

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LEANDRO SZCZEREPA

**VALIDAÇÃO DA GEOMETRIA DE UMA LONGARINA UTILIZADA EM UMA
ESTRUTURA DE PORTA PALLET METÁLICO ATRAVÉS DA
NORMA ABNT NBR 14762:2010**

PONTA GROSSA

2022

LEANDRO SZCZEREP

**VALIDAÇÃO DA GEOMETRIA DE UMA LONGARINA UTILIZADA EM UMA
ESTRUTURA DE PORTA PALLET METÁLICO ATRAVÉS DA
NORMA ABNT NBR 14762:2010**

**Validation of the geometry of a beam used in a metallic pallet holder structure
according to ABNT NBR 14762:2010**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Villaca Santos.

PONTA GROSSA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LEANDRO SZCZEREPA

**VALIDAÇÃO DA GEOMETRIA DE UMA LONGARINA UTILIZADA EM UMA
ESTRUTURA DE PORTA PALLET METÁLICO ATRAVÉS DA
NORMA ABNT NBR 14762:2010**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 28/06/2022

Rodrigo Villaca Santos.
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Alexandre De Castro Alves
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roger Navarro Verástegui
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar mais esta oportunidade em minha vida e me proporcionar saúde mental e física para conseguir completar meus objetivos diários e iluminar meu caminho. Aos meus queridos pais, Micleslau Szczerepa Filho e Elaine Maria Szczerepa, pela existência e todo o apoio que proporcionaram em minha vida pessoal e profissional. Agradeço a minha namorada Emilene Simone de Lima por todo suporte e apoio. Agradeço as minhas irmãs Caroline e Leticia Szczerepa pelo apoio. Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Villaca. Agradeço aos meus colegas e professores da UTFPR com quem vivenciei esse período prazeroso. Agradeço aos meus amigos que me deram grande suporte e a empresa a qual o trabalho foi idealizado.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

A possibilidade de aplicação do aço em larga escala no Brasil, só foi possível com o início das atividades da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) em 1946. O aço apresenta diversas vantagens quando comparado a outros materiais, como leveza, precisão e rapidez na montagem. Além disso, pode ser utilizado em várias aplicações, como sistemas de armazenagem industrial, dentre estes o porta pallet, o qual utiliza perfis formados a frio. Com a pandemia do coronavírus, o preço do aço subiu, com isto o dimensionamento correto de uma estrutura é de fundamental importância para uma empresa gerir seus custos mantendo-se competitiva no mercado. No Brasil, o dimensionamento desses perfis é feito por meio das prescrições da norma ABNT NBR 14762:2010. Dessa forma é avaliado no presente trabalho o dimensionamento de uma longarina de um porta pallet. Para tanto, foram realizadas análises teóricas utilizando equações analíticas de estática, como o critério da resistência (início de escoamento da seção efetiva, flambagem lateral com torção e flambagem distorcional) e o critério da flecha máxima. Em paralelo foi realizado a simulação estrutural computacional através do método dos elementos finitos. Por fim, os resultados dos esforços solicitantes foram comparados com os resultados dos esforços resistentes, onde a longarina analisada atendeu aos requisitos da norma.

Palavras-chave: Perfil formado a frio, Porta pallet, Estrutura metálica, Dimensionamento.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Porta pallet.....	15
Figura 2 - Variação do preço do Aço.....	17
Figura 3 - Pallet tipo PBR.....	20
Figura 4 - Chapa planificada (esquerda) e chapa dobrada (direita).....	22
Figura 5 - Aumento da resistência ao escoamento e à ruptura, num perfil formado a frio.	23
Figura 6 - Exemplos de flambagem distorcional da seção transversal.....	34
Figura 7 – Força de cisalhamento / cortante 5.000 N.....	37
Figura 8 – Perfil teórico da longarina.....	39
Figura 9 - Porta pallet.....	40
Figura 10 – Deslocamento de 3,229mm	49
Figura 11 – Força de cisalhamento / cortante 5.000 N.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Passos metodológicos.....	38
Tabela 2 - Resultados Momento Fletor	46
Tabela 3 – Resultado Critério da Resistência	49
Tabela 4 – Resultado Critério da Resistência	50
Tabela 5 – Resultado Cortante.....	50
Tabela 6 – Resultado Critério da Flecha	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área bruta da seção transversal da barra
Aef	Área efetiva da seção transversal da barra
bf	Largura nominal da mesa
bw	Largura nominal da alma
E	Módulo de elasticidade do aço, adotado igual a 200 000 mpa
F	Força, valor de ação, em geral
Frd	Força resistente de cálculo, em geral
Fsd	Força solicitante de cálculo, em geral
fu	Resistência à ruptura
fy	Resistência ao escoamento
G	Módulo de elasticidade transversal, adotado igual a 77 000 mpa
J	Constante de torção
k	Coefficiente de flambagem local do elemento
kl	Coefficiente de flambagem local para a seção completa
KxLx	Comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo x
KyLy	Comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo y
KzLz	Comprimento efetivo de flambagem global por torção
L	Comprimento da barra
Mdist	Momento fletor de flambagem distorcional elástica
Me	Momento fletor de flambagem global elástica (flt – flambagem lateral com torção)
Mmax	Momento fletor solicitante máximo, em módulo, no segmento analisado para flt
Mrd	Momento fletor resistente de cálculo
Mrdist	Valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem distorcional
Msd	Momento fletor solicitante de cálculo
Nc,Rd	Força axial de compressão resistente de cálculo
Nex ; Ney	Forças axiais de flambagem global elástica por flexão em relação aos eixos x e y, respectivamente

Nez	Força axial de flambagem global elástica por torção
Rd	Valor de cálculo dos esforços resistentes, em geral
Sd	Valor de cálculo dos esforços solicitantes, em geral
t	Espessura
Vrd	Força cortante resistente de cálculo
Vsd	Força cortante solicitante de cálculo
W	Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento
Wc	Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida
Wc,ef	Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida
Wef	Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento
Xdist	Fator de redução do esforço resistente, associado à flambagem distorcional
Xflt	Fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo geral	16
1.2	Objetivos específicos	16
1.3	Delimitação da Pesquisa	17
1.4	Justificativa	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Logística	19
2.1.1	Sistema de Armazenagem	20
2.1.2	Porta Pallet.....	21
2.2	Perfis Metálicos	22
2.3	Norma de dimensionamento	23
2.3.1	Critério da Resistência	26
2.3.2	Critério da Flecha Máxima.....	35
2.3.3	Momento Fletor Solicitante de cálculo (<i>Msd</i>).....	36
2.4	Método dos elementos Finitos (MEF)	36
2.4.1	Malha utilizada no Solidworks	37
3	METODOLOGIA	38
3.1	Método da pesquisa	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	Desenvolvimento dos Resultados	42
4.1.1	Critério da resistência.....	42
<u>4.1.1.1</u>	<u>Cortante</u>	<u>46</u>
4.1.2	Critério da flecha	48
4.2	Análise computacional	49
4.3	Discussão dos resultados	50
5	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53
	ANEXO A - Tabela 12 da norma NBR 14762:2010	55
	ANEXO B - Tabela A.1 da norma NBR 14762:2010	57
	ANEXO C -Item 9.8.2.1 da norma NBR 14762:2010	59
	ANEXO D - Item 9.8.2.2 da norma NBR 14762:2010	61

1 INTRODUÇÃO

As estruturas metálicas têm indicadores de sua utilização em escala industrial a partir de 1750. No Brasil o início de sua fabricação foi no ano de 1812, sendo que o grande avanço na fabricação de perfis em larga escala ocorreu com a implantação das grandes siderúrgicas. Como exemplo, tem-se a Companhia Siderúrgica Nacional — CSN, que começou a operar em 1946. (PINHEIRO, 2005).

Esta introdução de perfis metálicos na indústria possibilitou a fabricação de novos modelos de construção, como os utilizados nos sistemas de armazenamento, em específico os porta pallets que possibilitam a organização de pallets e produtos no sentido vertical. Com auxílio de equipamentos de movimentação de carga, como por exemplo empilhadeiras, torna-se possível alocar qualquer tipo de produto nestes porta pallets respeitando a carga e dimensões definidas em projeto.

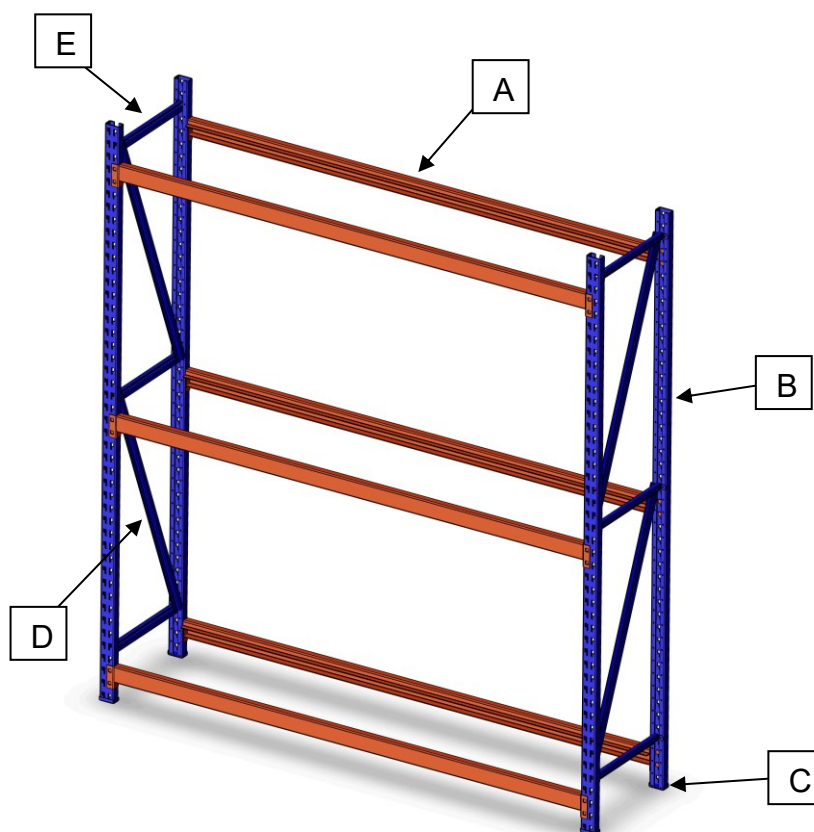
Este maior aproveitamento do espaço físico de um barracão atrai o interesse de setores que precisam de um elevado nível de armazenamento e organização, um destes setores é o de distribuição.

O setor de distribuição, é considerado o principal intermediador entre indústria e varejo, sendo o estoque um item de elevado valor financeiro destas empresas. Segundo a plataforma *online* Mercado e Consumo (2021), a pandemia do novo coronavírus e o isolamento social impactou e está impactando diretamente a vida das pessoas e os setores da economia, incluindo, é claro, o segmento de logística e transporte. Com isso, as empresas estão tendo que se reestruturar e criar soluções para manter a cadeia de suprimentos organizada minimizando os prejuízos.

Neste contexto, este trabalho será desenvolvido em uma empresa metalúrgica que está a mais de 25 anos no mercado. Nela são projetados, produzidos e posteriormente realizado a montagem de soluções em armazenagem, buscando a otimização de espaços e garantindo a qualidade de seus produtos de acordo com as necessidades de cada cliente. A empresa está inserida no contexto apresentado acima, pelo fato de que o comércio eletrônico cresceu muito neste período pandêmico (consequentemente os centros de armazenamento também tiveram que se adaptar) e também devido ao mercado, que se mostra cada vez mais competitivo, fazendo com que as empresas precisem buscar sempre melhorar seus indicadores, sendo um deles o gerenciamento de custos.

Dentre os vários itens que compõem o custo da fabricação de um porta pallet, a matéria-prima torna-se o principal. Na figura 1 é possível verificar o porta pallet que é composto de longarinas (A), colunas (B), sapatas (C), diagonais (D) e travessas (E) fabricadas com chapas metálicas de aço, sendo as longarinas o objeto desse trabalho a qual é fabricada com um perfil tipo caixão. A fixação das longarinas nas colunas é realizada através de um sistema de encaixe e a fixação das diagonais e travessas nas colunas é feita com elementos de fixação (parafusos arruelas e porcas).

Figura 1 - Porta pallet



Fonte: O Autor

As chapas metálicas de aços dúcteis podem ser dobradas a frio, transformando-se em perfis de chapas dobradas. A dobra das chapas é feita em prensas especiais nas quais há gabaritos que limitam os raios internos de dobra a certos valores mínimos, especificados para impedir a fissuração do aço na dobra (PFEIL; PFEIL, 2009).

A abordagem deste trabalho refere-se as longarinas que, conforme a norma NBR15524-1 (2007), é um elemento estrutural constituído por um perfil horizontal com

conectores nas extremidades para fixação nas colunas que, em pares, no mesmo plano horizontal, deve suportar o peso das unidades de carga.

Portanto o objetivo deste estudo é a análise do perfil de uma longarina utilizada em porta pallet, tendo como base a norma NBR 14762:2010 e também o método dos elementos finitos, com a finalidade de reduzir o seu custo da fabricação através de sua geometria.

1.1 Objetivo geral

Avaliar o perfil de uma longarina utilizada em uma estrutura porta pallet, comparando resultados teóricos analíticos com base na norma NBR 14762:2010 e simulação numérica estrutural utilizando os elementos finitos em *software* CAE (Computer-Aided Engineering) com resultados solicitantes afim de validar a configuração que estará relacionada ao peso da peça que, por consequência, influenciará diretamente no custo desta peça, visando assim o menor valor e atendendo aos requisitos da norma.

1.2 Objetivos específicos

Para cumprir o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos são necessários:

- a) Definição da característica da longarina metálica, utilizada na estrutura porta pallet.
- b) Realizar o estudo teórico utilizando equações analíticas de estática específicas para as longarinas de acordo com a Norma NBR 14762:2010 pelo critério da resistência e o critério da flecha.
- c) Modelagem 3D em *software* CAD da estrutura porta pallet, especificamente da longarina.
- d) Realizar simulação estrutural computacional através do método dos elementos finitos.
- e) Validação por meio de análise dos resultados teóricos e computacionais comparados com resultados solicitantes.

1.3 Delimitação da Pesquisa

Nesta pesquisa, fatores como a geometria da coluna e da garra (que fará a união da longarina com a coluna) não serão analisados, tendo como premissa de que foram projetadas corretamente e de acordo com as especificações técnicas.

O *software* de simulação utilizado é o *Solidworks Premium 2021 SP4.1*. E a definição do perfil e carga utilizados terá como base o histórico da empresa que possui mais de 25 anos de atuação no mercado de sistemas de armazenagem e tem capacidade de produção de 320 toneladas de aço por mês, podendo chegar a 960 toneladas/mês trabalhando em 3 turnos.

1.4 Justificativa

Por motivo de redução do peso das peças fabricadas, conseqüentemente a redução de custos, o desenvolvimento deste trabalho teve origem nos dados do aumento do preço do aço, um acréscimo de aproximadamente 341% em 11 meses conforme mostra a figura 2 (Fonte: Preço do aço fornecedor CSN setembro de 2019 até julho de 2021). Atualmente (2022) este preço mantém-se constante no valor de aproximadamente R\$ 12,00/Kg.

Figura 2 - Variação do preço do Aço



Fonte: Fornecedor de aço

Através destes dados, pode-se verificar que o custo da matéria-prima subiu muito e este custo impacta diretamente no preço do produto final, por consequência disso a redução do peso da peça sem que o produto perca suas características

conforme norma, o que é de fundamental importância para se ter um produto competitivo no mercado. Devido a este desafio que foi feita a escolha do direcionamento de estudo deste trabalho na validação do perfil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, inicialmente será apresentado uma explicação sobre a logística, passando pelos sistemas de armazenagem até os porta pallets. Posteriormente será analisado o perfil metálico utilizado nesta estrutura e as principais normas utilizadas no dimensionamento e, por fim, uma abordagem sobre o método dos elementos finitos.

2.1 Logística

Para Caxito (2011) logística define-se como o processo de planejar, implementar e controlar eficientemente o custo correto, o fluxo e armazenagem de matérias-primas, estoques durante a produção e produtos acabados, e as informações como dados eletrônicos relativas a essas atividades, desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o propósito de atender aos requisitos do cliente.

A atividade logística é a ponte que faz a ligação entre locais de produção e mercados separados por tempo e distâncias. A logística é a essência do comércio. Ela contribui decisivamente para melhorar o padrão econômico de vida geral. Sendo ela constituída do processo de planejamento, implantação e controle do fluxo eficiente de mercadorias, serviços e das informações relativas desde o ponto de origem até o ponto de consumo com o propósito de atender às exigências dos clientes. (BALLOU, 2007).

Ambos os autores tratam logística como uma responsabilidade de projetar e administrar sistemas para controlar o transporte e a localização geográfica dos estoques de materiais e produtos inacabados e acabados pelo menor custo total. Em resumo são três atividades básicas: armazenar, transportar e distribuir.

No quesito controle eficiente de mercadorias temos os estoques que são acumulações de matérias-primas, suprimentos, componentes, materiais em processo e produtos acabados que surgem em numerosos pontos do canal de produção e logística das empresas (BALLOU, 2007). Neste trabalho será analisado a estrutura do porta pallet em que o cliente utiliza na sua expedição (armazenamento do estoque final de produtos antes do envio ao seu cliente).

2.1.1 Sistema de Armazenagem

Um sistema de armazenamento eficiente, contribui para que não ocorra o prejuízo devido a venda perdida quando o cliente em face de uma situação de falta de estoque opta pelo cancelamento do pedido, ou, quando ocorre o atraso devido ao cliente não se dispor a esperar o atendimento de seu pedido de maneira que a venda não chega a ser concretizada. (BALLOU, 2007).

Para Moura (2004) a armazenagem é uma função que consiste, no seu sentido mais geral, em uma atividade ampla e complexa, sob o ponto de vista operativo, a serviço do processo produtivo e da organização distributiva.

Para facilitar o armazenamento de produtos começou a ser utilizado no Brasil no final da década de 1960 os pallets, mais especificamente na indústria automobilística e nos hipermercados (CAXITO 2011), sendo que os pallets tiveram seu uso concretizado com o estabelecimento da norma NBR 82522 (ABNT) com a criação do padrão de pallet brasileiro (Padrão Brasileiro - PBR: 1,00m x 1,20m) em 1988, atualmente encontra-se em vigor a NBR 8252 (2011).

Segundo Moura (2004) pallet é:

[...] uma plataforma disposta horizontalmente para carregamento, constituída de vigas ou blocos com a(s) face(s) sobre os apoios, cuja altura é compatível com a introdução de garfos de empilhadeiras ou outros sistemas de movimentação

A figura 3 mostra um pallet padrão PBR.

Figura 3 - Pallet tipo PBR



Fonte: CASTIGLIONI (2014)

Com a padronização do pallet, a carga tornou-se unitária no transporte e movimentação de cargas, permitindo uma maximização da eficiência dos vários equipamentos de transporte, principalmente da empilhadeira de garfos, que pôde tornar-se o mais importante meio de transporte e armazenagem de cargas nos diversos tipos de empresa. Obtendo assim, uma maior facilidade e velocidade no armazenamento, intercâmbio entre os usuários e o acondicionamento em estruturas porta pallets (CAXITO, 2011; DIAS, 2019).

Em resumo, inicialmente, a empresa tenta resolver o seu problema de armazenagem de uma forma simples, empilhando manualmente as mercadorias umas sobre as outras, esta pilha, é quase sempre instável e danosa para a mercadoria devido a ação do peso da carga que vem de cima. Com um pouco de imaginação, a empresa descobre que a utilização de pallets empilhados torna a carga manobrável por empilhadeira, os corredores mais estreitos e os custos muito menores; porém, a pilha continuará instável e a empresa perderá altura de armazenagem. A fim de solucionar este problema, é possível utilizar a estrutura porta pallet. (DIAS, 2019)

2.1.2 Porta Pallet

A definição de porta pallet para a ABNT NBR 15524-1 é de que o porta pallet é uma estrutura metálica utilizada basicamente para armazenagem de unidades de carga do tipo pallet. Uma definição descrita por Caxito (2011) é que um porta pallet consiste de uma estrutura formada por um conjunto de duas vigas (longarinas) longitudinais aos corredores do armazém onde são armazenados os pallets.

O porta pallet permite a padronização do estoque possibilitando as mais variadas combinações de itens, com melhor aproveitamento do espaço do armazém por meio de verticalizações, em que, geralmente, podem ser armazenados dois pallets na primeira posição no térreo ou a 20 cm do piso, dependendo do segmento ao qual o produto pertença, bem como na última posição da estrutura. As principais características da estrutura porta pallet são a versatilidade e a facilitação para inventários.

2.2 Perfis Metálicos

Nem sempre é possível encontrar no mercado perfis laminados nas dimensões que o projeto necessita, com isto a maioria das empresas produz seus próprios perfis de acordo com sua demanda e necessidade podendo ser fabricados com as dimensões desejadas diminuindo assim o custo final de um projeto.

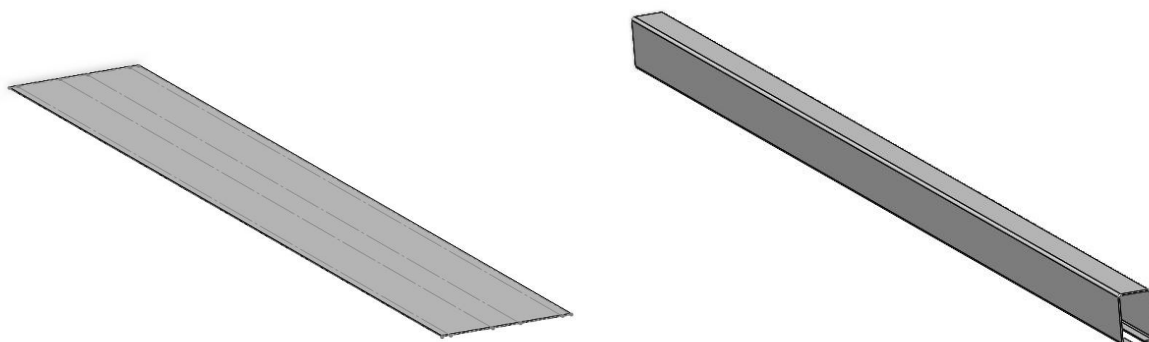
Estruturalmente são empregados três tipos de perfis metálicos: os laminados, os soldados e os formados a frio (CARVALHO, 2020).

- a) Perfis laminados: São perfis laminados a quente, em usinas siderúrgicas.
- b) Perfis soldados: São perfis obtidos através da solda de chapas (tiras de chapas)
- c) Perfis formados a frio: perfis fabricados a partir de chapas finas dobradas.

No Brasil os perfis laminados e soldados têm seus procedimentos de dimensionamento estabelecidos pela norma ABNT NBR 8800:2008 enquanto os perfis formados a frio utilizam a norma ABNT NBR 14762:2010.

As longarinas dos porta pallets utilizam os perfis formados a frio, estas são fabricadas a partir de chapas finas que são cortadas em uma guilhotina e posteriormente dobradas em uma máquina dobradeira até atingir o formato de perfil desejado, que no nosso caso é um perfil U enrijecido de acordo com a figura 4 onde é possível verificar uma chapa planificada e ao lado o perfil formado a frio através da dobra.

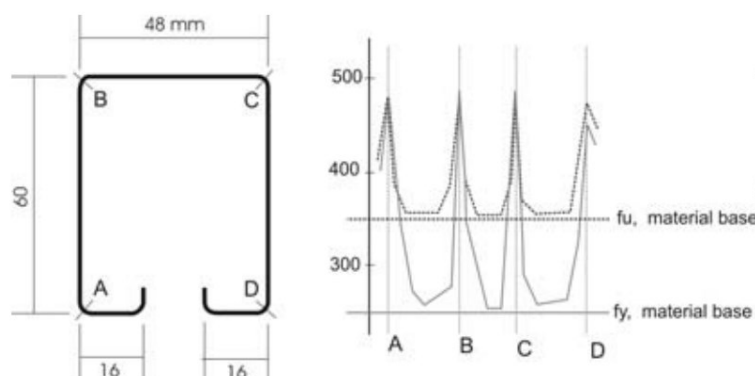
Figura 4 - Chapa planificada (esquerda) e chapa dobrada (direita)



Fonte: O Autor

Para Silva (2012) o dobramento de uma chapa, provoca um aumento da resistência ao escoamento (f_y) e da resistência à ruptura (f_u), devido ao carregamento até a zona plástica, descarregamento, e posterior, porém não imediato, carregamento, conforme mostra a figura 5, com conseqüente redução de ductilidade.

Figura 5 - Aumento da resistência ao escoamento e à ruptura, num perfil formado a frio.



Fonte: SILVA (2012)

Com isto é possível verificar na imagem que as regiões de dobra A, B, C e D as quais concentram as maiores tensões conforme gráfico junto a figura 5.

2.3 Norma de dimensionamento

No Brasil existem duas principais normas que abordam estruturas de aço, a ABNT NBR 8800:2008 e a ABNT NBR 14762:2010, a primeira trata de perfis laminados a quente em usinas siderúrgicas e perfis obtidos por soldagem de chapas, já a segunda é relacionada a perfis formados a frio.

Logo, a principal Norma que será utilizada neste trabalho é a ABNT NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.

Esta Norma, tem como base o método dos estados-limites, ela estabelece os requisitos básicos que devem ser obedecidos no dimensionamento, à temperatura ambiente, de perfis estruturais de aço formados a frio, constituídos por chapas ou tiras de aço-carbono ou aço de baixa liga, conectados por parafusos ou soldas.

O principal objetivo desta Norma é designar os princípios gerais para determinar perfis estruturais de aço formados a frio, com espessura máxima de 8mm.

Neste método (abordado pela NBR 14762:2010), o nível de segurança de uma estrutura é determinado pela capacidade que ela possui de suportar as várias ações

que vierem a solicitá-la durante sua vida útil, sem atingir qualquer estado limite último ou estado limite de serviço. Os estados limites últimos estão relacionados a ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais, perda do equilíbrio da estrutura, em resumo, é a perda da capacidade resistente da estrutura, ou seja, quando ela entra em colapso. E o estado limite de serviço está relacionado a aparência (aspecto visual da estrutura), almejando o conforto do usuário.

Para Pfeil (2009) algumas características físicas devem ser consideradas para todos os tipos de aços estruturais, a uma faixa normal de temperatura atmosférica, são elas:

- Ductilidade: Capacidade que um material tem de se deformar sem se romper;
- Resiliência e Tenacidade: Propriedades diretamente relacionadas a capacidade do material absorver energia mecânica, sendo a resiliência medida apenas na região elástica;
- Dureza: É a propriedade que mede a resistência a abrasão, sendo o material com maior dureza o mais difícil de ser riscado;
- Fluência: Capacidade do material se deformar com relação a temperatura;
- Fadiga: Resistência à ruptura do material quando submetido a esforços repetitivos (ciclos);
- Elasticidade: Capacidade do material ter grandes deformações no regime elástico;
- Corrosão: Processo de reação do aço com alguns elementos presentes no ambiente promovendo mudanças nas propriedades químicas e perda de seção da peça;

As vantagens do aço para estruturas, segundo Pinheiro (2005), é a precisão milimétrica possibilitando um maior controle dimensional e por consequência uma melhor qualidade final, resistência a vibração e choques. As obras são executadas rapidamente, passível de desmontagem e remontagem, alta resistência e reaproveitamento de materiais.

Por desvantagem têm-se a necessidade de mão de obra e equipamento especializados e também a indispensabilidade de um tratamento superficial contra oxidação.

A NBR 14762:2010 recomenda o uso de aços com qualificação estrutural com resistência ao escoamento superior a 250 MPa. Para efeito de cálculo devem ser adotados, para os aços previstos, os seguintes valores de propriedades mecânicas:

- a) módulo de Young, $E = 200.000$ MPa;
- b) coeficiente de Poisson, $\nu = 0,3$;
- c) módulo de elasticidade transversal, $G = 77.000$ MPa;
- d) coeficiente de dilatação térmica, $\beta = 1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- e) massa específica, $\rho = 7.850$ kg/m³.
- f) tensão de escoamento, f_y maior que 250 MPa, no nosso caso será 300 MPa (Aço Civil 300).

Conforme já mencionado, a verificação necessária se deu principalmente de acordo com a norma ABNT NBR 14762:2010, por se tratar de uma peça fabricada com perfis dobrados a frio. Na sequência tem-se uma análise da norma juntamente com uma abordagem de Carvalho (2020).

Na análise analítica, a solicitação de flexão, tem dois critérios a serem verificados:

1. **Critério da Resistência:** onde o momento resistente (o momento máximo que a viga resiste – nosso caso a longarina) deve ser maior que o momento solicitante, conforme equação (1):

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \quad (1)$$

sendo:

M_{Rd} = Momento fletor resistente de cálculo.

M_{Sd} = Momento fletor solicitante de cálculo.

Esse critério acima se encontra detalhado nos itens Momento fletor resistente de cálculo (2.3.1) analisados por 2 métodos e Momento Fletor Solicitante de cálculo (2.3.3).

Para complementar as verificações de uma viga, ainda dentro do critério da resistência, pode ser visto:

- a. Verificação da alma ao cortante, que consiste em analisar o escoamento e/ou flambagem da alma devido ao cortante, ou combinação de cortante e flexão da alma.

2. **Critério da Flecha:** a flecha máxima de serviço (flecha máxima) deve ser menor do que a flecha máxima admissível, conforme equação (2).

$$f_{max} \leq f_{adm} \quad (2)$$

sendo:

f_{max} = Flecha máxima de serviço.

f_{adm} = Flecha máxima admissível.

Esse critério se encontra detalhado no item Critério da Flecha Máxima (2.3.2)

2.3.1 Critério da Resistência

A resistência de cálculo (momento fletor resistente de cálculo), M_{Rd} , a ser adotada será o menor valor entre os calculados de acordo com o momento resistente calculado no início do escoamento da seção efetiva e o momento resistente calculado no estado limite de flambagem lateral com torção.

Primeiramente abordando o início de escoamento da seção efetiva, podendo aplicar um dos dois métodos preconizados pela norma:

1. **Método da Largura Efetiva (MLE):** em que a flambagem local é considerada por meio de propriedades geométricas efetivas (reduzidas) da seção transversal da longarina, oriunda do cálculo das larguras efetivas dos elementos totalmente ou parcialmente comprimidos.

Nos elementos paralelos ao eixo de flexão pode-se considerar a tensão constante, já que a espessura do elemento é muito pequena e o erro cometido pela simplificação não chega a comprometer. Nos elementos perpendiculares ao eixo de flexão, há variação de tensão, e isso deverá ser levado em conta. Nas almas dos perfis haverá uma parte comprimida e uma tracionada: o conceito de largura efetiva deverá ser aplicado na alma e será retirada uma porção da parte comprimida.

2. **Método da seção efetiva (MSE):** utilizada para quando se vai reduzir globalmente as propriedades geométricas da flexão do perfil.

Para o início do escoamento da seção efetiva tem-se a equação (3) de acordo com a norma:

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \text{ sendo } \gamma = 1,10 \quad (3)$$

sendo:

M_{Rd} = Momento fletor resistente ou resistência de cálculo ao momento fletor.

W_{ef} = Módulo resistente elástico da seção efetiva relativa ao início do escoamento da seção.

f_y = Tensão de escoamento de acordo com a propriedade do material.

γ = Constante de 1,1.

O módulo de resistência elástico da seção efetiva, W_{ef} , pode ser calculado com base em uma das duas opções a seguir:

1ª Opção: através do **MLE** considerando a tensão de escoamento:

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95 \sqrt{\frac{k E}{\sigma}}} \quad (4)$$

sendo:

λ_p = Índice de esbeltez reduzido do elemento ou da seção completa.

b = Largura do elemento.

t = Espessura do elemento.

k = Coeficiente de flambagem local, com valor a ser determinado conforme o caso. Apresentados na tabela 5 e 6 da norma.

E = Módulo Elástico.

σ = É o valor da tensão máxima admitida no perfil.

- Para a relação b/t a norma estabelece valores máximos que devem ser observados de acordo com a tabela 4 (da norma)

utilizando:

$$b_{ef} = b \quad (5)$$

Para $\lambda_p \leq 0,673$, ou

$$b_{ef} = \frac{b \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right)}{\lambda_p} \quad (6)$$

Para $\lambda_p > 0,673$.

sendo:

b_{ef} = Largura efetiva.

b = Largura do elemento.

λ_p = Índice de esbelteza reduzido do elemento ou da seção completa.

2ª Opção: pelo **MSE**, utilizada neste trabalho, item 9.8.2 da norma.

Neste item é analisado o momento fletor resistente de cálculo, o qual deve ser tomado como o menor valor calculado em relação:

1. Início de escoamento da seção efetiva (item 9.8.2.1 da norma)
2. Flambagem lateral com torção (item 9.8.2.2 da norma)
3. Flambagem distorcional (item 9.8.2.3 da norma, se aplicável)

Para o primeiro item, 9.8.2.1 da norma, segue abaixo a sequência de cálculo:

$$W_{ef} = W \text{ para } \lambda_p \leq 0,673 \quad (7)$$

sendo:

W_{ef} = Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento.

W = Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento.

λ_p = Fator de verificação.

$$W_{ef} = W \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \frac{1}{\lambda_p} \text{ para } \lambda_p > 0,673 \quad (8)$$

Para:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W f_y}{M_l}} \quad (9)$$

sendo:

λ_p = Fator de verificação.

W = Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento.

f_y = Tensão de escoamento de acordo com a propriedade do material.

M_l = Momento fletor de flambagem local estática, calculado de forma direta através da expressão 10:

$$M_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12 (1 - \nu^2) \left(\frac{b_w}{t}\right)^2} W_c \quad (10)$$

sendo:

k_l = Coeficiente de flambagem local para a seção completa, pode ser calculado pelas expressões da tabela 12 da norma ABNT NBR 14762:2010 (Anexo 01 deste trabalho). Abaixo segue equação (11) utilizada para cálculo do k_l .

E = Módulo elástico do material.

ν = Coeficiente de Poisson.

b_w = Alma.

t = Espessura.

W_c = Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida.

$$k_l = 14,5 + 178\eta - 602\eta^2 + 649\eta^3 - 234\eta^4 \quad (11)$$

Condição ($0,1 \leq \eta \leq 1,0$)

Para:

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} \quad (12)$$

sendo:

η = Relação modular.

b_w = Alma.

b_f = Largura da mesa.

E para o cálculo de W e W_c utiliza-se as equações (13) e (14) respectivamente:

$$W = \frac{I_y}{y} \quad (13)$$

sendo:

I_y = Momento de Inercia em y .

y = Maior distância até a fibra extrema.

$$W_c = \frac{I_y}{y_c} \quad (14)$$

sendo:

y_c = Distância até a fibra comprimida.

Para o segundo item, 9.8.2.2 da norma (flambagem lateral com torção), segue abaixo a sequência de cálculo:

$$M_{RD} = \frac{X_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad (15)$$

sendo:

M_{Rd} = Momento fletor resistente ou resistência de cálculo ao momento fletor.

$W_{c,ef}$ = Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida.

X_{FLT} = Fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção. Sendo este verificado em três condições:

- Para $\lambda_0 < 0,6$: utilizar equação (16)

$$X_{FLT} = 1 \quad (16)$$

- Para $0,6 < \lambda_0 < 1,336$ utilizar equação (17)

$$X_{FLT} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2) \quad (17)$$

Para $\lambda_0 \geq 1,336$: utilizar equação (18)

$$X_{FLT} = \frac{1}{\lambda_0^2} \quad (18)$$

E o λ_0 é encontrado através da equação (19)

$$\lambda_0 = \left(\frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} \quad (19)$$

sendo:

λ_0 = Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global.

W_c = Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida.

f_y = Tensão de escoamento de acordo com a propriedade do material.

M_e = Momento fletor de flambagem lateral com torção.

Para o M_e , Momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, em barra com seção monossimétrica sujeita a flexão em torno do eixo

perpendicular ao eixo de simetria com seção fechada (caixão), sujeita à flexão em torno do eixo x calculado através da equação (20):

$$M_e = C_b(N_{ey} G J)^{0,5} \quad (20)$$

sendo:

C_b = Fator de modificação para o momento fletor não uniforme, que à favor da segurança pode ser tomado igual a 1,0.

N_{ey} = Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo y, calculado pela equação (21).

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad (21)$$

sendo:

$K_y L_y$ = Comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo y.

G = Módulo de elasticidade transversal do aço calculado pela expressão (22).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (22)$$

sendo:

E = Módulo elástico do material.

ν = Coeficiente de Poisson.

J = Constante de torção uniforme ou momento de inercia à torção uniforme, perfil oposto pela mesa encontrado através da equação (23).

$$J = \frac{t^3}{3}(2b + 4b_1) \quad (23)$$

sendo:

t = Espessura.

b = Largura da mesa (bf).

$b1$ = Metade do comprimento da alma (bw)

Para o item, $W_{c,ef}$, mencionado na equação (15), as condições são expressas na sequência:

- Para $\lambda_p \leq 0,673$ utilizar equação (24)

$$W_{c,ef} = W_c \quad (24)$$

- Para $\lambda_p > 0,673$ utilizar equação (25)

$$W_{c,ef} = W_c \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} \quad (25)$$

E a variável λ_p calculado pela equação (26):

$$\lambda_p = \left(\frac{X_{FLT} W_c f_y}{M_l} \right)^{0,5} \quad (26)$$

sendo:

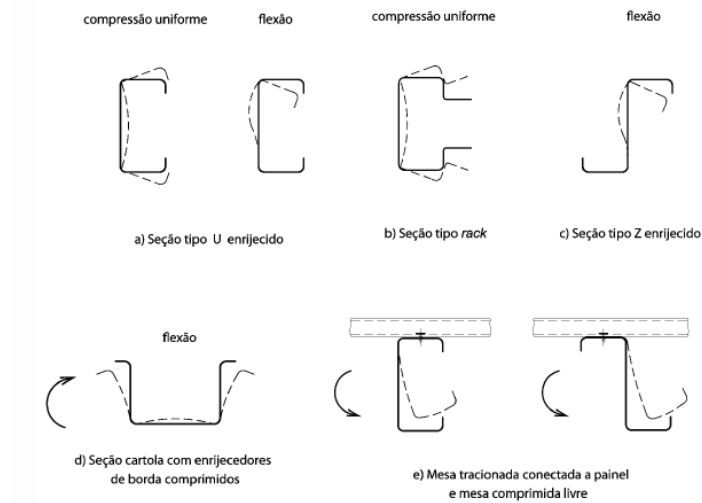
λ_p =Fator de verificação.

Sendo o M_l , o mesmo calculado pela equação (10).

Para o terceiro item, 9.8.2.3 da norma ABNT NBR 14762:2010 (flambagem distorcional), se aplicável. Segue abaixo considerações da norma:

Para barra com seção transversal aberta sujeita à flambagem distorcional, conforme 9.3 da norma ABNT NBR 14762:2010, as seções transversais de barras podem apresentar flambagem distorcional, conforme ilustrado na Figura (6):

Figura 6 - Exemplos de flambagem distorcional da seção transversal.



Fonte: ABNT NBR 14762:(2010)

Como o perfil utilizado neste trabalho não é um perfil padronizado comercialmente e não consta como padrão da norma, o mesmo é semelhante a um perfil “caixão” o qual não se aplica a flambagem distorcional pois para esta análise é necessário duas variáveis, momento fletor de flambagem distorcional elástica e o índice de esbeltez reduzido, as quais não é possível encontrar os valores devido a ao fato delas estarem relacionadas, sendo uma dependente da outra.

Análise complementar: força cortante, abaixo sua sequência de cálculo.

- Para $\frac{h}{t} \leq 1,08 \left(\frac{E k_v}{f_y} \right)^{0,5}$ utilizar equação (27)

$$V_{Rd} = \frac{0,6 f_y h t}{\gamma} \quad (\gamma = 1,1) \quad (27)$$

- Para $1,08 \left(\frac{E k_v}{f_y} \right)^{0,5} < \frac{h}{t} \leq 1,4 \left(\frac{E k_v}{f_y} \right)^{0,5}$ utilizar equação (28)

$$V_{Rd} = 0,65 t^2 \frac{(k_v f_y E)^{0,5}}{\gamma} \quad (\gamma = 1,1) \quad (28)$$

- Para $\frac{h}{t} > 1,4 \left(\frac{E k_v}{f_y} \right)^{0,5}$ utilizar equação (29)

$$V_{Rd} = \frac{\left[\frac{0,905 E k_v t^3}{h} \right]}{\gamma} \quad (\gamma = 1,1) \quad (29)$$

sendo:

h = Largura da alma (altura da parte plana da alma).

k_v = Coeficiente de flambagem local por cisalhamento.

Sendo que o k_v mencionado é um valor fixo, pelo fato de ser uma longarina “caixão”, logo não possui enrijecedores, abaixo valor conforme equação (30):

$$k_v = 5 \quad (30)$$

2.3.2 Critério da Flecha Máxima

Na avaliação da rigidez de uma viga de perfil formado a frio, em perfis esbeltos, a inércia do perfil não será constante, pois as tensões são variáveis, já que os momentos não são constantes. Como a inércia da seção efetiva depende da tensão atuante na viga, ela será variável ao longo do seu comprimento, apresentando valores menores nos pontos de maior solicitação.

$$f_{max} \leq f_{adm} \quad (2)$$

Sendo:

- f_{max} = Flecha máxima de serviço (Flecha elástica da viga), calculada no estado limite de utilização, considerando as combinações de ações nominais ponderadas por seus coeficientes correspondentes conforme item 5.3 da norma ABNT NBR 14762:2010, ou como critério conservativo, considerando as combinações de ações nominais sem ponderação.
- f_{adm} = É a flecha máxima admissível definida, no Anexo A da norma ABNT NBR 14762:2010, como o valor máximo da flecha que uma viga pode ter para que sua utilização esteja dentro de padrões mínimos de conforto ou de uso.

2.3.3 Momento Fletor Solicitante de cálculo (M_{sd})

Para a análise do momento, deve ser calculado as reações de apoio de acordo com a carga pré-determinada e posteriormente multiplicar o valor de reação pela distância até o centro da longarina.

$$M_{sd} = F \cdot \left(\frac{L}{2}\right) \quad (2.1)$$

2.4 Método dos elementos Finitos (MEF)

Esta fase virtual do desenvolvimento do projeto contribui na redução de tempo e custos uma vez que implica em maior assertividade na fase real, quando de fato se utiliza, matéria-prima e equipamentos para fabricar a longarina. Assim como os problemas de engenharia desafiam constantemente os engenheiros a trabalhar com projetos mais caros e complexos, que requerem uma maior confiabilidade, segurança e restrições rigorosas. Para garantir tais características, modelos matemáticos podem ser elaborados para descrever o comportamento requerido em serviço.

Em geral, o comportamento desses problemas é governado por Equações Diferenciais Parciais (EDP) e a solução dessas equações por cálculo analítico, são difíceis, demoradas, e até mesmo insolúveis com as ferramentas disponíveis. Para contornar essa situação, ferramentas numéricas foram desenvolvidas com o propósito de solucionar essas equações. Nesse sentido, o MEF atende a maioria dos problemas, podendo ser aplicado em diversas situações como problemas que possuem regiões lineares ou não-lineares com domínio uni, bi ou tridimensional (DHATT; LEFRANÇOIS; TOUZOT, 2012).

O MEF trabalha com o princípio de aproximar uma geometria, de domínio contínuo, seja ela triângulos, quadrados, losangos, etc, por um número finito de elementos conectados por nós (FISH; BELYTSCHKO, 2009). A caracterização de um domínio contínuo por elementos finitos é denominada malha.

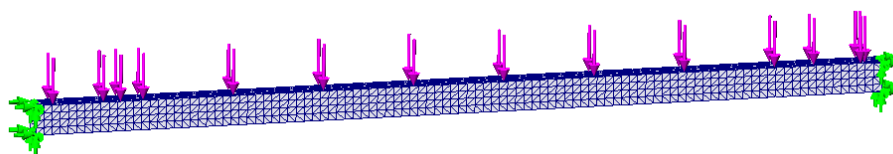
Para Fish (2009) a ideia básica do Método dos Elementos Finitos (MEF) é dividir o corpo em elementos finitos, muitas vezes chamados apenas de elementos,

conectados por nós, e obter uma solução aproximada. Esta é chamada de malha de elementos finitos e o processo para a sua construção é conhecido como geração da malha.

2.4.1 Malha utilizada no Solidworks

O programa usa a malha de viga e identifica as juntas de componentes estruturais em contato ou que interferem uns com os outros, e de componentes estruturais que não estão em contato considerando uma distância determinada (tolerância). Um elemento de viga é um elemento de linha definido por dois pontos finais e um corte transversal. Elementos de viga são resistentes a cargas axiais, de curvatura, de cisalhamento e de torção. O corte transversal de uma viga é considerado constante em todo seu comprimento. Internamente, o programa cria uma malha em cada viga criando vários elementos de viga. A representação no *software* é cilíndrica para otimizar dados de processamento.

Figura 7 – Força de cisalhamento / cortante 5.000 N



Fonte: O Autor, retirado do software SolidWorks

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia utilizada para o desenvolvimento desse trabalho.

3.1 Método da pesquisa

A pesquisa é desenvolvida seguindo o roteiro, de uma série de passos metodológicos, sugerido por Norton (2013) e, alguns desses passos são adaptados conforme o contexto desse trabalho. Assim, a metodologia é desenvolvida da seguinte maneira:

Tabela 1 – Passos metodológicos

1	Identificação da necessidade
2	Pesquisa de suporte
3	Definição dos objetivos
4	Especificação de tarefas
5	Síntese
6	Análise
7	Seleção / Conclusão

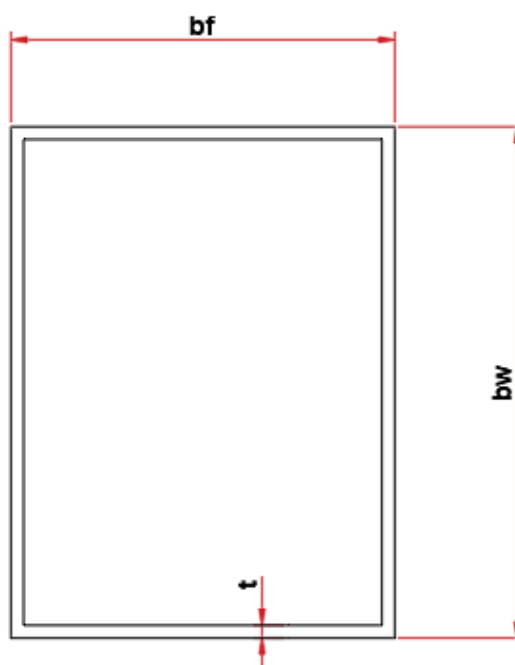
Fonte: Norton (2013) Adaptado.

1. **Identificação da necessidade:** O estudo iniciou procurando-se analisar a geometria de um perfil utilizado em uma metalúrgica, mais especificamente em uma longarina de um porta pallet, com o intuito de verificar a sua possível redução de custo. A pesquisa é realizada com uma revisão bibliográfica e análise das normas que estão relacionadas ao tema, sendo a principal delas a NBR 14.762:2010.
2. **Pesquisa de suporte:** Como pesquisa suporte, é verificado na literatura conceitos sobre logística, sistemas de armazenamento, porta pallet, simulação numérica estrutural utilizando os elementos finitos em *software* e dimensionamento de estruturas metálicas.

3. **Definição dos objetivos:** Avaliar o perfil de uma longarina utilizada em uma estrutura porta pallet comparando resultados teóricos analíticos baseado nos requisitos da norma.
4. **Especificação de tarefas:** Nesta etapa é definido o perfil que será avaliado de acordo com os padrões da empresa em questão, analisando uma longarina de porta pallet. Esta longarina é fixada através de solda pelas suas laterais em encaixes que são fixados nas colunas, engastando esta longarina, à qual deverá suportar a carga determinada pelo projeto.

O perfil utilizado é o representado abaixo:

Figura 8 – Perfil teórico da longarina



Fonte: O Autor

Sendo os itens:

bw = Alma, com valor de 8 cm

bf = Mesa, com valor de 6 cm

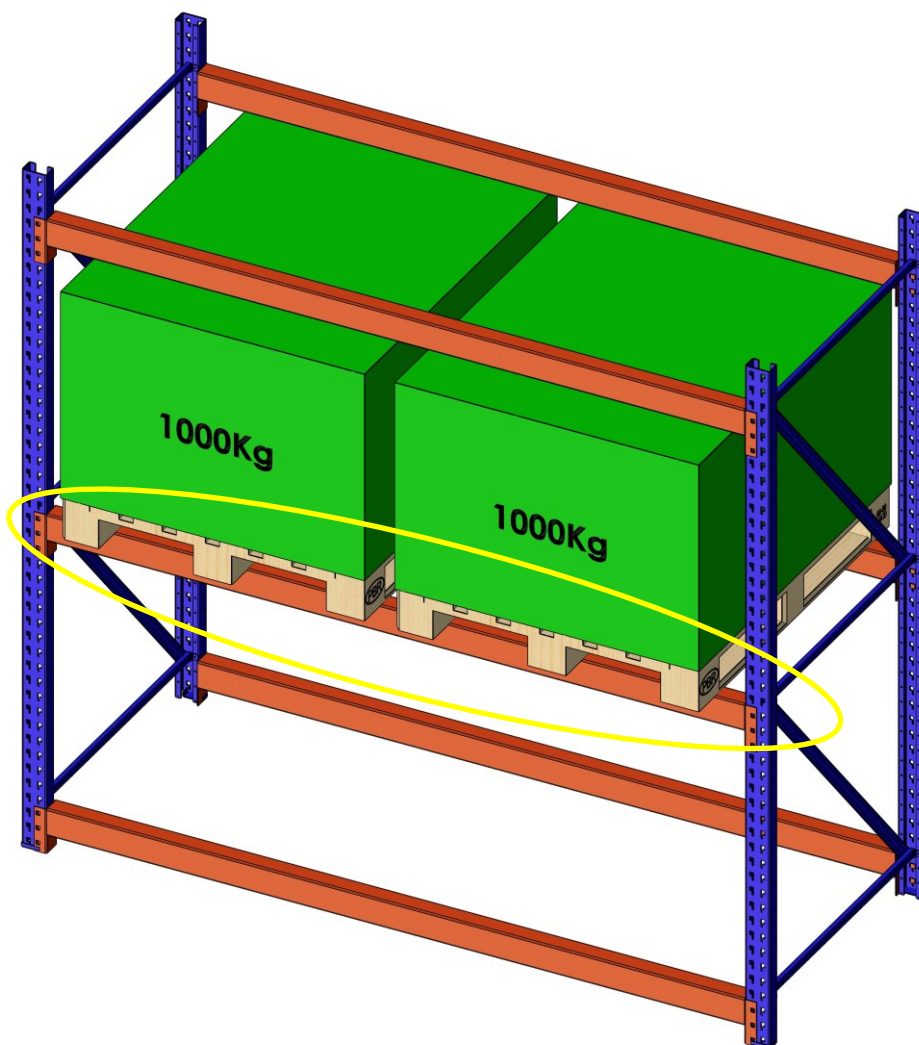
t = Espessura, com valor de 2 mm

E o comprimento total da longarina é de 230 cm.

Para este trabalho, a carga foi definida através do histórico de produção da empresa em questão, onde a maior parte das estruturas de porta pallets vendidas possui configuração de carga de 2000Kg/par de longarina; como cada nível possui duas longarinas a carga dividida em cada uma é de 1000Kg.

Cada nível de um porta pallet possui duas longarinas e sobre estas longarinas é alocado dois pallets um ao lado do outro, cada um com sua carga uniformemente distribuída no pallet de 1.000Kg, totalizando 2.000Kg. Na figura 7 é possível ver a estrutura de porta pallet, as longarinas, os pallets e uma carga de 1.000Kg sobre cada pallet.

Figura 9 - Porta pallet



Fonte: O Autor

Com este perfil definido inicia-se o estudo de critério da resistência que engloba:

- a. Início de escoamento da seção efetiva.
- b. Flambagem lateral com torção.
- c. Flambagem distorcional.

E posteriormente avaliado o critério da flecha.

5. **Análise:** Concluído as tarefas da etapa anterior, inicia-se a análise, se o perfil está de acordo com requisitos da norma ou não. Caso o perfil esteja superdimensionado, o mesmo terá suas dimensões alteradas o mesmo é válido para caso o perfil não esteja atendendo aos requisitos da norma.
6. **Seleção / Conclusão:** É a etapa em que após as iterações realizadas no item 5, é definido o perfil ideal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será desenvolvido os resultados e posteriormente realizado a discussão e análise dos mesmos.

4.1 Desenvolvimento dos Resultados

Com o caso definido, inicia-se a análise teórica.

4.1.1 Critério da resistência

Primeiramente avaliando a solicitação da flexão através do critério da resistência o qual deve atender a relação da equação (1), onde o momento fletor resistente do perfil deve ser maior ou igual ao momento fletor solicitante.

Para o M_{Rd} no início de escoamento da seção efetiva faz-se necessário encontrar duas variáveis a W_{ef} e f_y .

O W_{ef} será calculado através do Método das seções efetivas (MSE), o qual deve ser utilizado o menor valor calculado em relação:

- a. Início de escoamento da seção efetiva (item 9.8.2.1 da norma, Anexo C do trabalho)
- b. Flambagem lateral com torção (item 9.8.2.2 da norma, Anexo D do trabalho)
- c. Flambagem distorcional (item 9.8.2.3 da norma, se aplicável)

Para o item a, foi realizado a análise de λ_p para posteriormente verificar qual das duas equações será utilizada, (7) ou (8).

Na equação (9) temos três variáveis calculadas conforme apresentado na sequência.

Para W , utilizado a equação (13) substituindo seus valores:

$$W = \frac{255,22}{4} = 63,806 \text{ cm}^3 \quad (31)$$

A variável f_y está relacionada a propriedade do material, que no nosso caso é 30 kN/cm² conforme mencionado no início do trabalho em conformidade com a norma.

Já o item M_l é calculado através da fórmula (10), abaixo esta fórmula com resultados de suas variáveis:

$$M_l = 9,13 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 20000}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \left(\frac{8}{0,2}\right)^2} \cdot 63,806 = 6583,43 \text{ kN.cm} \quad (32)$$

- $E = 20.000 \text{ kN/cm}^2$ (Propriedade do material).
- $\nu = 0,3$ (Propriedade do material)
- $b_w = 8 \text{ cm}$ (Propriedade do perfil)
- $t = 0,2 \text{ cm}$ (Propriedade do perfil)

Desta fórmula segue abaixo origem de suas variáveis:

- k_l conforme Anexo B deste trabalho

•

$$k_l = 14,5 + 178 \cdot (0,75) - 602 \cdot (0,75)^2 \dots \quad (33)$$

$$+ 649 \cdot (0,75)^3 - 234 \cdot (0,75)^4$$

- $k_l = 9,13$

Desta equação o “ η ” foi encontrado utilizando a equação (12):

○

$$\eta = \frac{6}{8} = 0,75 \quad (34)$$

- W_c = Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida. Equação (14) representada abaixo

•

$$W_c = \frac{255,22}{4} = 63,806 \text{ cm}^3 \quad (35)$$

Retornando na equação 9 com os dados obtidos:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{63,806 \cdot 63,806}{6583,43}} = 0,538 \quad (36)$$

Como valor de λ_p foi menor que 0,673, utilizaremos a equação (7) onde $W_{ef} = W$.

$$W_{ef} = 63,806 \text{ cm}^3 \quad (35)$$

Com estes dados pode-se calcular o M_{RD} do início de escoamento da seção efetiva conforme equação abaixo:

$$M_{rd} = \frac{63,806 \cdot 30}{1,1} = 1740,16 \text{ kN.cm} \quad (36)$$

Finalizando assim a primeira análise.

Na segunda análise, será verificado o item 9.8.2.2 da norma ABNT NBR 14.762:2010, que é a flambagem lateral com torção, a qual segue a formulação da equação (15).

Para variável X_{FLT} , é preciso calcular o λ_0 através da equação (19) com seus respectivos valores:

$$\lambda_0 = \left(\frac{63,806 \cdot 30}{739,59} \right)^{0,5} = 1,609 \quad (37)$$

- Sendo W_c retirado da equação (14) apresentada abaixo:

$$W_c = \frac{255,22}{4} = 63,806 \text{ cm}^3 \quad (38)$$

- E o M_e conforme equação (20), a qual $C_b = 1$ favorecendo o fator de segurança

$$M_e = 1 \cdot (952,346 \cdot 7692,308 \cdot 0,0746)^{0,5} = 739,59 \quad (39)$$

- E, os itens N_{ey} , G e J demonstrados abaixo:

- Equação (21):

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 255,22}{(230)^2} = 952,346 \quad (40)$$

- Equação (22):

$$G = \frac{20000}{2(1 + 0,3)} = 7692,308 \quad (41)$$

- Equação (23):

$$J = \frac{0,2^3}{3} (2.6 + 4.4) = 0,0746 \quad (42)$$

Com o valor de $\lambda_0 \geq 1,336$ pode-se verificar que a condição atendida para encontrar o X_{FLT} , é conforme equação (18):

$$X_{FLT} = \frac{1}{1,609^2} = 0,386 \quad (43)$$

Seguindo com as variáveis da equação (15), a próxima é o $W_{c,ef}$ que está relacionado ao λ_p equação (26)

$$\lambda_p = \left(\frac{0,386 \cdot 63,806 \cdot 30}{6583,43} \right)^{0,5} = 0,3352 \quad (44)$$

Como λ_p apresentou um valor menor que 0,673 a equação desta condição é a (24), apresentada abaixo

$$W_{c,ef} = 63,806 \text{ cm}^3 \quad (45)$$

Retornando na equação (15)

$$M_{RD} = \frac{0,3864 \cdot 63,806 \cdot 30}{1,1} = 672,35 \text{ kN.cm} \quad (46)$$

Finalizando a segunda análise.

Na terceira análise, item 9.8.2.3 da norma ABNT NBR 14762:2010, flambagem distorcional não é aplicável a este perfil conforme definido no capítulo 2.3.1 deste trabalho.

Abaixo análise dos três momentos fletores:

Tabela 2 - Resultados Momento Fletor

Início de escoamento da seção efetiva	$M_{RD} = 1740,16 \text{ kN.cm}$
Flambagem lateral com torção	$M_{RD} = 672,35 \text{ kN.cm}$
Flambagem distorcional	$M_{RD} = \text{Não se aplica}$

Conforme solicitado pela norma o valor a ser utilizado na verificação deve ser o menor, logo é o da flambagem lateral com torção $M_{RD} = 672,35 \text{ kN.cm}$.

Para finalizar a condição do momento fletor, será apresentado o momento solicitante calculado (M_{sd}) conforme a carga de 1000Kg que será submetida a longarina e o comprimento de 230cm. Com estes dados a reação de apoio será 5 kN e a distância 115cm.

$$M_{sd} = 5 \cdot 115 = 575 \text{ kN.cm} \quad (47)$$

Com todos os dados disponíveis é possível analisar a condição principal conforme equação (1).

$$672,35 \text{ kN.cm} \geq 575 \text{ kN.cm} \quad (48)$$

4.1.1.1 Cortante

Com o objetivo de complementar a análise de uma viga, ainda no critério da resistência, será verificado a alma ao cortante, analisando o escoamento e/ou flambagem da alma devido ao cortante

A equação do cortante está relacionada a três condições calculadas abaixo, iniciando pela equação (27):

$$\frac{8}{0,2} \leq 1,08 \left(\frac{20000 \cdot 5}{30} \right)^{0,5} \quad (49)$$

$$40 \leq 62,354 \quad \mathbf{OK}$$

Primeira condição atendeu, caso não tivesse sido atendida deveria ser realizado as outras duas condições para ver qual delas retornaria à equação da cortante.

Para esta condição, a fórmula do cortante será a (27) calculado abaixo:

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot 30 \cdot 8 \cdot 0,2}{1,1} = 26,18182 \text{ kN ou } 26.181,82 \text{ N} \quad (50)$$

No cálculo da cortante o dado será extraído do *software Solidworks* o qual apresentou o seguinte valor:

$$V_{Sd} = 5000 \text{ N} \quad (51)$$

Abaixo a análise final da força cortante solicitante de cálculo em relação a força cortante resistente de cálculo:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (52)$$

$$5000 \text{ N} \leq 26.181,82 \text{ N}$$

4.1.2 Critério da flecha

Próximo passo da análise é o critério da flecha, onde a flecha máxima deve ser menor que a flecha admissível.

$$f_{max} \leq f_{adm} \quad (2)$$

Para o valor da flecha admissível (f_{adm}), será utilizado a tabela A.1 da norma ABNT NBR 14762:2010 (Anexo 02 deste trabalho), onde o deslocamento teórico é o item vigas de piso, calculado na equação (53):

$$f_{adm} = \frac{230}{350} = 0,657143 \text{ cm} \quad (53)$$

No cálculo da flecha máxima o dado será extraído do *software Solidworks* o qual apresentou o seguinte valor:

$$f_{máx} = 0,3229 \text{ cm} \quad (54)$$

Logo analisando estes resultados conforme equação (2), temos:

$$0,3229 \text{ cm} \leq 0,657143 \text{ cm} \quad (55)$$

4.2 Análise computacional

Após a modelagem da peça no *Solidworks* foi definido as configurações do material conforme figura – 8 e de acordo com as propriedades do material, sendo os itens com asterisco cruciais para a simulação no software.

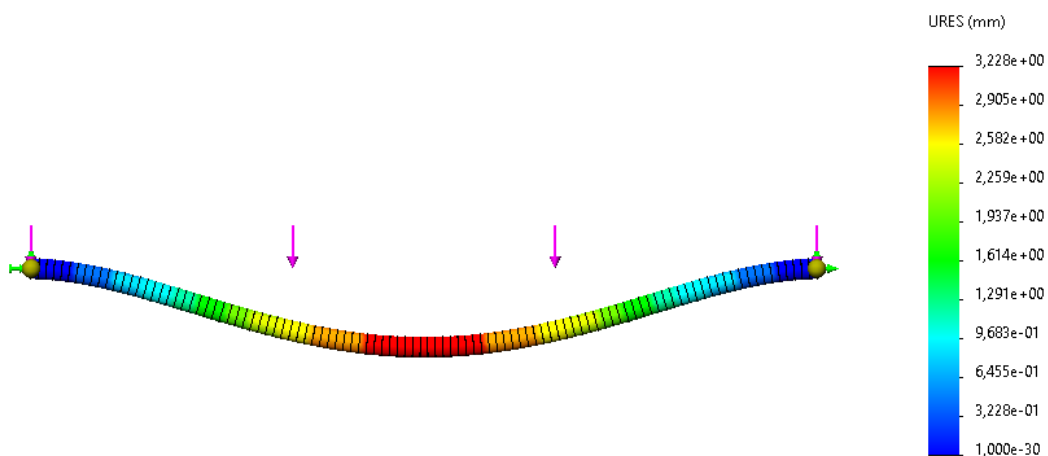
Tabela 3 – Resultado Critério da Resistência

Propriedade	Valor
Módulo elástico*	2e+11 N/m ²
Coeficiente de Poisson*	0,3
Módulo de cisalhamento	7,93 e+10 N/m ²
Massa específica*	7850 Kg/m ³
Limite de escoamento*	300.000.000 N/m ²

Fonte: *Software SolidWorks* – Adaptado.

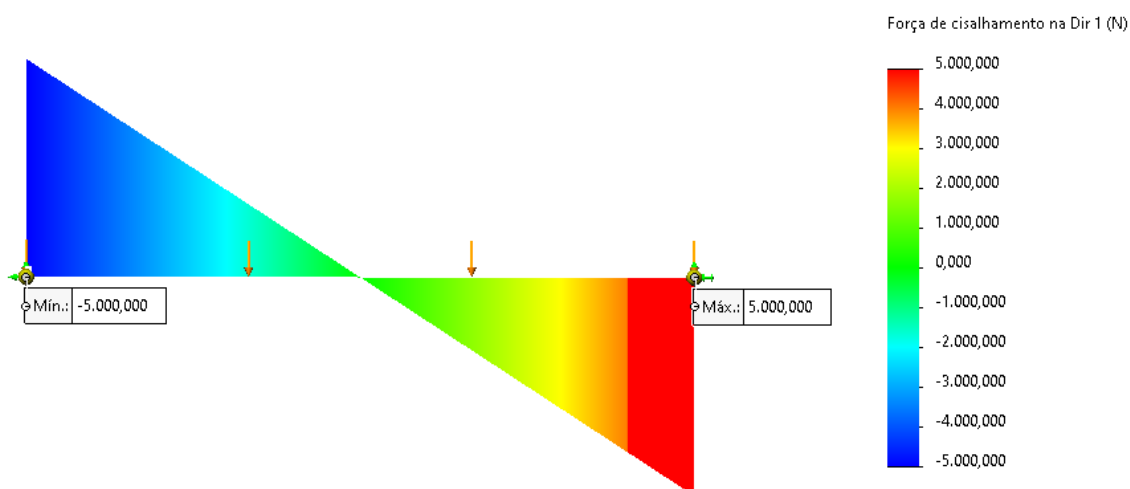
Com a longarina definida, segue abaixo dados retirados do *software*, onde a longarina foi engastada suas laterais e posteriormente aplicado uma carga distribuída de 1000Kgf na sua parte superior.

Figura 10 – Deslocamento de 3,229mm



Fonte: O Autor, retirado do *software SolidWorks*

Figura 11 – Força de cisalhamento / cortante 5.000 N



Fonte: O Autor, retirado do software SolidWorks

4.3 Discussão dos resultados

Após estudo teórico utilizando as equações analíticas de estática de acordo com a NBR 14762:2010 pelo critério da resistência, da cortante e da flecha, temos abaixo os principais resultados:

Tabela 4 – Resultado Critério da Resistência

Momento Fletor resistente	Momento Fletor solicitante
672,35 <i>kN.cm</i>	575 <i>kN.cm</i>

Observa-se que, para o critério da resistência, a carga calculada é maior que a solicitante. Atendendo aos requisitos da norma, sendo que a longarina ainda apresenta um valor 17% acima do solicitante.

Tabela 5 – Resultado Cortante

Cortante resistente	Cortante solicitante
26181,82 <i>N</i>	5000 <i>N</i>

Na análise da cortante, pode-se verificar que o valor que a longarina suporta é maior do que o solicitante para a carga determinada de 1000Kg em cada longarina,

estando em conformidade com a norma. Esta diferença de cinco vezes o valor deve-se ao comprimento da longarina, se a mesma fosse mais curta o resultado seria menor na cortante resistente.

Tabela 6 – Resultado Critério da Flecha

Deslocamento resistente	Deslocamento solicitante
0,657143 <i>cm</i>	0,3229 <i>cm</i>

A última análise foi o critério da flecha, o qual apresentou um fator 100% acima do solicitado. Apesar do CAE ter suas incertezas, este resultado do deslocamento solicitante se aproxima do real.

Com isto, os perfis formados a frio (PFF) têm a forma e as dimensões adequadas à sua solicitação, pelo motivo de desenvolver um perfil específico para a aplicação do projeto, é possível otimizar suas dimensões e isso representa economia.

5 CONCLUSÃO

Com a alta do preço do aço (341%) neste período pandêmico, o dimensionamento correto de uma longarina é de fundamental importância, visando baixo custo e atendendo aos requisitos da norma com relação as cargas solicitadas, mantendo assim a empresa competitiva no mercado, apresentando um produto devidamente dimensionado, resistente, com qualidade e de baixo custo.

Com a metodologia desse estudo foi possível completar os objetivos específicos.

A primeira análise, foi do critério da resistência solicitado pela norma onde três itens foram avaliados: Início de escoamento da seção efetiva que apresentou um resultado de 1740 kN.cm, a segunda foi a flambagem lateral com torção com resultado de 672,35 kN.cm e a terceira análise solicitada pela norma não se aplicou a este perfil.

Estes resultados são os teóricos exigidos pela norma que foram comparados com o momento real da carga aplicada a qual apresentou um valor de 575 kN.cm. A norma ABNT NBR 14762:2010, exige que seja utilizado o menor valor teórico encontrado para comparar com o valor solicitante. Neste caso o critério da flambagem lateral com torção foi o menor, apresentando um valor próximo entre o solicitado e o resistente, mas mesmo assim com uma margem favorável de 17%. Logo, nas análises realizadas dos três critérios determinados pela norma, a longarina em questão esteve em conformidade nesta primeira análise.

O segundo critério foi a cortante que apresentou valor teórico de 26.181,82N, valor acima do solicitado 500N devido ao comprimento da longarina. Também este atendendo ao requisito da norma.

E a terceira análise foi em relação a flecha máxima admissível que teve como resultado teórico conforme tabela A.1 da norma, 0,657143cm de deslocamento e a análise computacional com a carga e perfil definido apresentou 0,3229cm. Item também em conformidade com os requisitos da ABNT NBR 14762:2010.

Com isso conclui-se que a longarina analisada, com 8cm de altura, 6cm de mesa, espessura de 2mm e comprimento de 230cm está dimensionada corretamente para uma carga de 1000Kg. A mesma poderia ser otimizada, avaliando o critério que apresentou 17% acima, porém esta margem pode permanecer desta maneira, garantindo uma maior segurança de projeto.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15524, **Sistemas de armazenagem industrial - Parte 1: Terminologia**, (2007).

ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE**. São Paulo: 6ªEd. Editora Saraiva, 2013.

ABML, Associação Brasileira de Movimentação e Logística. **Especificação para projeto, testes e utilização de sistemas de armazenagem**. Maio 2002.

BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento de Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial**, 5a Ed. Bookman. 2007.

CASTIGLIONI, J.A.D.M.; PIGOZZO, L. **Transporte e Distribuição**. Editora Saraiva, 2014.

CARVALHO, R. M. d., Grigoletti, G. e Barbosa, D. G., **Curso básico de perfis de aço formados a frio**. 4ª ed. Porto Alegre: (2020).

CAXITO, Fabiano. **Logística: um enfoque prático**. São Paulo: 3ª Ed. Editora Saraiva, 2011.

DHATT, G.; LEFRANÇOIS, E.; TOUZOT, G. **Finite element method**. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2012.

DIAS, Marco A. P. **Administração de Materiais - Uma Abordagem Logística**. Grupo GEN, 7ªEd 2019.

FISH, Jacob; BELYTSCHKO, Ted. **Um primeiro curso em elementos finitos**. Grupo GEN, 1ªEd 2009.

Mercado e consumo. **A logística ganha a guerra? Impactos e tendências com a pandemia**. Disponível em: <<https://mercadoeconsumo.com.br/2021/01/26/a-logistica-ganha-a-guerra-impactos-e-tendencias-com-a-pandemia/>> Acesso em 16 de jul. de 2021

MOURA, R.. **Dicionário de Logística**. São Paulo: Imam, 2004. p. 162.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas**: Grupo A, 2013. 9788582600238. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582600238/>. Acesso em: 01 jun. 2022.

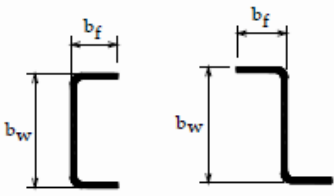
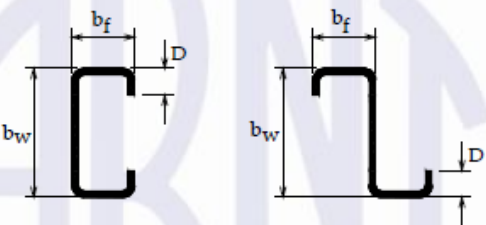
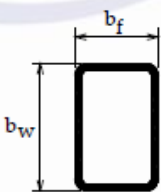
PINHEIRO, Antonio Carlos da Fonseca Bragança. **Estruturas metálicas**: Cálculos, detalhes, exercícios e projetos. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2005. 301 p.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de aço: Dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800 : 2008**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2009.

SILVA, Valdir Pignatta e. **Dimensionamento de Estruturas de Aço**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012. 150 p

ANEXO A - Tabela 12 da norma NBR 14762:2010

Tabela 12 — Coeficiente de flambagem local k_{ℓ} para a seção completa em barras sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia

Caso a	<p>Seção U simples e Seção Z simples</p>  $k_{\ell} = \eta^{-1,843}$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0)$
Caso b	<p>Seção U enrijecido e Seção Z enrijecido</p>  <p>As expressões a seguir são válidas para $0,2 \leq \eta \leq 1,0$ e para os valores de μ indicados</p> $k_{\ell} = a - b(\mu - 0,2)$ $a = 81 - 730\eta + 4\,261\eta^2 - 12\,304\eta^3 + 17\,919\eta^4 - 12\,796\eta^5 + 3\,574\eta^6$ $b = 0 \quad \text{para } 0,1 \leq \mu \leq 0,2 \text{ e } 0,2 \leq \eta \leq 1,0$ $b = 0 \quad \text{para } 0,2 < \mu \leq 0,3 \text{ e } 0,6 < \eta \leq 1,0$ $b = 320 - 2\,788\eta + 13\,458\eta^2 - 27\,667\eta^3 + 19\,167\eta^4 \quad \text{para } 0,2 < \mu \leq 0,3 \text{ e } 0,2 \leq \eta \leq 0,6$
Caso c	<p>Seção tubular retangular com solda de costura contínua (para seção tubular retangular formada por dois perfis U simples ou U enrijecido com solda de costura intermitente, k_{ℓ} deve ser calculado para cada perfil isoladamente).</p>  $k_{\ell} = 14,5 + 178\eta - 602\eta^2 + 649\eta^3 - 234\eta^4$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0)$
NOTA 1	<p>b_f, b_w e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado na Figura correspondente.</p>
NOTA 2	<p>$\eta = b_f / b_w$.</p>
NOTA 3	<p>$\mu = D / b_w$.</p>

ANEXO B - Tabela A.1 da norma NBR 14762:2010

Tabela A.1 — Deslocamentos máximos

Descrição	δ^a
Travessas de fechamento	$L/180^b$
	$L/120^{c,d}$
Terças de cobertura ^g	$L/180^e$
	$L/120^f$
Vigas de cobertura ^g	$L/250^h$
Vigas de piso	$L/350^h$
Vigas que suportam pilares	$L/500^{h,i}$
Galpões em geral e edifícios de um pavimento:	$H/300$
— Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/400^j$
— Deslocamento horizontal do nível da viga de rolamento em relação à base	
Edifícios de dois ou mais pavimentos:	
— Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/400$
— Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos	$H/500^j$
^a L é o vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço, H é a altura total do pilar (distância do topo à base) ou a distância do nível da viga de rolamento à base, h é a altura do andar (distância entre centros das vigas de dois pisos consecutivos ou entre centros das vigas e a base no caso do primeiro andar). ^b Deslocamento paralelo ao plano do fechamento (entre linhas de tirantes, caso eles existam). ^c Deslocamento perpendicular ao plano do fechamento. ^d Considerar apenas as ações variáveis perpendiculares ao plano de fechamento (vento no fechamento) com seu valor característico. ^e Considerar combinações raras de serviço, utilizando-se as ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente. ^f Considerar apenas as ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente (vento de sucção) com seu valor característico. ^g Deve-se também evitar a ocorrência de empoçamento, com atenção especial aos telhados de pequena declividade. ^h Caso haja paredes de alvenaria sobre ou sob uma viga, solidarizadas com essa viga, o deslocamento vertical também não deve exceder a 15 mm. ⁱ O diferencial do deslocamento horizontal entre pilares do pórtico que suportam as vigas de rolamento não pode superar 15 mm. ^j Tomar apenas o deslocamento provocado pelas forças cortantes no andar considerado, desprezando-se os deslocamentos de corpo rígido provocados pelas deformações axiais dos pilares e vigas.	

ANEXO C - Item 9.8.2.1 da norma NBR 14762:2010

9.8.2.1 Início de escoamento da seção efetiva

$$M_{Rd} = W_{ef} f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,10)$$

onde

W_{ef} é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento, calculado com base em uma das duas opções apresentadas a seguir:

- no método da largura efetiva (MLE), conforme 9.2.2 e 9.2.3, com a tensão σ calculada para o estado-limite último de início de escoamento da seção efetiva;
- no método da seção efetiva (MSE), conforme indicado a seguir:

$$W_{ef} = W \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$W_{ef} = W \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} \quad \text{para } \lambda_p > 0,673$$

$$\lambda_p = \left(\frac{W f_y}{M_\ell} \right)^{0,5}$$

M_ℓ é o momento fletor de flambagem local elástica, calculado por meio de análise de estabilidade elástica, ou, de forma direta, segundo a expressão seguinte:

$$M_\ell = k_\ell \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_w/t)^2} W_c$$

W é módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento;

W_c é módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida.

Os valores do coeficiente de flambagem local para a seção completa, k_ℓ , podem ser calculados pelas expressões indicadas na Tabela 12 ou obtidos diretamente da Tabela 13.

ANEXO D - Item 9.8.2.2 da norma NBR 14762:2010

9.8.2.2 Flambagem lateral com torção

O momento fletor resistente de cálculo referente à flambagem lateral com torção, tomando-se um trecho compreendido entre seções contidas lateralmente, deve ser calculado por:

$$M_{Rd} = \chi_{FLT} W_{c,ef} f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,10)$$

onde

$W_{c,ef}$ é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida, calculado com base em uma das duas opções apresentadas a seguir:

- no método da largura efetiva (MLE), conforme 9.2.2 e 9.2.3, adotando $\sigma = \chi_{FLT} f_y$;
- no método da seção efetiva (MSE), conforme indicado a seguir:

$$W_{c,ef} = W_c \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$W_{c,ef} = W_c \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} \quad \text{para } \lambda_p > 0,673$$

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi_{FLT} W_c f_y}{M_d} \right)^{0,5}$$