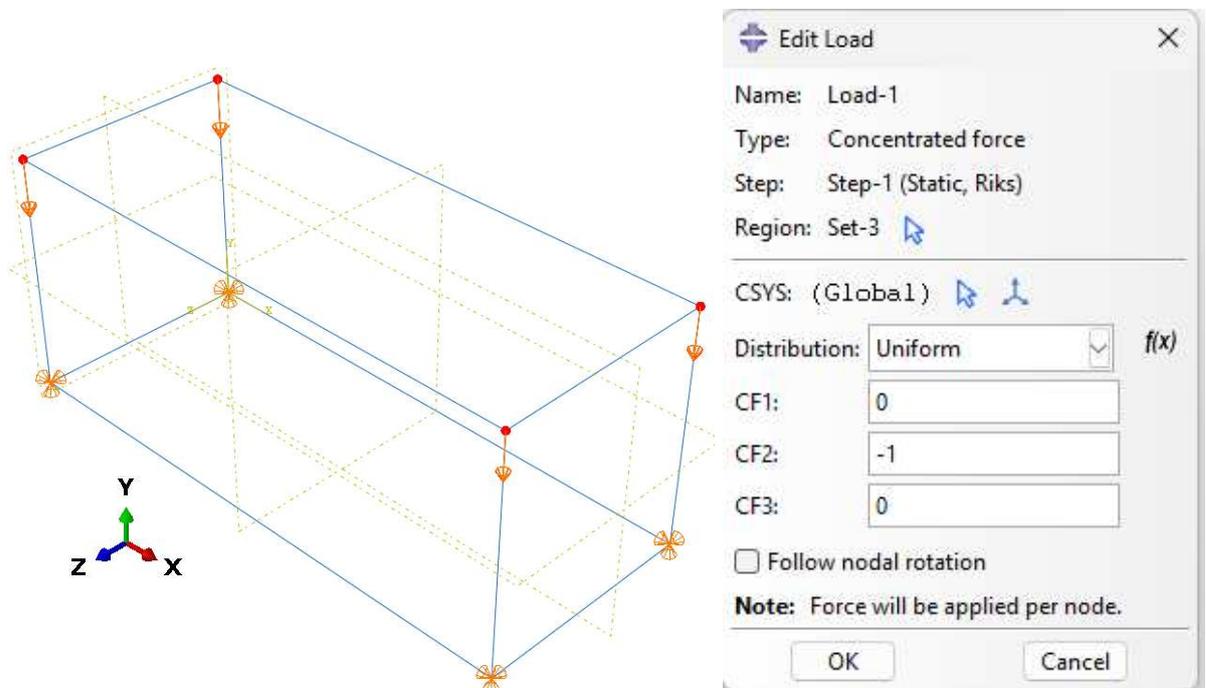
Figura 23 - Condições de contorno adotadas no estudo.



Fonte: Autor.

Já os carregamentos, foram definidos conforme Giriunas, Sezen, Dupaix (2012), dito como carregamento 1, mostrado na Figura 24.

Figura 24 – Carregamento adotado no estudo.



Fonte: Autor.

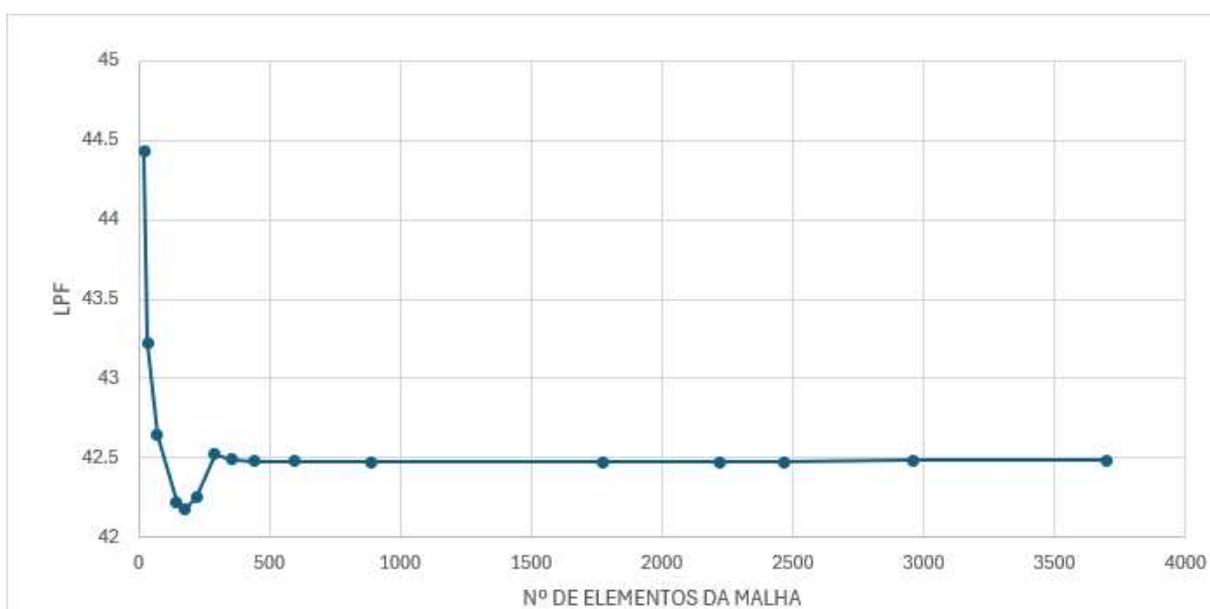
Foi adotado um carregamento estático unitário, pois durante a análise este será multiplicado por um fator alfa, no sentido negativo do eixo. Desta forma, os resultados

gerados pela análise de RIKS, ficará mais claro qual é o carregamento onde a estrutura irá atingir a falha.

4.1.2 Malha

Para definir a malha utilizada, foi realizado um estudo de refinamento da malha. Onde foi possível verificar qual a malha atenderia às expectativas de forma a utilizar menos recursos computacionais e tempo. A Figura 25 apresenta um gráfico que foi plotado levando em consideração o número de elementos finitos e o *LPF* (*load proportionality factor*) onde ocorre a falha da estrutura.

Figura 25 – Refinamento da malha dos elementos finitos B32 e B32OS.



Fonte: Autor.

Com a análise do gráfico, é possível entender que a partir de 500 elementos não há variações significativas, sendo todas menores que 0,1%. Desta forma, no estudo foi utilizada uma malha com 888 elementos, sendo o tamanho de 50mm, aproximadamente, para cada elemento B32 e B32OS.

4.2 CUFSM

As seções definidas por França e Junior (2017) foram submetidas às análises de estabilidade elástica no *software* CUFSM para obter propriedades geométricas e informações sobre os modos de flambagens que foram desconsideradas no método dos elementos finitos (MEF).

Desta forma, na utilização do programa foi utilizado para as medidas de força em Newton (N) e as medidas de comprimento em milímetros (mm). Sendo então considerado o modulo de elasticidade do aço e o coeficiente de Poisson conforme o adotado por Felipe (2021), presentes na tabela 2, e o modulo de elasticidade transversal foi calculado a partir destes dados. Sendo adotado os valores conforme a tabela 8

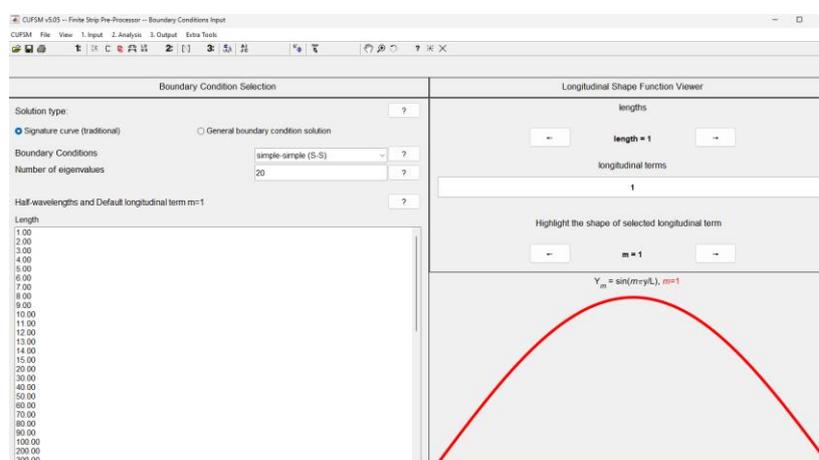
Tabela 8– Propriedades mecânicas do aço patinável.

E (GPa)	Coefficiente de Poisson (ν)	G(MPa)
200	0,3	78187.97

Fonte: Adaptado de Felipe (2021).

Além das propriedades geométricas, as seções foram definidas com cantos vivos, não havendo a discretização das curvas que liga cada lado delas. As barras foram consideradas como apoiadas em ambas as extremidades (*simple-simple [S-S]*), conforme mostra a Figura 26.

Figura 26 – Condições de contorno CUFSM



Fonte: Autor.

Os comprimentos de semi-ondas foram definidos de forma que houvesse a possibilidade de identificar nas curvas os valores de flambagem. Os carregamentos aplicados nas seções foram realizados de forma que elas obtivessem uma tensão de compressão unitária, tanto aqueles gerados pela compressão axial e pela flexão simples, em cada uma delas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os modelos descritos anteriormente, foi feito primeiro a análise por meio dos Métodos dos Elementos Finitos, desta forma, houve um entendimento sobre os esforços aos quais as seções estavam submetidas.

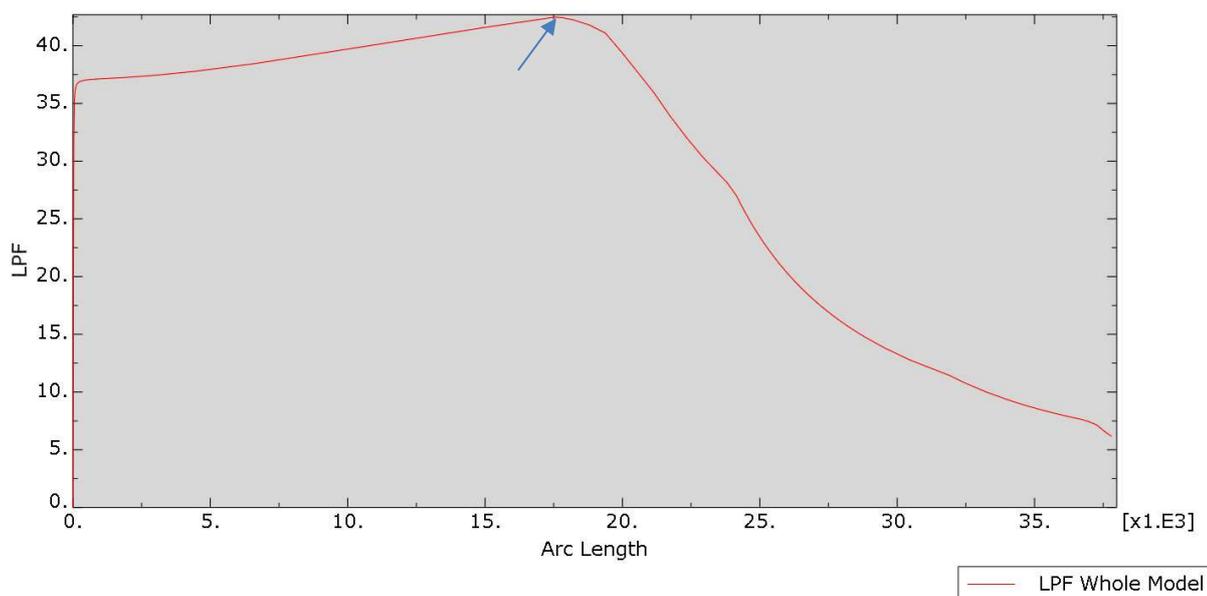
Em sequência, foi realizado os estudos utilizando o CUFSM onde foi analisado os modos de falhas por flambagem e a coleta desses dados para realizar os cálculos segundo a NBR 14762(2010).

Posteriormente, foi feito uma comparação dos resultados e dos métodos utilizados, para identificar as dificuldades apresentadas em cada etapa.

5.1 ABAQUS

Para analisar os resultados, inicialmente foi identificado o comprimento de arco onde há a falha da estrutura, como mostrado na Figura 27.

Figura 27 – LPF x Comprimento de arco.

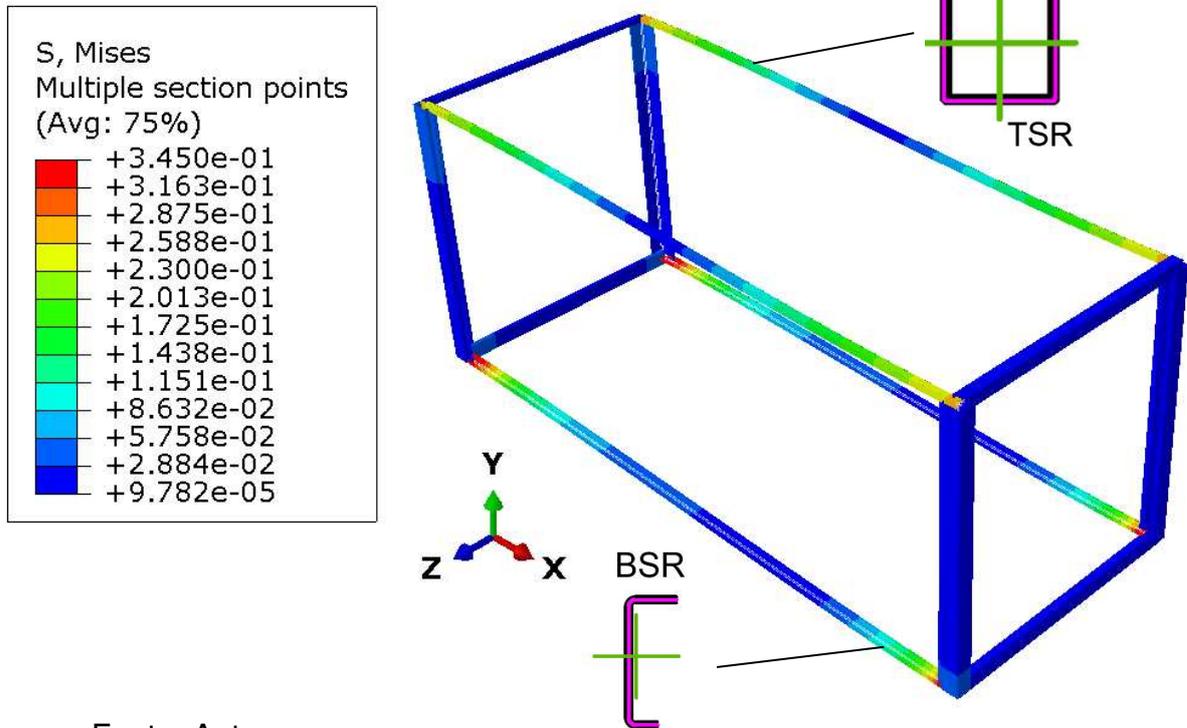


Fonte: Autor.

O ponto de pico no gráfico foi com o comprimento de arco 17534.53, gerando um valor de *load proportional factor* LPF de 42.47687. Como foram utilizadas quatro cargas pontuais, sendo aplicadas de forma unitária, entende-se que a falha ocorreu para um carregamento pontual de -42,47687kN (sentido gravitacional) em cada extremidade da estrutura. Desta forma, vale ressaltar que, todas as informações/resultados da simulação foram retiradas com o comprimento de arco onde houve a falha estrutural.

A primeira análise efetuada foi avaliar onde houve maior acúmulo de tensões, conforme mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Tensão de Von-Mises no momento da falha. Unidade: kN/mm²

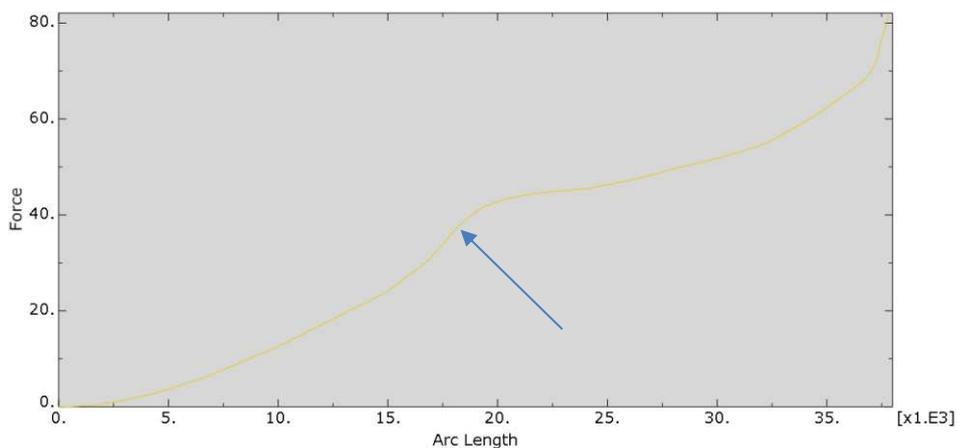


Fonte: Autor.

É percebido que há acúmulo de tensões nas vigas inferiores, sendo as seções BSR, em sua extremidade, e há um carregamento significativo nas vigas superiores, sendo as seções TSR, ocorrendo também nas extremidades.

Analisando a seção BSR na extremidade da inferior, há um esforço de tração com 35,51kN, como mostrado na Figura 29, onde está plotado o comportamento dessa seção variando de acordo com o comprimento do arco.

Figura 29 – Força x Comprimento de arco, extremidade do perfil BSR

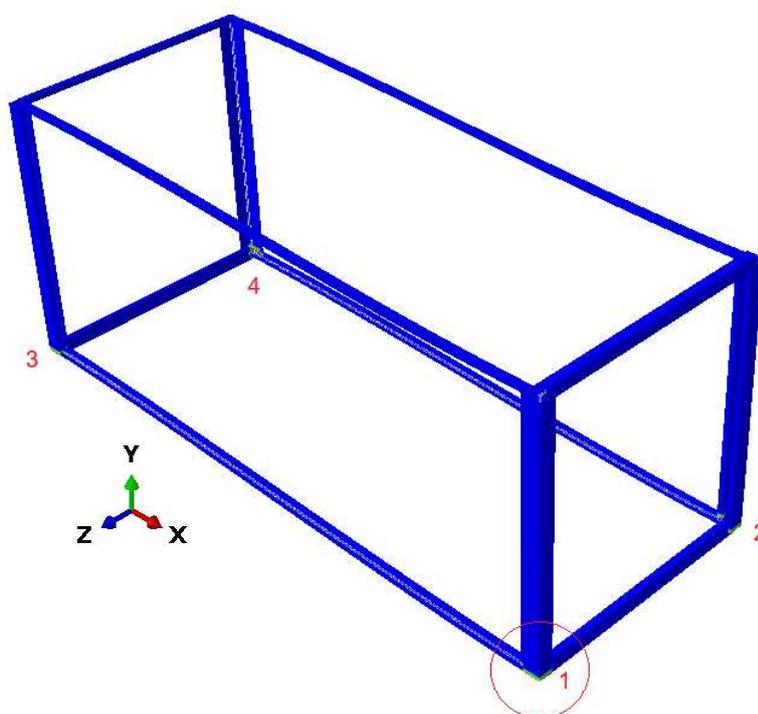


Fonte: Autor.

No estudo de Giriunas, Sezen, Dupaix (2012), onde foram analisadas várias situações de contêineres, os elementos mais resistentes foram as paredes de extremidades, e os elementos laterais não tiveram participação significativa. Deste modo, pode-se entender que pela ausência das paredes horizontais para auxiliar no suporte ao carregamento, as vigas de extremidade trabalharam praticamente sozinhas para resistir a este esforço.

Para entender os carregamentos aplicados, a Figura 30 mostra as reações de apoio e as tensões concentradas que estas geraram na extremidade as seções. Cada nó da estrutura onde há reação de apoio foi numerado, para que os valores das reações pudessem ser expressos no Quadro 5.

Figura 30 – Reações de apoio.



Fonte: Autor.

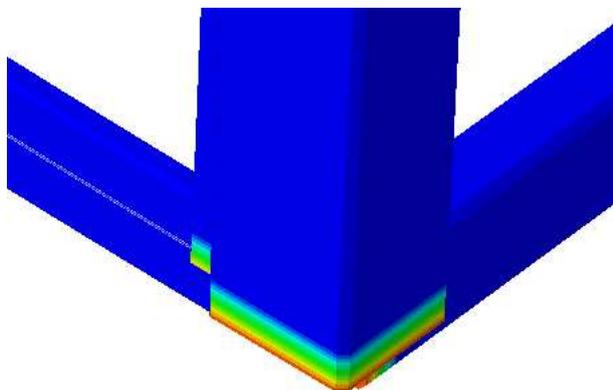
Quadro 5 – Reações de apoio para a situação de falha.

Nó	Reação de Apoio (kN)
1	40,61549
2	40,61214
3	44,29301
4	44,38684

Fonte: Autor.

Ainda na Figura 31 foi identificada uma região do nó 1 que está foi ampliada na Figura 31.

Figura 31 - Amplificação do nó 1.



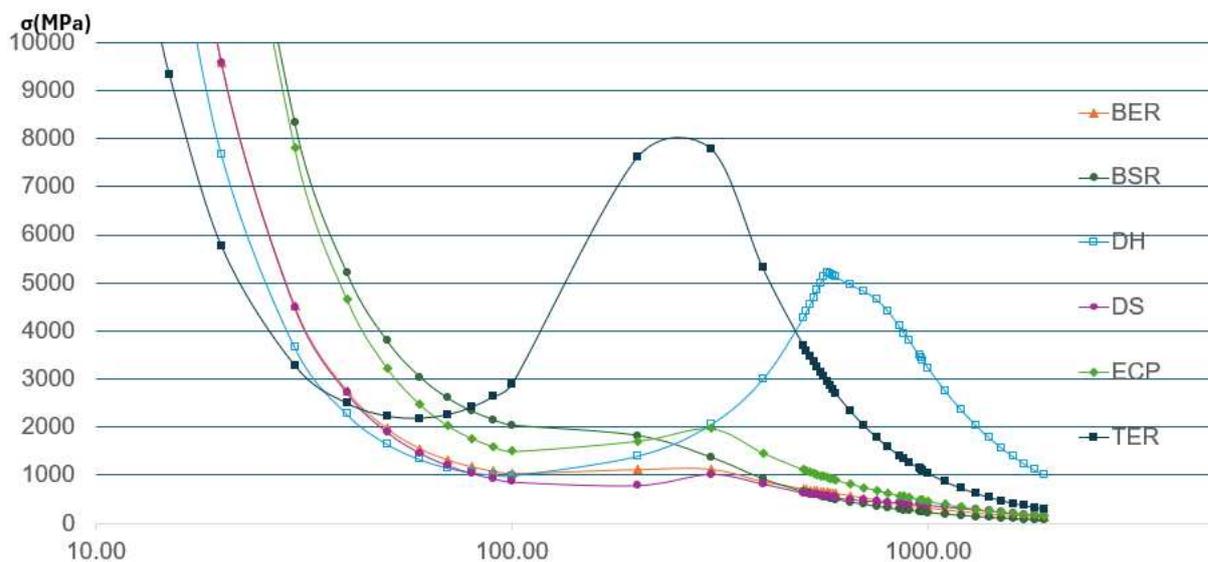
Fonte: Autor.

Na Figura 32, é possível entender que há um acúmulo de tensões nessa região, o que explica alguns reforços feitos por Giriunas, Sezen, Dupaix (2012) nas regiões das ligações. No entanto, essas seções não chegaram ao escoamento no presente estudo, sendo assim, não houve necessidade de reforços nas seções.

5.2 CUFSM

Inicialmente, foram analisadas todas as seções à compressão para obter os parâmetros de flambagem elástica local (N_l) e distorcional (N_{dist}). Desta forma, a Figura 32 plota o gráfico com as tensões geradas.

Figura 32 – Tensões geradas por compressão centrada obtidas pelo CUFSM.

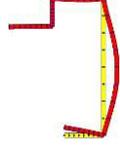
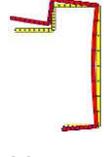
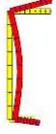
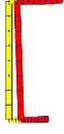
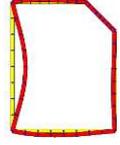
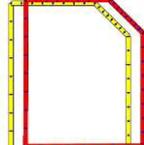
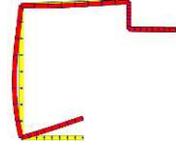
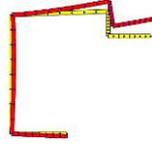
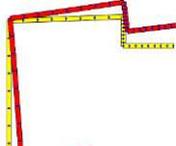
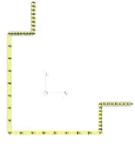
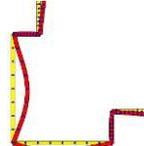
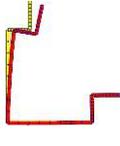
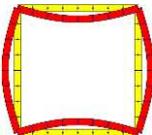
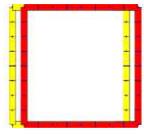


Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 32 foi gerado a partir da junção dos gráficos gerados no *software* CUFSM para cada seção isolada, onde, os pontos de mínimos existentes nos gráficos são avaliados para identificar nas seções onde ocorre flambagem e o tipo de flambagem.

Deste modo, o Quadro 6 identifica os pontos no gráfico onde há cada modo de flambagem para cada seção estudada.

Quadro 6 - Seções estudadas e seus modos de flambagens.

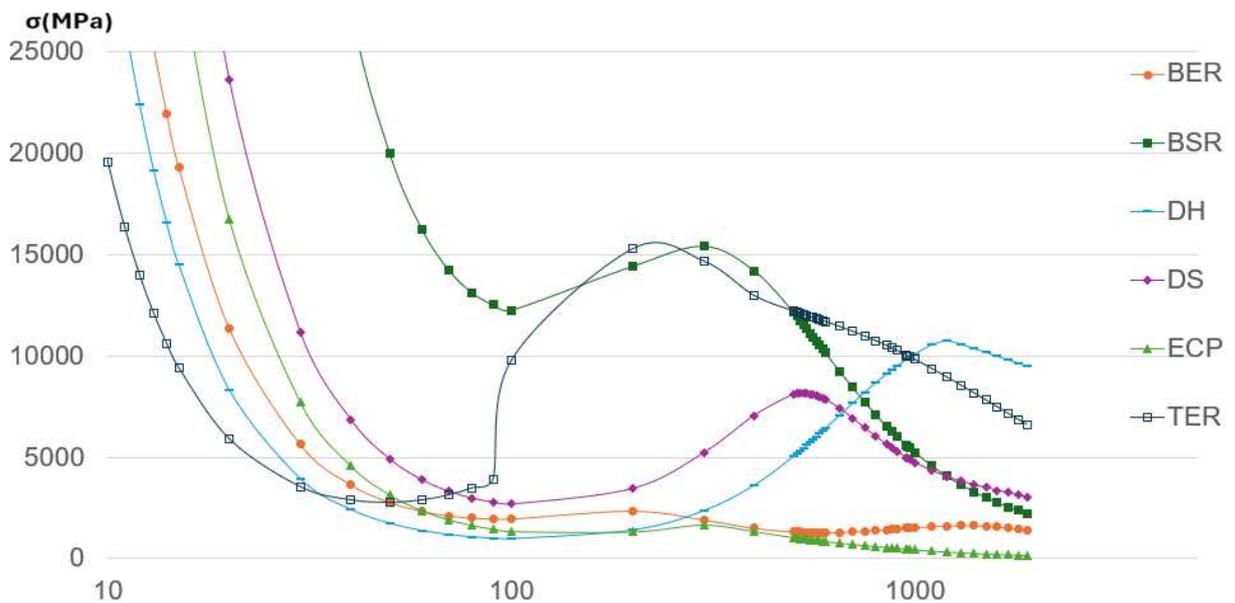
Seção	Flambagem Local	Flambagem Distorcional	Flambagem Global
 BER	 $N_l = 1023,69\text{kN}$	 $N_{dist} = \text{não localizado}$	
 BSR	 $N_l = \text{não localizado}$	Não se aplica	
 DH	 $N_l = 1561,53\text{kN}$	Não se aplica	
 DS	 $N_l = 1341,52\text{kN}$	 $N_{dist} = 536,36\text{kN}$	
 ECP	 $N_l = 4099,85\text{kN}$	 $N_{dist} = \text{não localizado}$	
 TSR e TER	 $N_l = 1625,02\text{kN}$	Não se aplica	

Fonte: Autor.

No Quadro 06, N_l trata-se da força axial de flambagem local e N_{dist} força axial de flambagem distorcional. Os valores N_e referentes ao modo global foram calculados de acordo com a ABNT NBR14762(2010), deste modo, não foi extraído nenhum valor referente a este efeito do CUFSM, somente as imagens que mostram como ele ocorre em cada seção, sendo todas retiradas no comprimento de semi-onda de 1600mm.

No seguimento do estudo, as seções foram submetidas a um carregamento de flexão em relação ao eixo horizontal, considerando que todas foram modeladas no CUFSM de forma a representar o eixo que estaria sujeito ao momento fletor no modelo descrito no ABAQUS. Assim, obteve-se o gráfico de tensões apresentado na Figura 33.

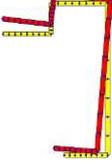
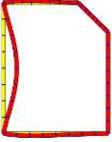
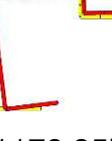
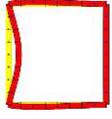
Figura 33– Tensões geradas por momento fletor obtidas pelo CUFSM.



Fonte: Autor.

Da mesma forma que ocorreu na compressão, a identificação dos pontos mínimos no CUFSM auxilia a identificar os momentos críticos das seções, de acordo com o Quadro 7.

Quadro 7 - Seções estudadas e suas flambagens.

Seção	Flambagem Local	Flambagem Distorcional	Flambagem Global
 <p>BER</p>	 <p>$M_l = 31,50\text{kN.m}$</p>	 <p>$M_{dist} = 20,71\text{kN.m}$</p>	 <p>$M_e = 22,46\text{kN.m}$</p>
 <p>BSR</p>	 <p>$M_l = 5,28\text{kN.m}$</p>	Não se aplica	 <p>$M_e = 17,57\text{kN.m}$</p>
 <p>DH</p>	 <p>$M_l = 61,44\text{kN.m}$</p>	Não se aplica	 <p>$M_e = 603,17\text{kN.m}$</p>
 <p>DS</p>	 <p>$M_l = 100,72\text{kN.m}$</p>	Não localizado	 <p>$M_e = 1178,35\text{kN.m}$</p>
 <p>ECP</p>	 <p>$M_l = 122,33\text{kN.m}$</p>	$M_{dist} = \text{não localizado}$	 <p>$M_e = 23,56\text{kN.m}$</p>
 <p>TSR e TER</p>	 <p>$M_l = 39,50\text{kN.m}$</p>	Não se aplica	 <p>$M_e = 111,29\text{kN.m}$</p>

Fonte: Autor.

Novamente, houve seções onde não foi possível localizar o momento responsável pela flambagem distorcional, no entanto, a única seção onde na compressão houve essa localização, agora com a aplicação de momento, não foi possível achar nenhum caso em que este foi predominante. Desta forma, não foi possível imprimir nenhuma seção onde fica claro o efeito da flambagem distorcional ocorrendo na seção.

Ainda, comparando com o carregamento de compressão, por serem seções particulares, optou-se por adquirir os momentos de flambagem global (M_e) diretamente pelo *software*, mesmo este não apresentando um mínimo para este caso.

Além das forças e momentos obtidos nesta etapa, com o desenho das seções, foi gerado também uma tabela com as propriedades geométricas das seções transversais analisadas – isso porque, com as aproximações das bordas, as propriedades das seções tiveram pequenas mudanças. Sendo as propriedades descritas nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Área (A), cetroide(x e y), centro de torção das seções (x_o e y_o) e raio de giração(r_x e r_y).

Perfil	$A(\text{mm}^2)$	$x(\text{mm})$	$Y(\text{mm})$	$x_o(\text{mm})$	$y_o(\text{mm})$	$r_x (\text{mm})$	$r_y(\text{mm})$
ECP	2974.965	61.07	67.43	-76.9918	-89.05	69.18777	65.06144
DH	1833.738	50.51	64.86	0	0	51.68855	43.49316
TER	741.1089	28.4	29.65	0	0	24.10978	23.34335
TSR	741.1089	28.4	29.65	0	0	24.10978	23.34335
BER	1411.029	77.19	87.89	39.1883	57.2342	53.07456	29.25008
BSR	1115.947	7.41	65.81	-17.4469	24.4246	44.35504	11.25724
DS	1668.934	44.85	87.75	-69.4923	51.2268	52.35618	48.56778

Fonte: Autor.

Na Tabela 9, foi apresentado a área das seções, as coordenadas do seu centroide, considerando que o ponto na sua extremidade inferior esquerda é a origem, e a distância do centroide até o centro de torção das mesmas. Também foi expresso o raio de giração das seções.

Tabela 10 - Momento de inercia maior (I_x e I_y), constante de torção (J), raio de giração polar (r_0) e constante de empenamento (C_w)

Perfil	$I_x(\text{mm}^4)$	$I_y(\text{mm}^4)$	$J(\text{mm}^4)$	$r_0(\text{mm})$	$C_w(\text{mm}^6)$
ECP	14241000	12593000	35169.7	151.2534	13351400000
DH	4899210	3468800	6593940	67.55266	-
TER	430793	403839	625394	33.55881	-
TSR	430793	403839	625394	33.55881	-
BER	3974740	1207230	9471.89	92.10838	1682310000
BSR	2195480	141419	13202.9	54.72706	223210000
DS	4574830	3936730	11120	112.0418	4773080000

Fonte: Autor.

Na tabela 10, está apresentado os momentos de inercia das seções, suas constantes de torção e empenamento e seu raio de giração polar.

5.3 ABNT NBR 14762 (2010) - MRD

Devido a não existência de normas brasileiras para contêineres, foi utilizado a norma brasileira para perfis formados a frio, ABNT NBR 14762(2010), em especial o anexo C que tem contém o Método da Resistência Direta (MRD).

Os valores resistentes de cada seção foram calculados conforme a ABNT NBR 14762(2010), por meio do MRD, com o auxílio de uma planilha eletrônica desenvolvida para esse fim. Nessa planilha, foram inseridas as equações previstas na norma, além dos dados de entrada necessários para a realização dos cálculos.

Inicialmente, foi realizado o cálculo das forças de flambagem elástica global, utilizando as seguintes equações, retiradas da ABNT NBR 14762 (2010):

$$Eq. 1: N_{ex} = \frac{\pi^2 * I_x * E}{(K_x L_x)^2}$$

$$Eq. 2: N_{ey} = \frac{\pi^2 * I_y * E}{(K_y L_y)^2}$$

$$Eq. 3: N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} * \left(\frac{\pi * E * C_w}{(K_z L_z)^2} + G * J \right)$$

Onde:

- I_x e I_y são os momentos de inercia da seção bruta em relação aos eixos X e Y;

- N_{ex} e N_{ey} são forças axiais de flambagem global elástica por flexão em relação aos eixos X e Y;
- N_{ez} é força axial de flambagem global elástica por torção;
- $K_x L_x$ e $K_y L_y$ são comprimentos efetivos de flambagem global em relação aos eixos X e Y;
- $K_z L_z$ é comprimento efetivo de flambagem global por torção;
- r_o é raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção;
- E é módulo de elasticidade do aço;
- C_w é coeficiente de empenamento da seção;
- G é módulo de elasticidade transversal do aço;
- J é coeficiente de torção.

Com estes valores, deve-se separar as seções, pois há simetria nas seções TER e TSR, desta forma, o valor de N_e será definido como o menor entre os três calculados anteriormente. As demais seções devem seguir a equação 4.

$$Eq. 4: r_o^2 (N_e - N_{ex})(N_e - N_{ey})(N_e - N_{ez}) - N_e^2 (N_e - N_{ey})x_o^2 - N_e^2 (N_e - N_{ex})y_o^2 = 0$$

Onde:

- N_{ex} e N_{ey} são forças axiais de flambagem global elástica por flexão em relação aos eixos X e Y;
- N_{ez} é força axial de flambagem global elástica por torção;
- r_o é raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção;
- N_e é força axial de flambagem global.

Deste modo, seguem os resultados das seções estudadas na tabela 11.

Tabela 11 - Força de flambagem elástica global.

Perfil	N_e (kN)	N_{ex} (kN)	N_{ey} (kN)	N_{ez} (kN)
ECP	167,4912	4187,066	3702,529	170,2062
DH	1613,931	1626,907	1151,903	108644,7
TER	134,105	143,0558	134,105	41753,15
TSR	21,7197	23,16937	21,7197	41753,15
BER	81,93297	1319,913	400,8914	104,9043
BSR	7,364868	118,0797	7,605948	332,7226
DS	100,5179	1519,189	1307,291	106,7948

Fonte: Autor.

Com estes valores, é possível seguir o cálculo para o Método da Resistência Direta, como apresentado em norma.

5.3.1 Compressão centrada

Inicialmente é realizado o procedimento normativo para o cálculo das barras submetidas a compressão centrada, sendo separado em três situações de cálculo.

Na situação de flambagem global por flexão, torção ou flexo-torção será utilizado as Equações 5 a 7.

$$Eq. 5: \lambda_o = \left(\frac{A * f_y}{N_e} \right)^{0,5}$$

$$Eq. 6: N_{c,re} = 0,658 \lambda_o^2 * A * f_y - para \lambda_o \leq 1,5$$

$$Eq. 7: N_{c,re} = \frac{0,877}{\lambda_o^2} * A * f_y - para \lambda_o > 1,5$$

Onde:

- λ_o é índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global;
- N_e é força axial de flambagem global;
- $N_{c,re}$ é valor característico da força axial de compressão resistente, associado a flambagem global;
- A é área da seção bruta;
- f_y é resistência ao escoamento do aço.

Com seguimento no cálculo, é considerada a flambagem local da barra, aplicando as seguintes formulações matemáticas (Equações 8 a 10).

$$Eq. 8: \lambda_l = \left(\frac{N_{c,re}}{N_l} \right)^{0,5}$$

$$Eq. 9: N_{c,rl} = N_{c,re} - para \lambda_l \leq 0,776$$

$$Eq. 10: N_{c,rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}} \right) * \frac{N_{c,re}}{\lambda_l^{0,8}} - para \lambda_l > 0,776$$

Onde:

- λ_l é índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local;
- $N_{c,re}$ é valor característico da força axial de compressão resistente, associado a flambagem global;
- $N_{c,rl}$ é valor característico da força axial de compressão resistente, associado a flambagem local.

A flambagem distorcional será calculada com as Equações 11 a 13.

$$Eq. 11: \lambda_{dist} = \left(\frac{A * f_y}{N_{dist}} \right)^{0,5}$$

$$Eq. 12: N_{c,rdist} = A * f_y - \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,561$$

$$Eq. 13: N_{c,rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}} \right) * \frac{A * f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}} - \text{para } \lambda_{dist} > 0,561$$

Onde:

- A é área da seção bruta;
- f_y é resistência ao escoamento do aço.
- λ_{dist} é índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional;
- $N_{c,rdist}$ é valor característico da força axial de compressão resistente, associado a flambagem distorcional;
- N_{dist} é força axial de flambagem distorcional elástica.

Sendo assim, foram realizados os cálculos para todas as seções presentes na estrutura do contêiner, sendo representados na Tabela 12 e os modos críticos apresentados na Tabela 13.

Tabela 12 - Forças de flambagem devido ao esforço de compressão centrada

Perfil	λ_o	$N_{c,re}$ (kN)	λ_l	$N_{c,rl}$ (kN)	λ_{dist}	$N_{c,rdist}$ (kN)
ECP	78,2807	146,89	0,1893	146,89	-	-
DH	19,7987	1415,42	0,9521	1242,47	-	-
TER	43,6645	117,61	0,2690	117,61	-	-
TSR	108,4985	19,05	0,1083	19,05	-	-
BER	77,0811	71,86	0,2649	71,86	-	-
BSR	228,6382	6,45	-	-	-	-
DS	75,6846	88,15	0,2563	88,15	32,7643	8712,13

Fonte: Autor.

Tabela 13 - Forças de flambagem crítica devido ao esforço de compressão centrada

Perfil	$N_{c,rk}$ (kN)	Modo Crítico
ECP	146,89	Global
DH	1242,47	Local
TER	117,61	Global
TSR	19,05	Global
BER	71,86	Global
BSR	6,45	Global
DS	88,15	Global

Fonte: Autor.

Após o cálculo de todas as seções, observa-se que com exceção da seção DH, que tem como crítico a flambagem local, todas as outras tiveram como crítico o modo de flambagem global.

5.3.2 Flexão Simples

Ainda de acordo com a ABNT NBR 14762 (2010), apresenta-se a situação de cálculo para flexão simples. Para isso, o procedimento de cálculo é novamente dividido em três partes para o cálculo e representados novamente via tabela.

Primeiramente, foi calculado a flambagem lateral com torção, utilizando as Equações 14 à 17.

$$Eq. 14: \lambda_o = \left(\frac{W * f_y}{M_e} \right)^{0,5}$$

$$Eq. 15: M_{re} = W * f_y - \text{para } \lambda_o \leq 0,6$$

$$Eq. 16: M_{re} = 1,11(1 - 0,278 * \lambda_o^2)W * f_y - \text{para } 0,6 < \lambda_o < 1,336$$

$$Eq. 17: M_{re} = \frac{W * f_y}{\lambda_o^2} - \text{para } \lambda_o \geq 1,336$$

Onde:

- λ_o é índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global;
- M_e é momento fletor de flambagem global elástica
- M_{re} é valor característico do momento resistente associado a flambagem global;

- W é módulo de resistência elástico da seção bruta em relação a fibra extrema que atinge o escoamento;
- f_y é resistência ao escoamento do aço.

Para o cálculo da flambagem local, foi considerado as seguintes fórmulas (Equações 18 a 20).

$$Eq. 18: \lambda_l = \left(\frac{M_{re}}{M_l} \right)^{0,5}$$

$$Eq. 19: M_{rl} = M_{re} - \text{para } \lambda_l \leq 0,776$$

$$Eq. 20: M_{rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}} \right) * \frac{M_{re}}{\lambda_l^{0,8}} - \text{para } \lambda_l > 0,776$$

Onde:

- λ_l é índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local;
- M_l é momento fletor de flambagem local elástica
- M_{rl} é valor característico do momento resistente associado a flambagem local;

Considerando agora a flambagem distorcional, utilizará as equações 21 a 23.

$$Eq. 21: \lambda_{dist} = \left(\frac{W * f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5}$$

$$Eq. 22: M_{rdist} = W * f_y - \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,673$$

$$Eq. 23: M_{rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}} \right) * \frac{W * f_y}{\lambda_{dist}} - \text{para } \lambda_{dist} > 0,673$$

Onde:

- λ_{dist} é índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional;
- M_{dist} é momento fletor de flambagem global distorcional;
- M_{rdist} é valor característico do momento resistente associado a flambagem distorcional;
- W é módulo de resistência elástico da seção bruta em relação a fibra extrema que atinge o escoamento;
- f_y é resistência ao escoamento do aço.

Então, com essas equações, foi montado a Tabela 14, com os valores resistentes para todas as seções, e na Tabela 15, os valores e modos críticos de flambagem.

Tabela 14 - Momentos de flambagem devido ao esforço de flexão simples

Perfil	λ_o	M_{re} (kN.m)	λ_l	M_{rl} (kN.m)	λ_{dist}	M_{rdist} (kN.m)
ECP	55,6196	23,55	0,4388	23,55	-	-
DH	6,5730	603,17	3,1333	227,35	-	-
TER	6,7111	111,29	1,6785	66,25	-	-
TSR	6,7111	111,29	1,6785	66,25	-	-
BER	26,3569	22,46	0,8445	21,30	27,4453	563,93
BSR	25,5964	17,57	0,5770	17,57	-	-
DS	3,9069	1178,35	3,4204	415,86	-	-

Fonte: Autor.

Tabela 15 - Momentos de flambagem crítica devido ao esforço de flexão simples

Perfil	M_{rk} (kN.m)	Modo Crítico
ECP	23,55	Global
DH	227,35	Local
TER	66,25	Local
TSR	66,25	Local
BER	21,30	Local
BSR	17,57	Global
DS	415,86	Local

Fonte: Autor.

Com o carregamento escolhido no trabalho, as seções não apresentam momentos significativos. No entanto, caso mude o tipo de carregamento, como as opções apresentadas por Giriunas, Sezen, Dupaix (2012), ou condições de contorno, estes podem aparecer combinados com a compressão, para a combinação destes esforços, ABNT NBR 14762(2019) deve ser consultada.

5.4 ABAQUS x CUFSM x MRD

Utilizando o *ABAQUS*, foi possível ter um entendimento global de como a estrutura se comporta devido ao carregamento aplicado e as condições de contorno. Assim, facilita o seguimento das etapas de cálculo pelo *CUFSM* e pelo MRD, pois já se sabe qual esforço atua em cada seção.

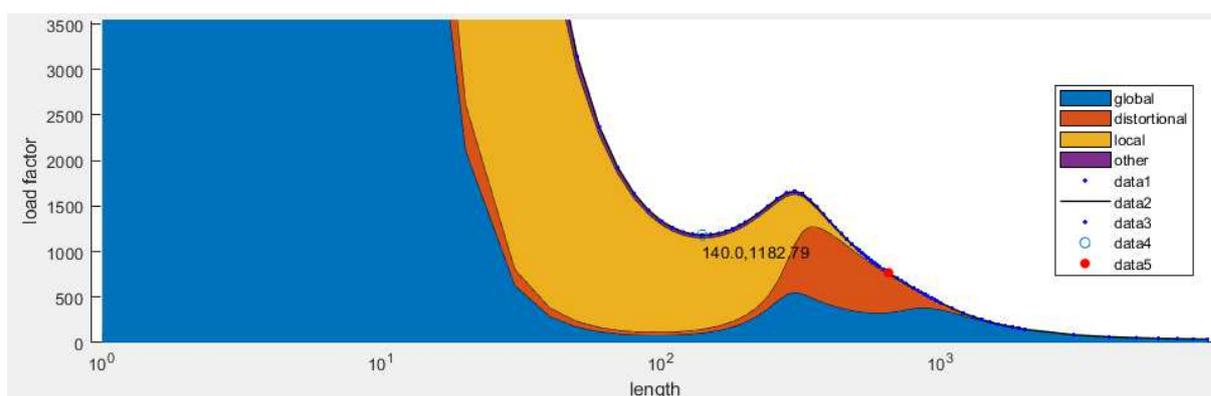
No entanto, a utilização do método dos elementos finitos se limitou a análise global da estrutura, não levando em consideração as falhas locais e distorcionais que as seções podem apresentar.

Com a utilização do *CUFSM*, foi possível entender o comportamento local das seções, sem levar em consideração as particularidades globais. Então, utilizando apenas este método, não seria possível entender a estrutura por completo.

Ainda vale ressaltar que as seções incomuns dificultam o estudo, de modo que estas não eram predefinidas nos *softwares* utilizados. Isto gera simplificações nas regiões onde há dobras nos perfis, sendo que essa discretização resultaria em mais dificuldades.

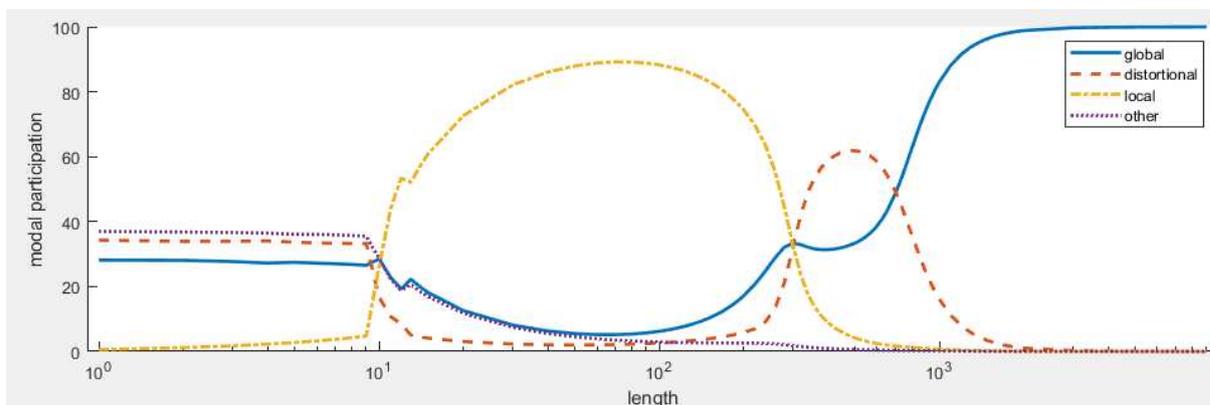
Devido as seções incomuns, foi visto nas análises que há participação e consideração do modo distorcional, mas não há ponto crítico, como exemplificado na Figura 34 e 35.

Figura 34 – Tensão (MPa) x Comprimento de Semi-onda, classificando o modo de flambagem participante, na seção ECP.



Fonte: Autor.

Figura 35 – Modo de flambagem x Comprimento de Semi-onda, na seção ECP.



Fonte: Autor.

Ilustra-se que há grande participação do modo de flambagem distortional na seção ECP. Contudo, este modo não chega a ser crítico, então não há falha na seção devido a ele. Este fenômeno também ocorreu em outras seções, onde é possível identificar a participação do modo de flambagem, no entanto não há um ponto crítico, como mostrado nos Quadros 06 e 07 nos quais as forças foram definidas como não localizadas.

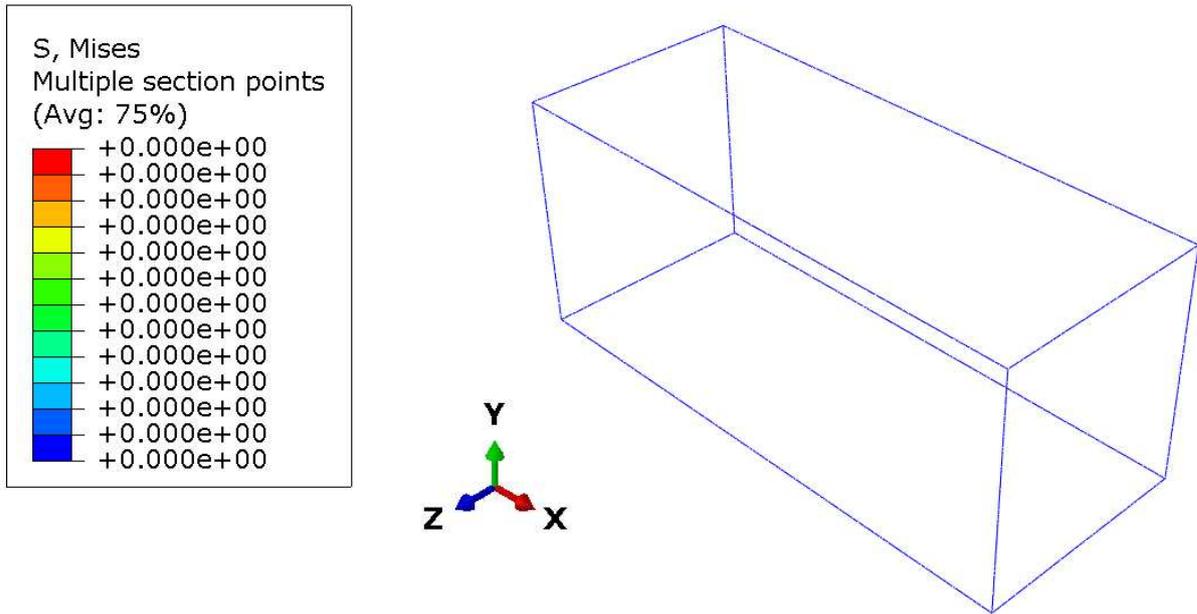
As seções apresentadas por França Junior (2017) não possuem método de cálculo normalizado para obter os valores das forças axiais de flambagem global, local e distortional. Então, para aplicar o Método da Resistência Direta (MRD) seria necessário a utilização de um método para auxiliar essa análise. Os valores dessas forças foram obtidos pelo CUFMS. Deste modo, este método leva em consideração as resistências globais, locais e distortionais de cada seção.

Ao final dos resultados, foi possível compreender que as seções sem simetria possuem complicações para serem calculadas pela norma brasileira, pois, está não traz valores definidos para qualquer seção, ou métodos de cálculos para obter propriedades. A partir disso, a utilização de outros métodos para auxiliarem são necessários.

Ademais, compreendeu-se a necessidade de maior refinamento da estrutura detalhada para o Método dos Elementos Finitos e para o método das faixas finitas. Isso se dá pois quanto melhor a discretização das partes da estrutura, mais os resultados se aproximam da realidade.

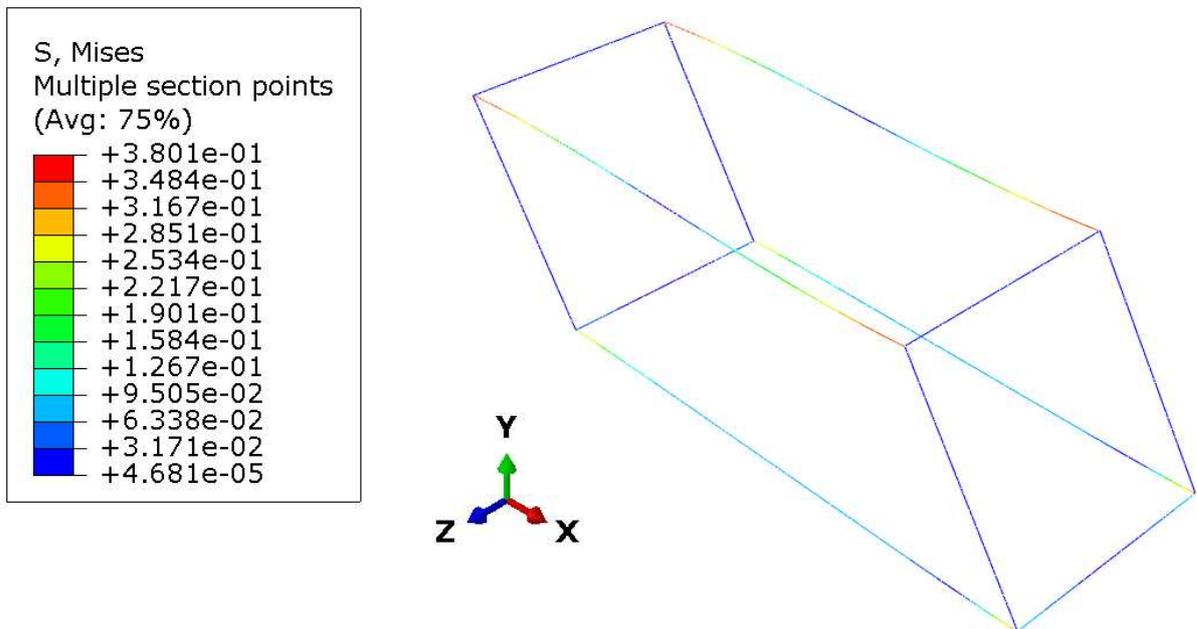
Não foi possível gerar uma comparação entre os valores obtidos em norma e via MEF, pois a estrutura no *ABAQUS* apresentou grandes deslocabilidades, como pode ser observado ao comparar as Figuras 36 e 37.

Figura 36 - Condição inicial do contêiner. Unidades (kN/mm²)



Fonte: Autor.

Figura 37 – Condição final após aplicação dos carregamentos. Unidades (kN/mm²)



Fonte: Autor.

Assim, pelo MEF, não ocorreu falha devido as compressões. Porém, ocorreram falhas devido aos esforços de tração que apareceram na estrutura. Enquanto, pelo MRD, foi analisada a capacidade de suporte devido a flexão e compressão da estrutura.

6 CONCLUSÕES

Com o estudo do contêiner escolhido, foi possível entender que a norma brasileira ABNT NBR 14762(2010) apresentou uma capacidade inferior ao valor apresentado pelo método dos elementos finitos (MEF).

A falha no MEF foi observada na seção BSR, com o valor de tração de 35,51kN, já pelo procedimento normativo, obteve-se o valor de compressão de 6,46kN como o resistente. De modo geral, não foi possível gerar uma comparação direta entre os dois métodos, pois as falhas ocorreram de modos distintos. Ainda assim, vale ressaltar, que pelo modelo do ABAQUS houve simplificações em relação aos modos locais e distorcionais que não são avaliados pelos elementos finitos B32 e B32-OS. No entanto, essas simplificações não geraram impactos nos resultados, pois as falhas no MEF foram a tração.

O estudo MFF mostrou-se complementar ao estudo via MEF, pois este analisa as resistências locais e distorcionais. Além disso, as análises via MFF apresentam aplicação direta junto ao MRD, facilitando a obtenção de previsões normativas de capacidade resistente da estrutura.

Não foram considerados os elementos de ligações presentes nos encontros das barras. Para gerar melhores conclusões, considerando que esta é a região em que há falha dos elementos, seria necessário um estudo mais detalhado. Outra possibilidade seria incrementar reforços nestes pontos de acúmulo de tensões, como nos estudos de Giriunas, Sezen, Dupaix (2012).

Além das seções BSR, que chegaram ao escoamento, este trabalho também pôde explorar os procedimentos normativos brasileiros e auxiliar no desenvolvimento de trabalhos futuros que dizem respeito a contêineres marítimos reaproveitados.

6.1 Trabalhos futuros

Com o encerramento deste trabalho, abre-se portas para novas pesquisas na área a partir deste. Os modelos dispunham de simplificações e estes podem ser refinados. Além disso, vale ressaltar os diversos modelos e carregamentos que podem ser gerados, alguns mostrados no trabalho de Giriunas, Sezen, Dupaix (2012). Mas não se prendendo somente a estes, há diversas disposições arquitetônicas que podem ser incrementadas, também reforços na estrutura para que possam atender novas especificações.

Para isso, segue separado no Quadro 8, trabalhos que podem aprimorar este estudo.

Quadro 8 - Ideias de trabalhos futuros.

Inserir chapas de fechamento na estrutura	Os artigos utilizados de referência neste estudo deixam claro a importância das chapas de fechamento na resistência do contêiner, desta forma, considerá-las por completo, ou com furos específicos, trará informações válidas para o estudo de viabilização destes elementos na construção civil
Inserir conectores	Os conectores podem ser inseridos no modelo do MEF. Desta forma, pode ser que a falha não apareça na extremidade das barras, gerando novos resultados para ser comparados com os normativos
Estudo específico de cada seção do contêiner	Como são seções fora dos padrões comerciais utilizados na construção civil, há poucas informações em literatura sobre elas. Desta forma, pode-se explorar as seções utilizando o MEF ou até mesmo um estudo mais refinado dispondo do CUFSM.
Inserir os demais perfis do contêiner.	Há perfis nos contêiners além dos considerados, como as portas, estruturas de travamento inferior. Estes podem ser inseridos para entender o comportamento da estrutura.
Modificar o carregamento	Além do carregamento utilizado neste trabalho, é possível inserir diversos outros carregamentos na estrutura e entender o seu comportamento, gerando a necessidade, talvez, de até mesmo considerar seções em flexo-compressão, gerando assim, a necessidade de aprimorar os cálculos realizados com a ABNT NBR 14761(2010)
Mesclar os trabalhos e ideias existentes	Além de todos citados acima, é possível combinar estes da forma que for desejada, sendo possível adicionar chapas, conectores, novos carregamentos, reforços a estrutura, gerando um grau elevado de complexidade ao estudo.

Fonte: Autor.

Estes são trabalhos que complementaríamos este estudo, no entanto, não são os únicos possíveis, pois, ao conseguir esgotar os estudos dos contêineres marítimos,

será possível ainda estudar a combinação deles gerando edifícios com arquiteturas únicas, abrindo novamente a porta para novos estudos.

REFERÊNCIAS

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

BRANQUINHO, M.A *et al.* Stability analysis of unbraced steel storage racks: discussions an alternatives. **Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council**, St. Louis, Missouri, p. 1-20, 2 abr. 2019.

CALIL JUNIOR, Carlito. Utilização da Madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 1, ed. 1, p. 71-77, 1997.

CBCA. **Manual de Construção em aço: Construção Modular.** [S. L.]: CBCA. Anual. Disponível em: <https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/> . Acesso em: 05 out. 2024.

FRANÇA JUNIOR, Adelmo Magalhães de. **Análise Estrutural de contêineres marítimos utilizados em edificações.** Orientador: Flávio Teixeira de Souza. 2017. 156 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

FELIPE, Yasmine Luz. **Análise Estrutural via Método dos Elementos Finitos de Reforços em contêineres ISO reutilizados na construção civil.** Orientador: Flávio Teixeira de Souza. 2021. 90 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

GIRIUNAS, K. A. **Evaluation, modeling, and analysis of shipping container building structures.** - Tese (Engenharia Civil), The Ohio State University, Ohio, 2012.

GIRIUNAS, K.; SEZEN, H.; DUPAIX, R.B. Evaluation, modeling, and analysis of shipping container buildings structures. **Engineering Structures.** Columbus, 2012. 43: p 48-57.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 1990, **ISO 1496-1 - Series 1 freight containers - Specification and testing - Part 1: General cargo containers for general purposes**. Genebra, 1990. 89 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 2013, **ISO 668 - Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings**. Genebra, 2013.

Schafer, B.W., Ádány, S. **Buckling analysis of cold- formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods**. Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, FL. October 2006.

ZUO, Yang; ZHA, Xiaoxiong. FEM and Experimental Study on Mechanical Property of Integrated Container Building. **International Journal of Steel Structures**, [S. l.], p. 699-718, 30 abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0065-3>. Acesso em: 10 jun. 2024.