



DIMENSIONAMENTO DE TERÇAS METÁLICAS COM DIFERENTES SISTEMAS ESTRUTURAIS

Autor 1 – Douglas João Boff
169077@upf.br

Autor 2 – Professor Dr. Fábio Goedel / Projeto
goedel@upf.br

Comissão Examinadora – Professor Me. Guilherme Reschke do Nascimento, Professor Me. Jairo Machado

RESUMO

Terças são vigas que compõem a cobertura de edificações. Elas são responsáveis por sustentar as telhas e por realizar a transmissão do carregamento da cobertura e das ações do vento para os pórticos de estrutura principal. À vista disso, este trabalho visa o dimensionamento de terças em estruturas metálicas, considerando os diferentes sistemas estruturais (bi apoiado, luva e transpasse). O Método da Resistência Direta (MRD) foi utilizado para realizar o dimensionamento, sendo que ele é detalhado pela NBR 14762:2010 e os perfis utilizados são padronizados pela NBR 6355:2012. A fim de realizar um comparativo entre os sistemas estruturais, foi desenvolvida uma planilha para dimensionamento dos perfis e para verificar a resistência das solicitações. Através das verificações dos perfis, com o auxílio do software Ftool, foi possível comparar os deslocamentos solicitantes para cada caso estudado, buscando assim, o melhor sistema estrutural para diferentes distâncias entre pórticos. Como resultados, foi verificado que com distanciamento de 5 metros entre pórticos, o sistema bi-apoiado apresentou bom comportamento, possibilitando um dimensionamento mais otimizado. Para distanciamentos de 6, 7, 8, 9 e 10 metros entre pórticos, o sistema que se apresentou como melhor solução foi o de luva. Dessa forma, para distâncias entre pórticos inferiores a 7 metros o sistema bi-apoiado tem boa resistência, enquanto para distâncias maiores vale realizar uma análise para utilização de sistemas que apresentem continuidade entre as terças, as quais denotam maior capacidade de carga nas ligações.

Palavras-chave: Terças metálicas; Dimensionamento; Sistemas estruturais; Método da Resistência Direta (MRD).

1 INTRODUÇÃO

As terças metálicas têm como principais funções servir de apoio para as telhas de cobertura e transmitir as ações do vento para a estrutura principal. Esse componente estrutural, que pode ser considerado simples, deve ser dimensionado com atenção, pois além de ter grande importância na estrutura, também apresenta boa parte do peso total de uma cobertura. Sendo assim, é importante considerar os sistemas estruturais utilizados para fixá-las nos pórticos e para obter continuidade entre as terças.

Conforme Fávero Neto (2013), o sistema bi apoiado é o mais simples e de menor custo. Esse sistema é utilizado em vãos entre 4 e 6 metros por conta da facilidade de fabricação e

montagem das peças, no entanto, há dificuldade de instalação quando utilizado para dois vãos contínuos.

Para execução de múltiplos vãos, são indicados os sistemas de transpasse e luva, pois são mais favoráveis para se obter continuidade entre as terças, fazendo com que sejam reduzidos os esforços solicitantes máximos (FÁVERO NETO, 2013).

De modo a verificar a eficiência dos diferentes sistemas estruturais (bi apoiado, transpasse e luva) para fixação de terças metálicas, o presente trabalho tem como finalidade realizar um estudo para efetivar o dimensionamento das terças de um galpão proposto em busca de argumentos para definição de qual o melhor sistema estrutural para diferentes distâncias entre pórticos.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise comparativa dos diferentes sistemas estruturais, sendo eles: bi apoiado, luva e transpasse, a fim de verificar qual dos sistemas têm melhor comportamento para diferentes distâncias entre pórticos.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliar perfis utilizados para compor o sistema das terças;
- Analisar o peso da estrutura;
- Realizar uma estimativa de custo final (peso, pintura, montagem, parafusos);
- Desenvolver uma planilha para verificação e dimensionamento de um tipo de perfil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, será apresentada a fundamentação teórica utilizada para a realização deste estudo considerando os tópicos essenciais para efetivar o dimensionamento dos perfis formados a frio.

2.1 Estado da arte

No que tange ao Estado da Arte, em relação ao tema ora proposto, verificou-se que Fávero Neto (2013) realizou um estudo sobre terças de aço formadas a frio com continuidade nos apoios, com ênfase em ligações por transpasse ou luva, e constatou que o comportamento estrutural de cada ligação depende da sua configuração geométrica e dos carregamentos aplicados. Sendo assim, a rigidez das ligações em relação a deslocamentos verticais é diretamente correlacionada ao tipo de ligação utilizada.

Conforme Fávero Neto (2013), terças com ligações por transpasse, quando comparadas a terças com continuidade física, têm seu comportamento estrutural melhorado, apresentando aumento de até 30% no momento fletor e redução de até 21% nos deslocamentos.

Quando realizado a mesma comparação para terças com ligações por luva, apresentam comportamento estrutural inferior, com momento fletor até 14% menores e deslocamentos até 68% maiores.

De modo geral, Fávero Neto (2013) afirma que ligações por transpasse são plenamente satisfatórias para questão estrutural, contribuindo para a capacidade de carga da ligação e diminuindo a deformação dos perfis.

Mesmo obtendo resultados bastante satisfatórios para ligações por transpasse, é pertinente também destacar a importância dos demais sistemas estruturais. Apesar de o sistema de luva não ser tão eficiente quando comparado ao de transpasse, ele apresenta outras vantagens, como a facilidade no transporte e na montagem. Desta forma, convém considerar cada tipo de sistema, pensando em suas vantagens e desvantagens para cada situação de aplicação (FÁVERO NETO, 2013).

2.2 Terças Bi Apoiadas

O sistema estrutural bi apoiado pode ser considerado um sistema bastante simples. Esse sistema não necessita de mão-de-obra qualificada para a execução de sua montagem, tendo em vista que o perfil da terça é parafusado nos apoios da estrutura principal de forma simples, conforme apresentado na Figura 1.

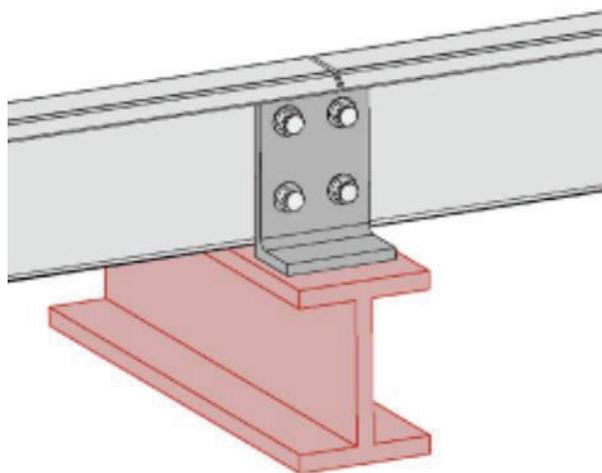


Figura 1 - Sistema bi apoiado

(Fonte: *Modular Sistemas Construtivos*, 2012)

Em contrapartida, o sistema bi apoiado é limitado, pois não apresenta continuidade entre as terças e, por conta disso, não gera rigidez nas ligações. Desse modo, esse sistema estrutural é utilizado em obras menos complexas e com dimensões reduzidas, abrindo espaço para sistemas estruturais com continuidade nos apoios, conforme apresentaremos a seguir.

2.3 Terças com continuidade nos apoios

Terças com continuidade nos apoios podem ser obtidas a partir de ligações parafusadas entre terças adjacentes, por meio de transpasse entre os perfis ou através da utilização de um terceiro componente mais curto denominado luva (ou cobrejunta) (SCHIAVON, 2019).

Conforme Fávero Neto (2013), pelo fato de as terças não possuírem continuidade perfeita nas ligações de transpasse e luva elas estão sujeitas a problemas inerentes às ligações. A seguir, será apresentado o comportamento estrutural de terças com continuidade nos apoios por meio de ligações por transpasse e por luva.

2.3.1 Ligações por transpasse

A ligação por transpasse consiste, basicamente, na união de duas terças pela alma, sendo uma sobreposta a outra, transpassando um comprimento de terça para cada lado do apoio, conforme representado na Figura 2:

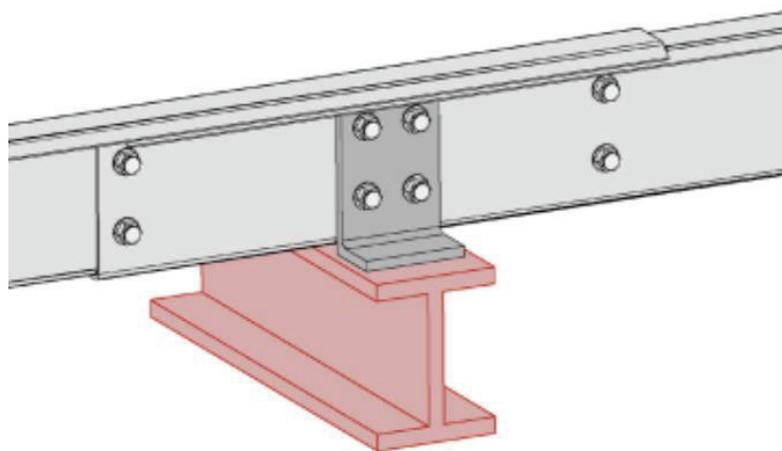


Figura 2 - Ligação por transpasse

(Fonte: *Modular Sistemas Construtivos*, 2012)

Esse tipo de sistema é bastante utilizado em obras de grandes dimensões. No entanto, é um sistema que requer mão de obra mais qualificada para realizar a montagem. Além disso, o transporte das terças para esse sistema pode ser considerado um ponto negativo, visto que são necessários perfis maiores que o comprimento do vão da obra, justamente para gerar o transpasse.

2.3.2 Ligações por luva

O método de ligações por luva é bastante semelhante ao sistema bi apoiado, porém, com o acréscimo da luva. É possível observar esse sistema de ligação através da Figura 3, a qual impõe a condição de continuidade entre as terças, gerando assim maior rigidez na ligação.

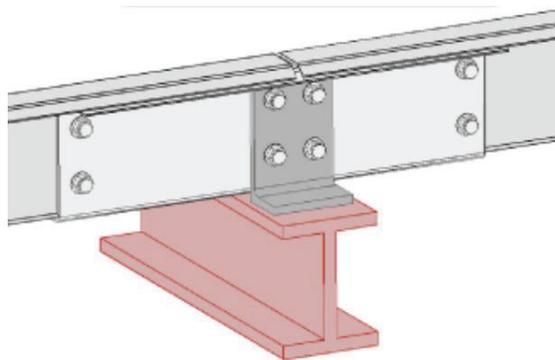


Figura 3 - Ligação por luva

(Fonte: *Modular Sistemas Construtivos*, 2012)

A ligação por luva também pode ser comparada ao sistema de transpasse pelo fato de que ambos os sistemas apresentam continuidade nas terças. No entanto, pode-se destacar uma grande vantagem no sistema de ligação por luva quando comparada ao sistema de transpasse que é a facilidade de transporte e de montagem. (GUTIERREZ et al., 2011, apud FÁVERO NETO, 2013, p.52).

2.4 Instabilidade em perfis formados a frio

Perfis de aço formados a frio (PFF) têm boa relação entre o momento de inércia e massa. Por conta disso, apresentam certa facilidade em ganhar inércia através das diversas formas geométricas, alcançando assim grande eficiência estrutural.

Perfis formados a frio são fabricados com a utilização de tiras de chapas nas quais são impostas dobras. À vista disso, esse tipo de perfil também é conhecido por perfis dobrados. De acordo com Fávero Neto (2013), pelo fato de serem perfis formados através de dobras, possuem espessuras relativamente baixas, e justamente por possuírem essa característica, esse tipo de perfil é mais suscetível a fenômenos de instabilidade, e no caso de perfis com seção aberta, apresentam baixa resistência a torção.

A instabilidade nos perfis é relacionada às deslocabilidades dos perfis em sua seção transversal. Desta forma, pode-se destacar três grupos de instabilidades: instabilidades globais, locais e distorcionais, conforme apresentado na Figura 4.

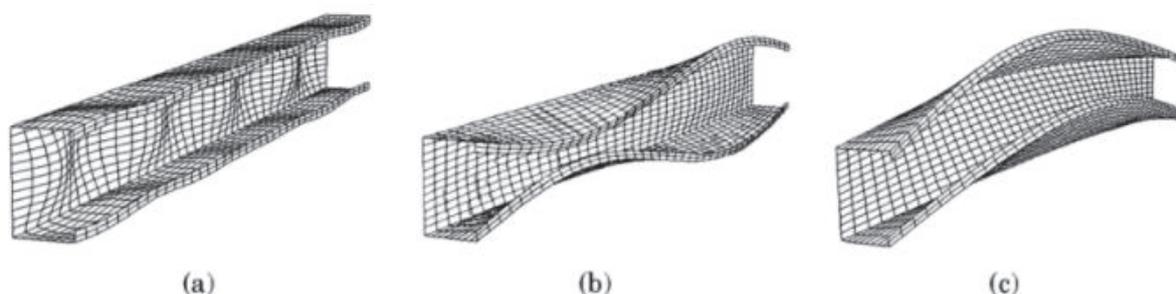


Figura 4 - Configuração dos modos de instabilidade (a) local. (b) distorcional. (c) global

(Fonte: CAMOTIM; SILVESTRE; DINIS, 2006)

Na sequência, serão apresentados cada um desses grupos de instabilidades.

2.4.1 Instabilidade local

Este modo de instabilidade tem como característica a instabilidade dos elementos da seção transversal, desenvolvendo deformações fora do plano enquanto as dobras do perfil não transladam. Schiavon (2019, p. 24) afirma que “o comprimento de semionda do modo crítico local dá-se para valores abaixo da largura do maior elemento da seção transversal de um perfil”.

Pelo fato de os perfis formados a frio serem constituídos por chapas finas, sua seção transversal possui elevada relação largura/espessura, fazendo assim com que haja necessidade de realizar a verificação para flambagem local (KLEINA e CASEKER, 2014).

Conforme Silva e Pignatta (2008), os elementos planos que compõem a seção de perfis de chapa dobrada podem se deformar localmente quando expostos a compressão axial, compressão com flexão e cisalhamento, por exemplo. A flambagem local (Figura 5) não implica no fim da capacidade resistente do perfil, porém reduz a rigidez global à deformação.

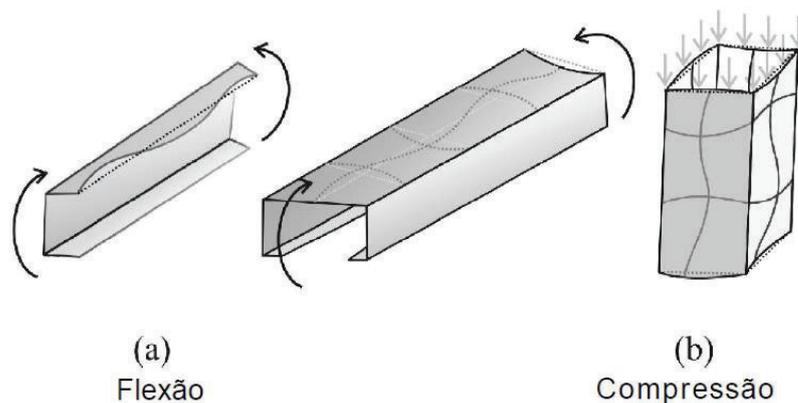


Figura 5 - Flambagem local
(Fonte: SILVA e PIGNATTA, 2008)

2.4.2 Instabilidade distorcional

A instabilidade distorcional (Figura 6) caracteriza-se pela falha do perfil ocasionada pela distorção entre a seção transversal e seu plano, apresentando alteração da forma original da seção transversal com deslocamentos laterais e rotação dos elementos do perfil.

Esse modo de falha está presente em perfis com esbelteza intermediária e que necessariamente contenham enrijecedores de borda ou intermediários, sendo mais suscetíveis a esta falha perfis com aço de alta resistência, enrijecedores com pouca largura e elementos pouco esbeltos (SCHIAVON, 2019). De acordo com Javaroni (1999, p. 44) “quando submetidos a flexão, ocorre a flambagem da parte comprimida da alma juntamente com a aba, podendo ocorrer translação da seção na direção normal à alma”.

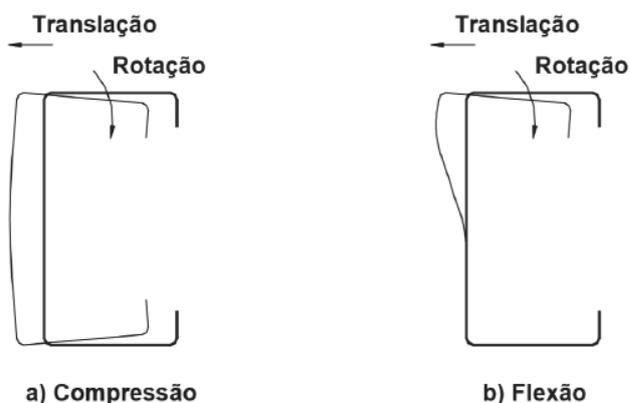


Figura 6 - Instabilidade por distorção
(Fonte: JAVARONI, 1999)

2.4.3 Instabilidade global

Segundo Silva (2004), a instabilidade global pode acontecer em três formas: instabilidade por flexão, por torção e a combinação entre os dois casos. A instabilidade por flexão gera deslocamentos laterais em torno do eixo de menor inércia. A instabilidade por torção consiste na rotação da seção transversal em torno do eixo longitudinal. Enquanto no terceiro caso, a combinação entre a instabilidade por flexão e por torção, é o de maior complexidade.

O comprimento da semionda é o comprimento total da barra e esta falha ocorre normalmente em perfis mais esbeltos. Quando perfis não possuem travamentos laterais e são expostos à flexão, estão sujeitos a instabilidade lateral por torção (SCHIAVON, 2019).

2.5 Perfis utilizados em estruturas metálicas

Para a realização de obras em estruturas metálicas existem três grupos de perfis: laminados a quente, soldados e formados a frio.

- a) Perfis laminados a quente: fabricados em usinas siderúrgicas;
- b) Perfis soldados: obtidos a partir da união de tiras de chapas por meio de soldagem;
- c) Perfis formados a frio: fabricados a partir de chapas e com processo de dobramento em temperatura ambiente para obter o formato desejado.

Os grupos *a* e *b* (perfis laminados e perfis soldados) são conhecidos por serem perfis pesados e também possuem seus procedimentos de dimensionamento estabelecidos pela NBR 8800:2008. Já o grupo *c* (perfis formados a frio) é conhecido por perfis leves e são dimensionados a partir da NBR 14762:2010.

2.5.1 Perfis utilizados em terças

As terças têm grande importância em construções executadas com estruturas metálicas, pois são responsáveis por sustentar as telhas e também transmitir as ações do vento e sobrecarga para a estrutura principal. Desta forma, elas podem ser utilizadas tanto em perfis laminados, quanto em perfis dobrados.

As seções que são comuns para os perfis utilizados em terças são perfis U (simples ou enrijecido), perfil sigma e perfil Z enrijecido (Figura 7).

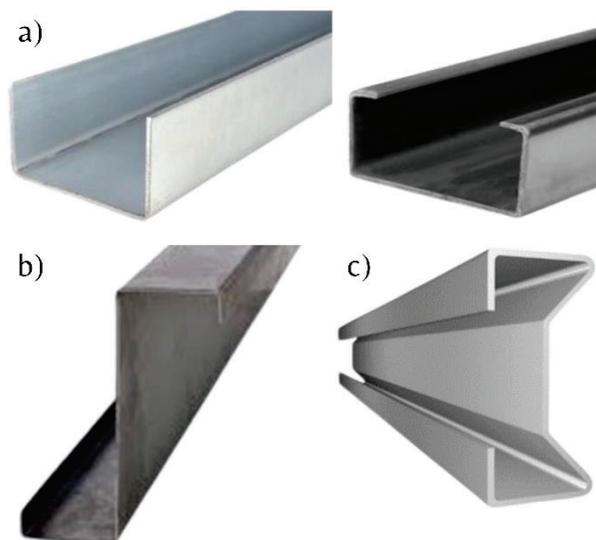


Figura 7 - Perfis de aço utilizados em terças. (a) perfil U enrijecido e simples. (b) perfil Z. (c) perfil Sigma

(Fonte: MACHADO, 2022)

Os perfis laminados (U e sigma) têm maior aplicação em sistemas bi apoiados e com dois vãos contínuos, apesar de o perfil U ser muito utilizado também em sistemas de múltiplos vãos com o sistema de luvas. Enquanto a maior aplicação do perfil Z é em sistemas de múltiplos vãos, tanto com luva quanto com transpasse.

Segundo Silva et al. (2012) nem sempre são encontrados perfis laminados com dimensões desejadas para atender as necessidades do projeto de elementos estruturais leves. Desta forma, os

perfis dobrados vêm ganhando força em sua utilização, pois podem ser fabricados conforme a necessidade de cada aplicação.

2.5.2 Definição de perfis formados a frio

Perfis formados a frio são obtidos através de dobras em chapas realizadas em temperatura ambiente. Segundo Carvalho et al. (2006), são utilizadas chapas de espessura a partir de 0,4mm e possuem como limite espessuras de até 8mm, estabelecido por norma, apesar de ser possível formar perfis a frio com espessuras de até 19mm.

A principal ideia da fabricação dos PFF é a simplicidade de sua produção, sendo que essa também é sua grande vantagem. Desta maneira, pode-se afirmar que “os PFF serão, para um extenso leque de aplicação, o perfil do futuro, sobretudo num país em desenvolvimento” (CARVALHO et al., p. 32, 2006).

2.5.3 Processo de fabricação dos PFF

Segundo Silva e Pignatta (2008), são duas as maneiras para a obtenção de perfis formados a frio: processo contínuo pela utilização de perfiladeiras e processo descontínuo a partir da utilização de dobradeiras.

Pode-se realizar um comparativo entre os dois processos, visto que ambos apresentam suas vantagens e desvantagens, conforme tabela 1.

Tabela 1 - Comparativo entre formas de produção de terças metálicas

DOBRADEIRA	PERFILADEIRA
Baixo custo de equipamento	Alto custo de equipamento
Regulagem simples	Regulagem requer cuidados
Perfis limitados ao tamanho do equipamento	Perfis com comprimento ilimitado
Produção pequena	Produção grande

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Carvalho et al. (2006).

2.6 Dimensionamento de perfis dobrados

Para realizar o dimensionamento de perfis dobrados, deve-se levar em consideração alguns requisitos de verificação. Conforme trata a NBR 14762:2010 são previstos três métodos para verificação do momento fletor resistente em perfis dobrados. Sendo eles: método da largura efetiva (MLE), método da seção efetiva (MSE) e método da resistência direta (MRD). Desta forma, o método utilizado neste trabalho será o método da resistência direta. De acordo com o item C.1 Generalidades, do anexo C da norma NBR 14762 (ABNT, 2010, p. 74) “esse método substitui o método da largura efetiva e o método da seção efetiva.”

2.6.1 Método da resistência direta

Segundo Monteiro et al. (2017), o Método da Resistência Direta (MRD) demonstra-se eficiente no cálculo da resistência para barras comprimidas. Nesse método, os modos de flambagem local e flambagem distorcional podem ser previstos utilizando as tensões elásticas e as propriedades geométricas da seção bruta da barra. Esse método apresenta algumas vantagens em comparação ao Método da Largura Efetiva (MLE) e ao Método da Seção Efetiva (MSE), sendo que

O método é baseado na determinação da carga de colapso do elemento a partir de uma curva de resistência ajustada experimentalmente, que considera a carga de flambagem elástica do elemento, levando-se em consideração toda seção transversal do perfil e não apenas suas partes isoladamente. (NOGUEIRA, 2009, p. 22).

O MRD considera a interação entre as chapas que compõem o perfil, diferente do MLE que analisa cada chapa separadamente. Esta análise é feita considerando as propriedades geométricas da seção bruta do perfil. Além disso, apresenta grande vantagem por considerar explicitamente o modo distorcional. A partir do MRD é possível obter as cargas críticas de flambagem elástica do perfil, e com a utilização das curvas de resistência ajustada experimentalmente é possível obter a resistência da peça (SCHIAVON, 2019).

Conforme Castelani (2012) o Método da Resistência Direta foi desenvolvido para contornar problemas apresentados no cálculo pelo Método da Largura Efetiva, sendo que o MLE é mais difundido e muito utilizado para dimensionamento dos perfis formados a frio. À vista disso, o MRD apresenta algumas vantagens sobre o método tradicional:

- no MRD não é necessário realizar cálculos iterativos para determinação das propriedades geométricas efetivas da seção transversal. A análise é realizada em relação as propriedades geométricas da seção bruta.
- inclusão de forma objetiva a instabilidade distorcional, contribuindo para melhor entendimento dos modos de instabilidade, enquanto as normas usam métodos empíricos e o MLE utiliza uma forma indireta por meio do modo local de flambagem;
- o MRD apresenta um procedimento mais abrangente e flexível;

O MDR é objeto de estudos na área de perfis formados a frio e por ser um método novo, apresenta algumas desvantagens, sendo as principais:

- é possível aplicar apenas em perfis formados a frio, submetidos a compressão e momentos fletores;
- não considera a resistência da alma ao colapso;
- formato de perfis com furos, rasgos, chanfros, etc., não são considerados;
- não considera o encruamento nas dobras que formam os perfis formados a frio.

Conforme apresenta a NBR 14762:2010, para dimensionamento de perfis dobrados a partir do Método da Resistência Direta (MRD), devem ser consideradas as equações a seguir:

O cálculo da flambagem global é feito a partir da equação (1).

para $\lambda_0 \leq 0,6$

$$M_{Re} = W f_y$$

para $0,6 < \lambda_0 < 1,336$

(1)

$$M_{Re} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2)Wf_y$$

para $\lambda_0 \geq 1,336$

$$M_{Re} = \frac{Wf_y}{\lambda_0^2}$$

Onde:

M_{Re} = momento fletor resistente para flambagem global

W = módulo de resistência elástico

f_y = tensão de escoamento

λ_0 = índice de esbeltez reduzido associado a flambagem global

Para calcular a flambagem local é dada a equação (2).

para $\lambda_l \leq 0,776$

$$M_{Rl} = M_{Re}$$

(2)

para $\lambda_l > 0,776$

$$M_{Rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \left(\frac{M_{Re}}{\lambda_l^{0,8}}\right)$$

Onde:

M_{Rl} = momento fletor resistente para flambagem local

M_{Re} = momento fletor resistente para flambagem global

λ_l = índice de esbeltez reduzido associado a flambagem local

O cálculo da flambagem distorcional é realizado pela equação (3)

para $\lambda_{dist} \leq 0,673$

$$M_{Rdist} = W f_y \quad (3)$$

para $\lambda_{dist} > 0,673$

$$M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}}\right) \left(\frac{W f_y}{\lambda_{dist}}\right)$$

Onde:

M_{Rdist} = momento fletor resistente para flambagem distorcional

W = módulo de resistência elástico

f_y = tensão de escoamento

λ_{dist} = índice de esbeltez reduzido associado a flambagem distorcional

De modo a verificar o momento fletor resistente dos perfis, deve-se considerar o menor valor calculado entre flambagem global, flambagem local e flambagem distorcional, conforme previsto em norma.

Assim como é realizada a verificação do momento fletor resistente, da mesma forma deve ser feita a verificação da força cortante resistente dos perfis, a qual ocorre a partir da equação (4).

para $h/t \leq 1,08(Ek_v/f_y)^{0,5}$

$$V_{Rd} = \frac{0,6f_y h t}{\gamma}$$

para $1,08(Ek_v/f_y)^{0,5} < h/t \leq 1,4(Ek_v/f_y)^{0,5}$ (4)

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

para $h/t > 1,4(Ek_v/f_y)^{0,5}$

$$V_{Rd} = \frac{[0,905Ek_v t^3]}{h \gamma}$$

Onde:

V_{Rd} = força cortante resistente

t = espessura da alma

h = largura da alma

k_v = coeficiente de flambagem local por cisalhamento

f_y = tensão de escoamento

γ = coeficiente de ponderação das ações ou das resistências

E = módulo de elasticidade

Para aprovação do dimensionamento dos perfis deve-se atender as seguintes condições:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

Onde:

M_{Sd} = Momento Fletor Solicitante;

M_{Rd} = Momento Fletor Resistente;

V_{Sd} = Força Cortante Solicitante;

V_{Rd} = Força Cortante Resistente.

2.6.2 Curva de flambagem

De modo a verificar a resistência de um perfil formado a frio pelo Método da Resistência Direta, deve-se determinar as forças críticas de flambagem elástica do perfil como um todo, aplicando essa informação em conjunto a uma série de curvas de resistência, sendo possível assim, determinar a resistência última do perfil (CARVALHO; GRIGOLETTI; BARBOSA, 2021).

Conforme Castelani (2012), para utilização do MRD é necessário obter os valores de flambagem local e distorcional dos perfis que podem ser obtidos através de diferentes métodos

numéricos, são exemplos disso o Método das Fixas Finitas (MFF), Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método das Fixas Finitas restrungidas / (MFFr).

Para realizar a análise e, consecutivamente, obter os valores de flambagem local e ditorcional, podem ser utilizados alguns programas computacionais que realizam a análise da estabilidade elástica, como por exemplo: ANSYS, ABAQUS, CU-FSM e PFF_Calc. Neste trabalho, será utilizado o software CU-FSM por ser um programa gratuito e de fácil acesso.

O CU-FSM permite realizar a análise da estabilidade elástica em perfis de parede fina, fornecendo como resultado gráficos tensão x comprimento de meia-onda, bem como os modos de flambagem, conforme apresentado na Figura 8.

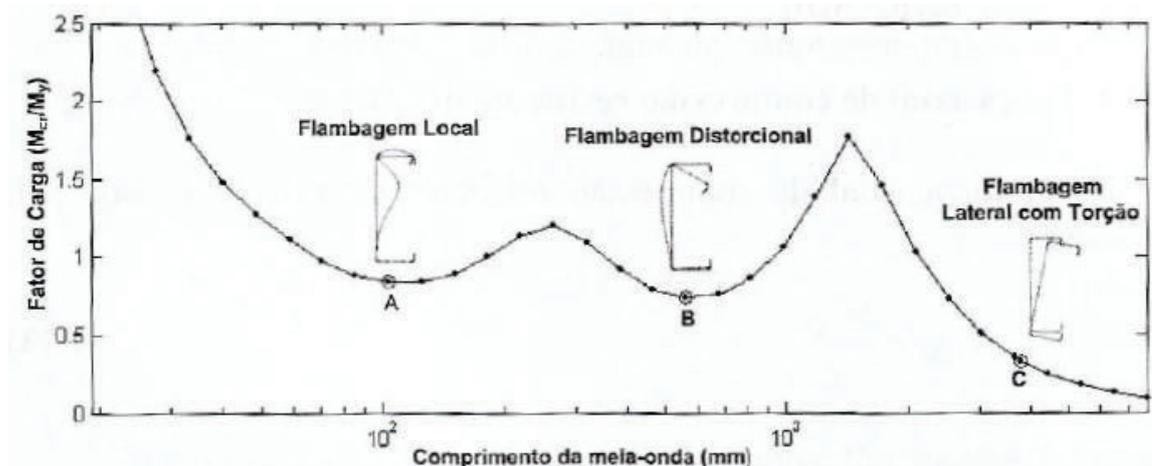


Figura 8 - Curva de flambagem – CU-FSM

(Fonte: CARVALHO; GRIGOLETTI; BARBOSA, 2021)

Carvalho, Grigoletti, Barbosa (2021, p. 338) afirmam que “estes gráficos são formados após o programa analisar vários comprimentos do perfil, definidos pelo usuário na entrada de dados”.

A seguir, será apresentada a metodologia utilizada.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, voltada à metodologia, serão detalhados os materiais utilizados, bem como sua preparação, estudos praticados e desenvolvimento de planilha para cálculo de perfis dobrados. A Figura 9 apresenta um panorama geral do desenvolvimento deste estudo.

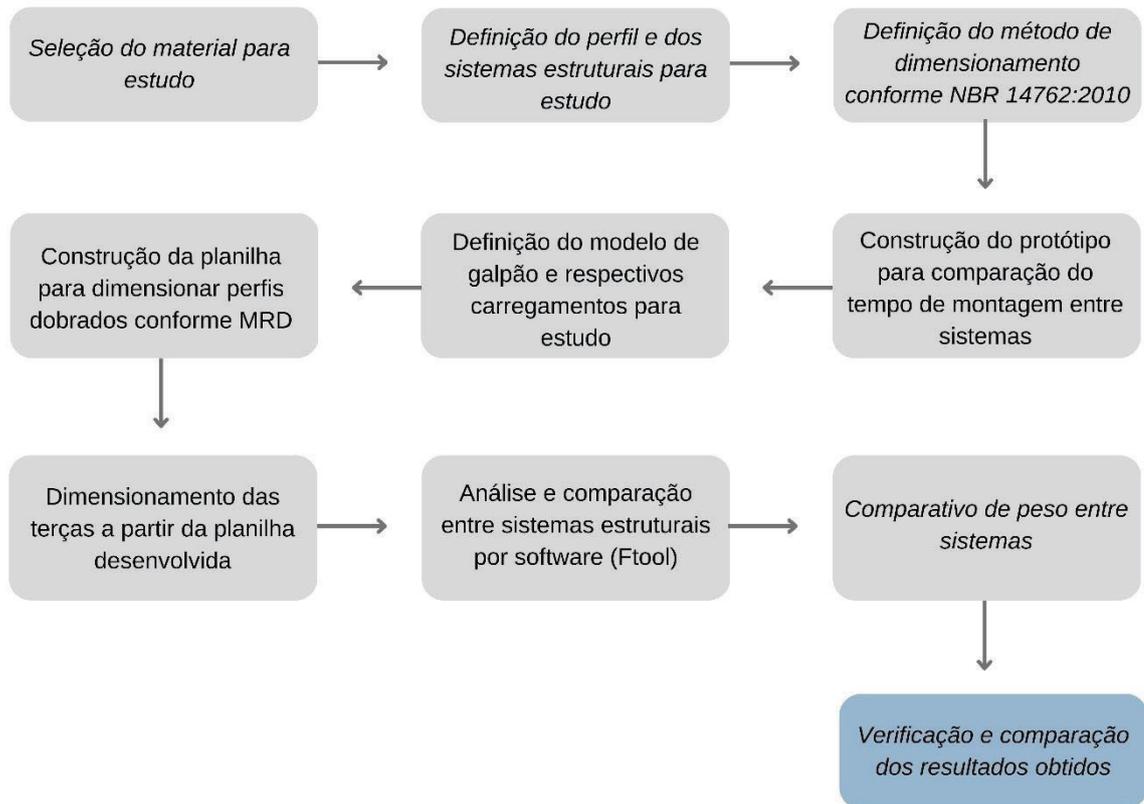


Figura 9 - Fluxograma de Metodologia

(Fonte: O autor, 2022)

3.1 Materiais Utilizados

Para a realização deste trabalho, foram consideradas terças com perfil de tipo Z enrijecido. Dentre as diversas razões por essa escolha, destacam-se a ótima resistência para esse componente estrutural e também por ser o melhor perfil para ser utilizado em ligações por transpasse.

Para a obtenção de dados, com o intuito de comparar os sistemas estruturais citados neste estudo (bi apoiado, transpasse e luva), realizou-se a fabricação de um protótipo em escala diminuída, o qual era composto por perfis Z, tala/luva e parafusos, conforme apresentados na Figura 10.

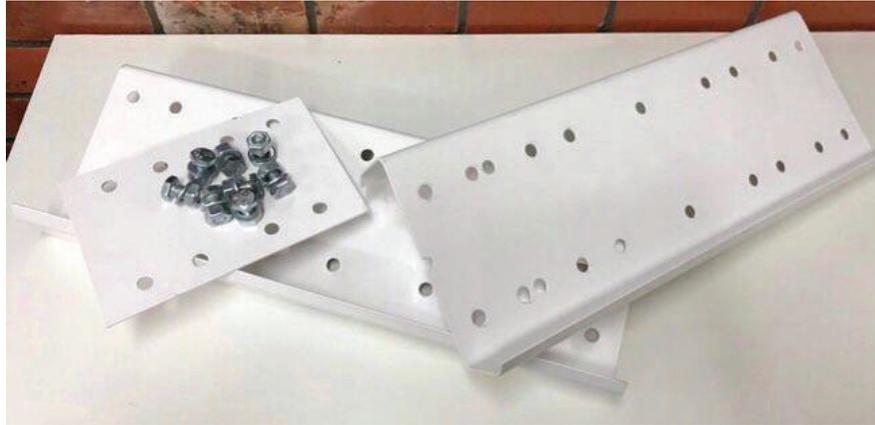


Figura 10 - Terças Z, tala e parafusos

(Fonte: O autor, 2022)

Para a obtenção dos perfis Z, foram utilizadas chapas de aço, cortadas por meio de guilhotina, dobradas com o auxílio de dobradeira e furadas por puncionadeira. A tala/luva, foi fabricada do mesmo modo que os perfis Z, porém, não foram realizadas dobras.

Foram utilizados parafusos de 1/2"x1", os quais são compostos pelo parafuso, porca e arruelas.

3.2 Comparativo Entre os Sistemas Estruturais

Alguns fatores devem ser considerados para realizar uma estimativa de custos para obter uma cobertura utilizando terças: peso da estrutura, estimativa de custo e tempo de montagem. Em seguida, serão abordados cada um desses fatores.

3.2.1 Peso da estrutura

Para realizar uma aproximação do peso final e, conseqüentemente, uma estimativa de custo de uma estrutura composta por terças metálicas, deve-se levar em consideração o peso dos perfis que compõem as próprias terças e chapas de ligação onde se faz a utilização de fixação por luvas.

Para efetuar o cálculo do peso dos perfis e das chapas de ligação, considera-se a espessura da chapa utilizada, largura e o comprimento total do perfil. Desta forma, é utilizada a equação (5) para a realização do cálculo.

$$PP = t * L * \gamma * l \quad (5)$$

Onde:

PP = Peso do Perfil (kg)

t = espessura da chapa (mm)

L = comprimento total do perfil (mm)

γ = peso específico

l = largura da chapa (mm)

A fim de obter o peso dos perfis para o sistema bi-apoiado, foram considerados os comprimentos de distanciamento entre pórticos. Para o sistema de luva, foram calculados da mesma forma, acrescentando o peso das chapas que ligam um perfil ao outro para obter continuidade entre as terças. Para calcular o peso delas, foram consideradas as seguintes dimensões: 290mm de altura, 1000mm de comprimento e espessuras variando conforme a espessura utilizada nos perfis dimensionados. Enquanto para o sistema de transpasse foram considerados os distanciamentos entre pórticos, acrescentando 500mm para cada ponto de transpasse, totalizando assim um acréscimo de 1000mm em cada perfil.

3.2.2 Estimativa de custo

Com o objetivo de realizar uma estimativa de custo final para cada modelo de galpão analisado, tendo como variação o distanciamento entre pórticos e os tipos de sistemas estruturais, alguns fatores devem ser considerados, sendo eles: matéria prima, industrialização e montagem (quando for o caso).

Diariamente empresas do ramo de soluções em estruturas metálicas realizam orçamentos destinados a construção de obras de aço, sendo assim, é tomado como base um valor médio por quilograma para cada porte de obra. No valor são considerados matéria prima (aço, tinta para acabamento, parafusos para montagem), industrialização (fabricação e pintura) e montagem. Desta forma, buscando informações junto a uma empresa do setor, foi informado que para obras com cobertura composta por terças metálicas o valor médio é de R\$ 17,50 ao kg, sendo desnecessária a análise para cada parte envolvida no processo (matéria prima, industrialização e montagem).

Após o dimensionamento dos perfis, serão extraídos os pesos para compor as terças e, a partir disso, será realizada a estimativa de custo final para cada análise realizada.

3.2.3 Tempo de montagem

Para estimar o tempo de montagem dos sistemas estruturais bi apoiado, transpasse e luva, foram realizadas medições de tempo. A partir dos dados obtidos por meio das medições, foi permitida a execução de um comparativo entre os sistemas, apresentando qual demanda menos tempo de instalação. Esses dados podem ser observados na Tabela 2:

Tabela 2 - Tempo para montagem dos sistemas estruturais

Sistema Estrutural	T1 (min)	T2 (min)	T3 (min)	TM (min)
Bi Apoiado	01:36	01:34	01:16	01:28
Transpasse	02:28	02:04	01:55	02:09
Luva	02:45	02:36	02:40	02:40

(Fonte: Elaborado pelo autor, 2022)

Conforme exposto, foram realizadas três medições de tempo para cada sistema, obtendo assim um tempo médio de montagem para cada um deles.

3.3 Modelo de Galpão Estudado

A fim de realizar um estudo estrutural, foi desenvolvido um modelo de galpão com sua estrutura principal em aço e fechamento em alvenaria, o qual pode ser visualizado na Figura 11.

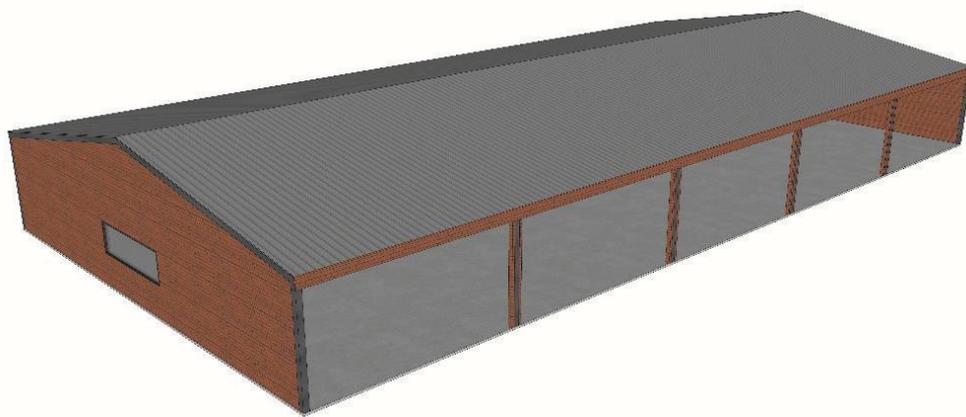


Figura 11 - Modelo de Galpão

(Fonte: Elaborado pelo autor, 2022)

Este galpão foi projetado com o propósito de ser utilizado como estacionamento de veículos de grande porte. À vista disso, apresenta dimensões de 50 metros de comprimento, 25 metros de largura e 7,17 metros de altura com distanciamento entre pórticos variando de 5 a 10 metros. As análises iniciaram com distanciamento de 5 metros com aumento gradativo de 1 metro a cada análise, a fim de realizar estudo para comportamento entre os sistemas estruturais das terças de cobertura.

3.3.1 Carregamentos considerados

Para realizar o dimensionamento das terças de uma estrutura, inicialmente deve-se levar em consideração alguns itens que serão apresentados na Tabela 3 juntamente com os valores considerados para realização deste estudo.

Tabela 3 - Parâmetros para dimensionamento de telhas

Peso Próprio da Estrutura	18 kgf/m ²
Peso das Telhas	6,3 kgf/m ²
Sobrecarga na Cobertura	25 mf/m ²
Ação Concentrada	100 kg
Pressão do Vento de Sucção	109 kgf/m ²
Pressão do Vento de Sob Pressão	22 kgf/m ²

(Fonte: Elaborado pelo autor, 2022)

Para obtenção dos valores citados na Tabela 3, foram considerados os parâmetros apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente para dimensionamento de telhas, valores de vento de sucção e vento sob pressão.

Tabela 4 - Parâmetros para dimensionamento de telhas

ESPECIFICAÇÕES TELHA	
Espessura (mm)	0,65
Nº de apoios	4
Distância entre apoios (mm)	2500
Peso (kg/m ²)	6,3

Tipo Trapezoidal	TP 40
------------------	-------

(Fonte: Elaborado pelo autor, 2022)

Tabela 5 - Coeficientes de pressão do vento

Coeficiente de Pressão Máximo para Sucção	-1,5
Coeficiente de Pressão Máximo para Sob Pressão	0,3
Pressão Dinâmica (q)	715,34

(Fonte: Elaborado pelo autor, 2022)

Para extração dos valores de pressão dos ventos de sucção e sob pressão, foi utilizada a equação (6).

$$P_{vento} = C_{p_{máx}} * q \quad (6)$$

3.3.2 Combinações e esforços solicitantes

A partir dos itens apresentados no item anterior, foi possível realizar algumas combinações para obter os dados necessários para verificação dos perfis, sendo eles: momento fletor e força cortante.

As combinações foram feitas entre as ações atuantes na estrutura (conforme apêndice A), considerando o peso próprio da estrutura, peso das telhas, sobre carga na cobertura, ação concentrada e ações do vento, conforme Tabela 3 apresentada no item 3.3.1.

Após serem elaboradas as combinações com auxílio do software de análise estrutural *Ftool*, foram extraídos os valores dos esforços solicitantes máximos para cada caso (de acordo com apêndice B), conforme apresentado na Tabela 6. Vale ressaltar, que as análises foram realizadas para perfis bi-apoiados, e perfis simulando continuidade na ligação, desta forma, os sistemas de transpasse e luva obtiveram os mesmos esforços e dimensionamentos.

Tabela 6 - Esforços solicitantes

Distância Entre Pórticos (m)	Sistema	Momento Fletor (kN.m)	Força Cortante (kN)
5	Bi-apoiado	10,34	8,27
5	Transpasse / Luva	6,89	8,27
6	Bi-apoiado	14,89	9,93
6	Transpasse / Luva	9,93	9,93
7	Bi-apoiado	20,26	11,58
7	Transpasse / Luva	13,51	11,58
8	Bi-apoiado	26,47	13,23
8	Transpasse / Luva	17,65	13,23
9	Bi-apoiado	33,50	14,89
9	Transpasse / Luva	22,33	14,89
10	Bi-apoiado	41,36	16,54
10	Transpasse / Luva	27,57	16,54

(Fonte: Elaborado pelo autor, 2022)

3.4 Planilha para dimensionamento de perfis dobrados

A planilha, um dos principais objetivos deste trabalho, foi desenvolvida com embasamento na norma NBR 14762:2010, que trata o dimensionamento de perfis dobrados. Além disso, também foi utilizada a NBR 6355:2012, a qual trata a padronização de perfis estruturais de aço formados a frio. A fim de melhor compreensão, na figura 12 é possível observar o passo a passo da verificação dos perfis utilizando a planilha desenvolvida neste trabalho.

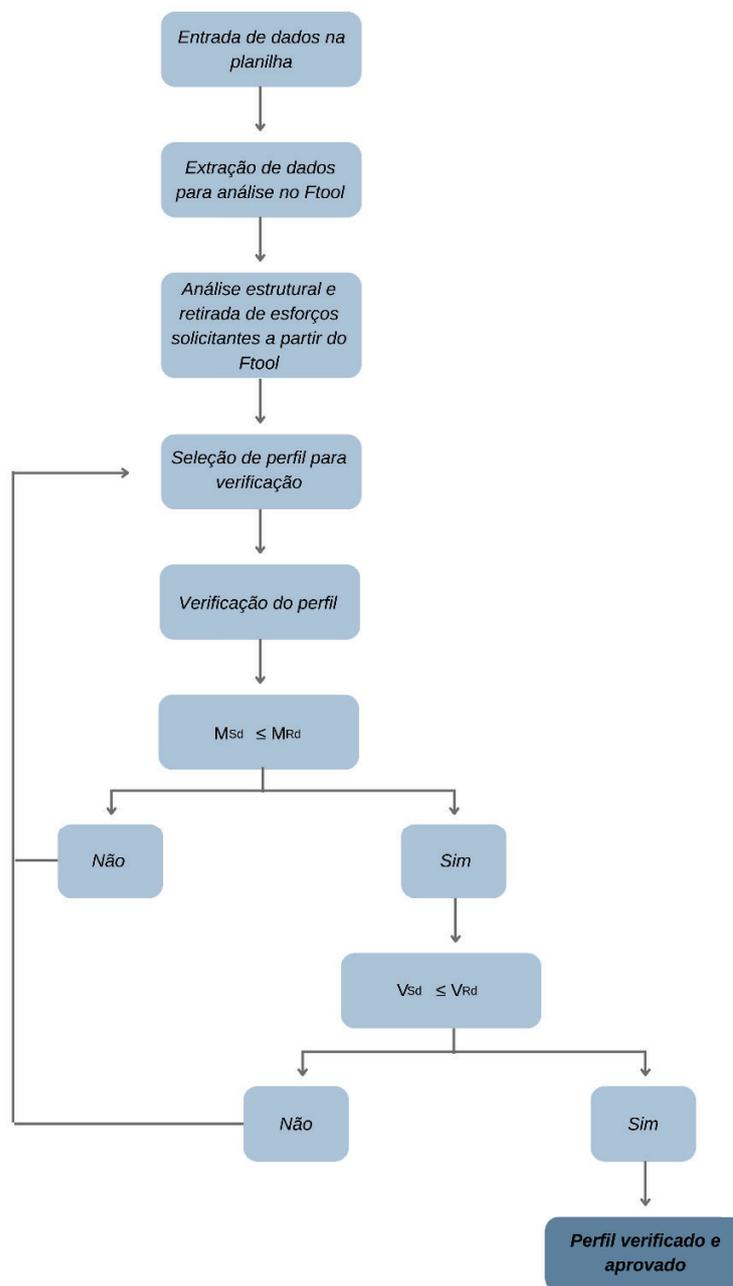


Figura 12 - Fluxograma de verificação dos perfis

(Fonte: Elaborado pelo autor, 2022)

A *entrada de valores* é a etapa em que são informados na planilha os esforços atuantes na estrutura: ação do vento, peso próprio da estrutura, sobre carga e carga concentrada. Em seguida, na *extração de dados para análise no Ftool*, são retiradas as cargas resultantes, sendo elas as cargas concentradas e cargas distribuídas.

A partir dos esforços solicitantes obtidos através da planilha, é realizada a *análise estrutural e retirada de esforços solicitantes a partir do Ftool*. Esta etapa tem como objetivo a obtenção dos esforços solicitantes nas terças, sendo eles Momento Fletor Máximo e Força Cortante para que seja possível realizar o dimensionamento dos perfis das terças.

Após os valores dos esforços serem implementados na planilha, é feita a *seleção de perfil para verificação*, a qual é elaborada a partir de uma tabela padronizada, conforme NBR 6355:2012. Partindo da escolha do perfil, a planilha busca as propriedades geométricas de cada um deles para que seja feita a *verificação do perfil*, conforme as fórmulas descritas na NBR 14762:2010 apresentadas no item 2.6.1.

Feitas as verificações e atendendo as condições impostas, pode-se considerar que o perfil é aprovado para carregamentos submetidos. Em caso de não aprovação, deve-se realizar a escolha de outro perfil, de modo que resista às solicitações.

A fim de realizar travamento entre as terças, todos estudos foram elaborados considerando uma corrente-rígida centralizada, utilizada para conter as terças lateralmente, diminuindo o comprimento destravado contribuindo assim para um dimensionamento mais otimizado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão expostos os resultados obtidos através das análises realizadas, bem como o dimensionamento das terças para cada configuração de galpão.

4.1 Comparativo entre os sistemas estruturais: bi apoiado, transpasse e luva

Para realizar um comparativo entre os sistemas, foi efetuado o dimensionamento dos perfis, análise de deslocamentos e solicitações nas ligações e tempo de montagem para cada sistema.

4.1.1 Dimensionamento dos perfis para terças

O modelo de galpão utilizado neste estudo é composto por uma lateral inteiramente aberta, à vista disso os esforços solicitantes apresentaram altos valores. Desse modo, o momento fletor é o esforço que passou a governar o dimensionamento das terças pelo fato de apresentar um valor relativamente alto, quando comparado ao esforço cortante.

Todos os perfis foram dimensionados através da planilha desenvolvida, tendo em vista o comparativo de comportamento entre os sistemas estruturais para cada distância entre os pórticos. Na Tabela 7 será apresentado o dimensionamento final para cada caso. Para análise de transpasse e luva foram consideradas ligações que simulam continuidade entre os perfis, desta forma, ambos receberam o mesmo dimensionamento.

Tabela 7 – Perfis dimensionados

Distância Entre Pórticos (m)	Sistema	Perfil Dimensionado
5	Bi-apoiado	300x85x25x2.65
5	Transpasse / Luva	300x85x25x2.65
6	Bi-apoiado	300x85x25x3.00
6	Transpasse / Luva	300x85x25x2.65
7	Bi-apoiado	300x85x25x3.35
7	Transpasse / Luva	300x85x25x2.65
8	Bi-apoiado	300x85x25x4.25
8	Transpasse / Luva	300x85x25x3.00
9	Bi-apoiado	300x85x30x6.30

9	Transpasse / Luva	300x85x25x3.00
10	Bi-apoiado	Perfis não atendem solicitações
10	Transpasse / Luva	300x85x25x3.75

(Fonte: Elaborado pelo autor, 2022)

Com base nos dimensionamentos apresentados na tabela anterior, serão apresentados, na Figura 13, os pesos obtidos para as terças, considerando os três sistemas estruturais bi-apoiado, transpasse e luva para todos os distanciamentos entre pórticos, a fim de obter o mais leve para cada situação.

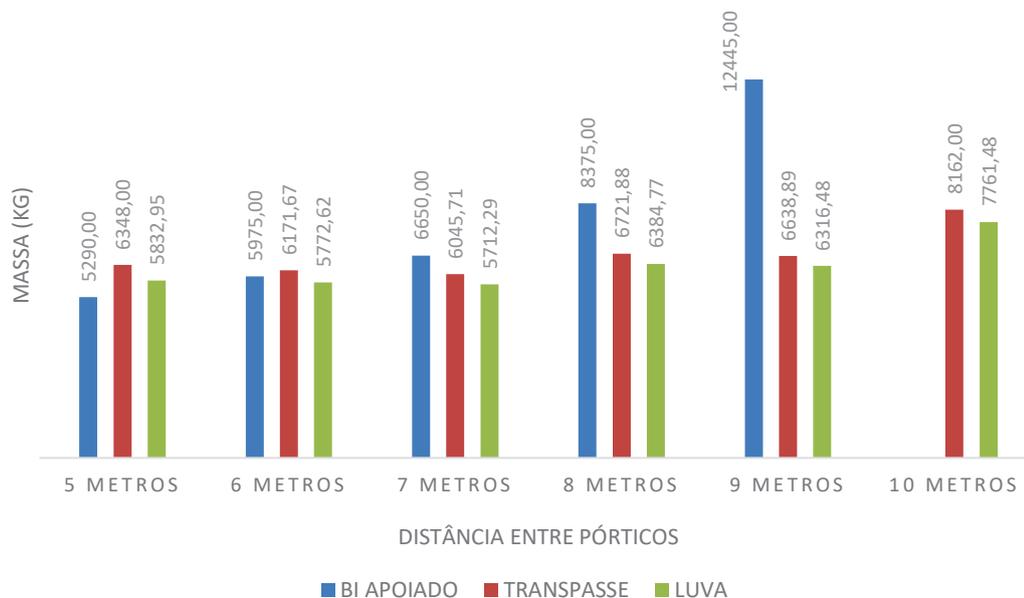


Figura 13 - Gráfico pesos para cada caso

(Fonte: Elaborado pelo autor, 2022)

De modo a realizar um comparativo entre pesos para cada caso estudado, vale ressaltar que para o modelo de galpão utilizado como exemplo neste trabalho, a configuração de distanciamento e sistema estrutural que se demonstrou bastante eficiente, apresentando o menor peso, ostenta as seguintes configurações: distanciamento entre pórticos de 5 metros e sistema estrutural bi-apoiado, com perfil Z 300x85x25x2.65, obtendo assim 5290 kg.

Importa destacar que para a configuração de 10 metros de distância entre pórticos e sistema estrutural bi-apoiado, os perfis utilizados na planilha (conforme NBR 6355:2012) não demonstraram ser eficiente o bastante, não sendo aprovados para o esforço solicitante de momento fletor. Sendo assim, esse peso foi desconsiderado. De modo a solucionar esta situação, seria necessário criar um novo perfil com dimensões superiores as apresentadas na norma citada acima.

4.1.2 Comparativo de deslocamentos entre os sistemas

De modo a verificar a resistência dos perfis para as terças, um critério que deve ser analisado são os deslocamentos para cima e para baixo dos perfis. Para realizar esta verificação foi utilizado o software Ftool considerando os carregamentos solicitantes (conforme apêndice C). A partir da Tabela 8 é possível verificar os resultados obtidos.

Tabela 8 – Deslocamentos máximos

Distância entre Pórticos (m)	Sistema	Deslocamento Máximo p/ cima Ftool (mm)	Deslocamento Máximo p/ baixo Ftool (mm)
5	Bi-apoiado	5,828	3,682
5	Transpasse / Luva	1,166	0,736
6	Bi-apoiado	10,720	6,772
6	Transpasse / Luva	2,417	1,572
7	Bi-apoiado	17,850	11,280
7	Transpasse / Luva	4,477	2,829
8	Bi-apoiado	24,260	15,330
8	Transpasse / Luva	6,775	4,280
9	Bi-apoiado	26,850	16,970
9	Transpasse / Luva	10,850	6,856
10	Bi-apoiado	Perfis não atendem solicitações	
10	Transpasse / Luva	13,350	8,434

(Fonte: Elaborado pelo autor, 2022)

Considerando os resultados de deslocamento obtidos, convém ressaltar que os sistemas estruturais que criam continuidade entre as terças (transpasse e luva) apresentam valores de deslocamentos bastante inferiores quando comparados aos valores obtidos para o sistema bi-apoiado, apresentando uma redução de 80% na deslocabilidade para distanciamento de 5 metros entre vãos e de 60% para distanciamento de 9 metros.

4.1.3 Comparativo de tempo de montagem entre os sistemas

A partir dos resultados obtidos através das medições de tempo de montagem realizadas, conforme demonstrado no item 3.2.2, o sistema bi apoiado tem a melhor média de tempo, apresentando 1 min e 28s, seguido de transpasse com 2 min e 09s, e apresentando o maior tempo de montagem o sistema de luva com 2 min e 40 segs., de acordo com a Figura 14.

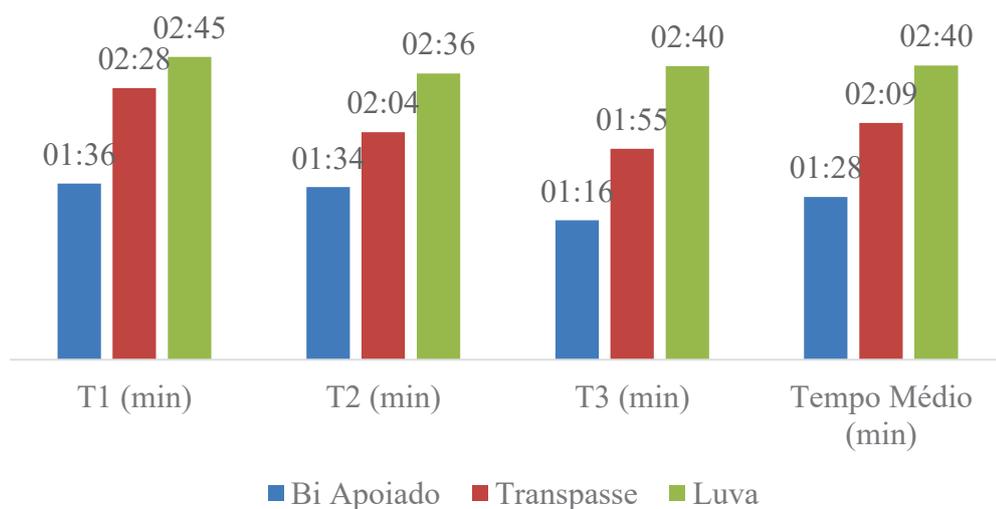


Figura 14 - Gráfico de tempo de montagem dos sistemas

(Fonte: Elaborado pelo autor, 2022)

Baseado nos resultados obtidos para o tempo de montagem, apesar do sistema bi apoiado apresentar o menor tempo de montagem, ele é pouco utilizado em obras de grande porte, sendo o

caso do modelo utilizado para realizar este estudo, em que são indicados sistemas que demonstram continuidade física entre as terças.

4.1.4 Estimativa de custo do sistema de terças para cobertura

A partir dos objetivos propostos para este trabalho, realizou-se uma estimativa de custo para fabricação e instalação de terças metálicas para cobertura com base em valores apresentados por uma empresa do ramo de soluções em estruturas metálicas de Nova Bassano, sendo de R\$ 17,50 ao quilograma. A seguir será apresentada a Figura 15, a qual contém os valores alcançados para cada caso analisado.

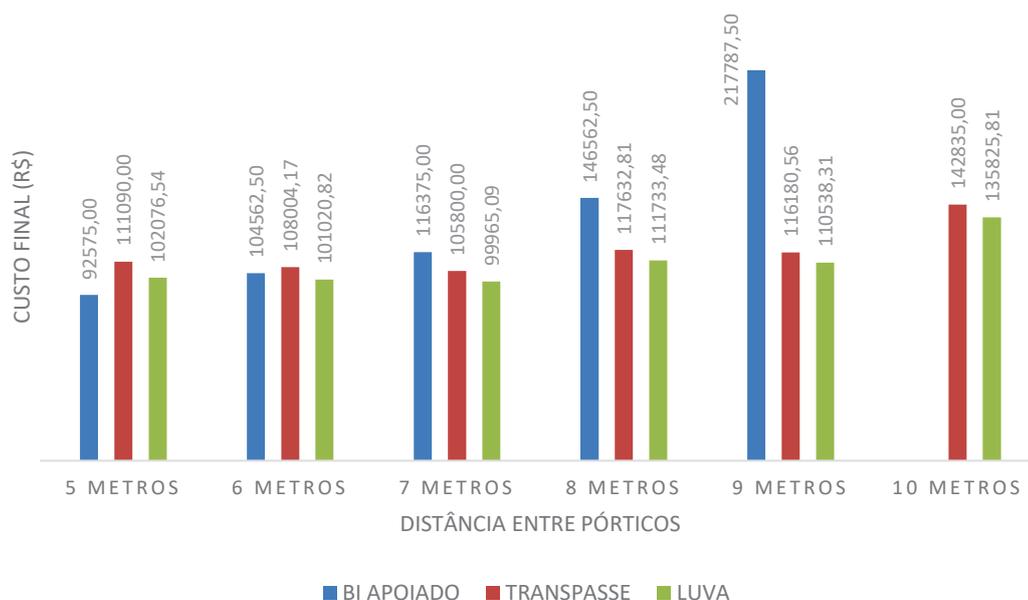


Figura 15 – Gráfico de estimativa de custo final

(Fonte: Elaborado pelo autor, 2022)

Baseado nos resultados apresentados, é importante destacar que para o distanciamento entre pórticos de 5 metros, o sistema estrutural que apresentou menor custo é o bi-apoiado, porém para as demais análises realizadas, o sistema estrutural com menor custo é o de luva.

Unindo o custo para fabricação e montagem ao tempo de instalação, para o distanciamento de 5 metros, apresenta o melhor caso possível, pois une o menor custo ao menor tempo de montagem. Porém, para os demais distanciamentos, obteve-se o menor custo unido ao maior tempo de montagem.

5 CONCLUSÕES

Mediante os modelos estudados, é possível verificar que a opção de distanciamento entre pórticos de 5 metros e sistema bi-apoiado, é o mais leve e, em consequência, o mais econômico quando realizada a análise de custos, isso se deve ao tamanho de vão utilizado. Porém, se comparado o mesmo sistema estrutural a vãos maiores, como o de 9 metros, é possível verificar que apresenta o maior peso entre as análises, desta forma não se torna uma boa alternativa quando se preza pela economia.

Em relação à montagem dos sistemas, pode-se considerar que a ligação por luva é bastante similar a bi-apoiada, porém, se faz necessária a utilização de uma chapa a mais, demandando assim mais tempo para montagem. Quanto à ligação de transpasse, demanda mais prática na

montagem, pelo fato de as terças necessitarem de montagem pelo lado correto, uma vez que não sejam fabricadas com simetria.

Baseado nos esforços solicitantes extraídos das análises realizadas com auxílio do programa Ftool, é possível observar que para ligações de transpasse e luva as solicitações de momentos fletores são reduzidos aproximadamente em 34% quando comparado às ligações bi apoiadas. Sendo assim, é possível constatar que as ligações de transpasse e luva cumprem com o objetivo de realizar continuidade entre as terças para obter maior rigidez nas ligações possibilitando assim otimização no dimensionamento dos perfis.

Além disso, vale ressaltar que as ligações de transpasse e luva se fazem bastante eficazes para o dimensionamento dos perfis, contribuindo na redução de peso quando se trata de vão com dimensões maiores. É possível observar que para vãos de 7 metros e superiores a isso, perfis com espessuras menores atendem as solicitações em um comparativo com o sistema bi-apoiado, reduzindo o peso total da estrutura.

No tocante aos perfis dobrados, importa mencionar o quão eficientes são para compor o sistema de terças, pelo fato de apresentarem diversas configurações de dimensões e formatos e a facilidade na fabricação. Do ponto de vista estrutural é sempre uma ótima opção a ser considerada, pois pode contribuir para uma otimização no dimensionamento, tendo em conta que para a utilização do sistema de transpasse não são todos perfis que possibilitam realizar esta ligação, e conforme apresentado neste trabalho, é um sistema bastante benéfico por reduzir significativamente os valores de esforços solicitantes.

6 ETAPAS FUTURAS

Como sugestões para trabalhos futuros:

- Dimensionamento de terças utilizando mão-francesa;
- Comparativo de peso entre terças com perfis laminados e perfis dobrados;
- Comparativo de dimensionamento de perfis dobrados a frio entre os métodos MRD, MSE e MLE;
- Análise experimental comparativa entre luva e transpasse para verificar melhor método para continuidade entre terças.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355**: Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

CAMOTIM, Dinar; SILVESTRE, Nuno; DINIS, Pedro Borges. Análise numérica de elementos estruturais de aço enformados a frio: desenvolvimentos recentes e perspectivas futuras. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**. UPF Editora: Passo Fundo, 2006, v. 3, n. 1, p. 55-100. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Configuracoes-dos-modos-de-instabilidade-a-local-b-distorcional-e-c_fig1_322688564. Acesso em: 20 maio 2022.

CARVALHO, Paulo Roberto Marcondes, et al. **Curso Básico de perfis de aço formados a frio**. 3 ed. Porto Alegre: [s.n.], 2006.

CARVALHO, Paulo Roberto M. de; GRIGOLETTI, Gladimir; BARBOSA, Giovana Daltrozo. **Curso Básico de perfis de aço formados a frio**. 4 ed. Porto Alegre: [s.n.], 2021.

CASTELANI, Tiago. **Otimização e dimensionamento de perfis formados a frio pelo método da resistência direta**. Porto Alegre, 2012. [Dissertação de mestrado. Universidade do Rio Grande do Sul]. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/56599/000859743.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 setembro 2022.

FÁVERO NETO, Alomir Hélio. **Terças em perfis de aço formados a frio com continuidade nos apoios**: ênfase ao estudo das ligações de alma parafusada com transpasse ou luva. São Carlos, 2013. [Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo]. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-07012014-142940/publico/2013ME_AlomirHelioFaveroNeto.pdf. Acesso em: 19 abril 2022.

JAVARONI, Carlos Eduardo. **Perfis de aço formados a frio submetidos à flexão**: análise teórico experimental. São Carlos, 1999. [Tese de doutorado. Universidade de São Paulo]. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-11122017-112750/publico/Tese_Javaroni_CarlosE.pdf. Acesso em: 19 abril 2022.

KLEINA, Mário Sérgio Mandú; CASEKER, Milena Portes. **Instabilidade por distorção de perfis de aço formados a frio, avaliação analítica e experimental**. Curitiba, 2014. [Trabalho Final de Curso. Universidade Federal do Paraná]. Disponível em: <http://www.estruturas.ufpr.br/wp-content/uploads/2015/08/TFC-MarioMilena.pdf>. Acesso em: 20 abril 2022.

MACHADO. **Machado Comércio de Ferro e Aço**. São Paulo. 2022. Disponível em: <https://www.machadocom.com.br/perfis>. Acesso em: 20 maio 2022.

MODULAR Sistema Construtivo. **Manual Técnico do Sistema Modular de Terças para Cobertura e Fechamento**. Taubaté: Modular, 2012.

MONTEIRO, Thallus Simon, et al. Estudo comparativo entre o método da resistência direta e o método da seção efetiva para perfis formados a frio submetidos à compressão. **XXXVIII Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**. Florianópolis: UFSC, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/321508185_estudo_comparativo_entre_o_metodo_da_resistencia_direta_e_o_metodo_da_secao_efetiva_para_perfis_formados_a_frio_submetidos_a_compressao. Acesso em: 24 abril 2022.

NOGUEIRA, Gilcimar Saraiva. **Avaliação de soluções estruturais para galpões compostos por perfis de aço formados a frio**. Ouro Preto, 2009. [Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto]. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/6021/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_Avalia%c3%a7%c3%a3oSolu%c3%a7%c3%b5esEstruturais.pdf. Acesso em: 20 abril 2022.

SCHIAVON, Luniery Alves Pereira. **Terças de aço em perfis formados a frio com alma enrijecida**: ênfase ao estudo da continuidade nos apoios por meio de luva. São Carlos, 2019. [Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo]. Disponível em:

https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-05122019-120209/publico/2019me_lunieryalvespereiraschiavon.pdf. Acesso em: 19 abril 2022.

SILVA, Edson Lubas; PIGNATA, Valdir e Silva. **Dimensionamento de Perfis Formados a Frio Conforme Nbr 14762 e Nbr 6355**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2008.

SILVA, Julio Cesar Martins da. **Análise teórica-experimental de perfis de aço formados a frio devido à instabilidade por distorção na flexão**. São Carlos, 2004. [Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo]. Disponível em:
https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-03062016-135325/publico/Dissert_Silva_JulioCM.pdf. Acesso em: 19 abril 2022.

APÊNDICE A – COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTOS ATRAVÉS DA PLANILHA DESENVOLVIDA

Na figura a seguir, serão apresentados os cálculos realizados para extração dos valores das cargas solicitantes nas terças, onde foram realizadas majorações e reduções nos valores de peso próprio da estrutura, sobre carga, ventos e ação concentrada.

Para a ação permanente, devem ser comparados os sentidos da própria ação permanente e ação principal, se ambas apresentarem mesmo sentido, deve ser majorado em 1,25. Caso apresentem sentidos opostos, não se faz necessária a majoração.

Para ação principal, deve ser majorado em 1,5 quando a ação for de sobre carga, e em 1,4 quando a ação for de vento.

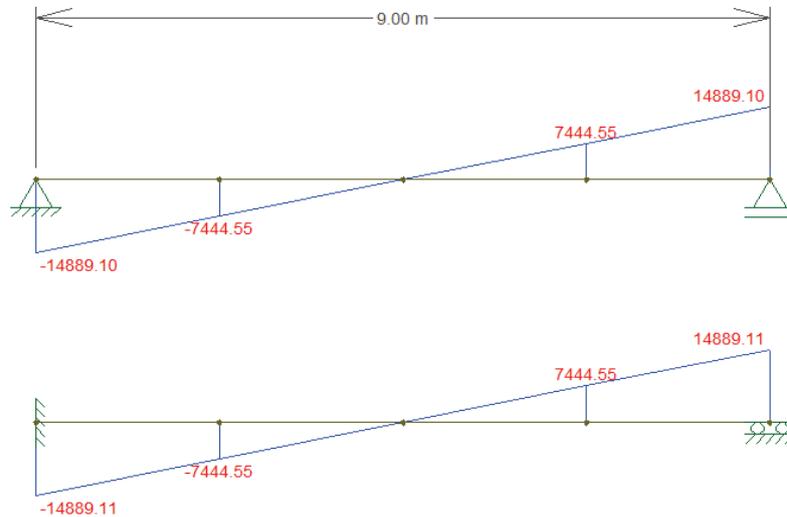
Para ação secundária, deve ser majorado em 1,4 e 0,6 quando a ação for de vento, e em 1,5 e 0,8 quando a ação for de sobre carga.

Para ação concentrada, deve ser majorado em 1,5.

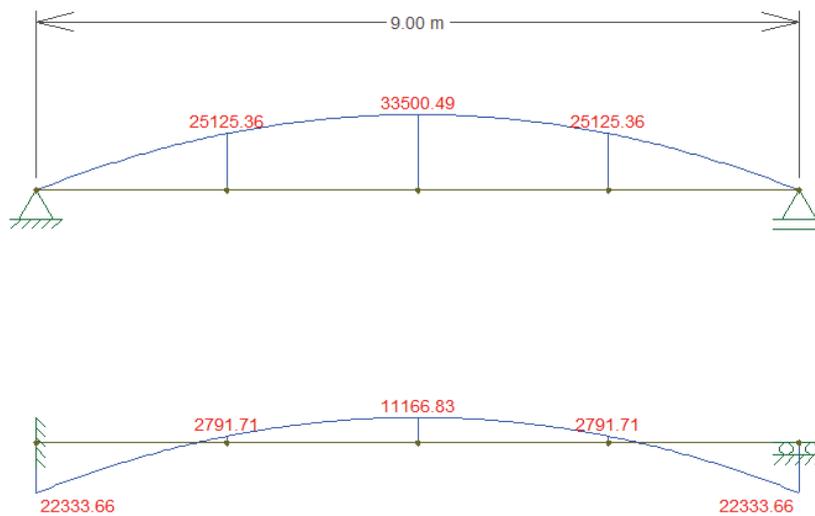
COMBINAÇÃO	PERMANENTE		VARIÁVEL												CARGA RESULTANTE NA TERÇA		MOMENTO FLETOR (kN.m)	CORTANTE (kN)	
	PP_{EM} ↓		SC ↓			V_2 ↑			V_3 ↓			AC ↓			CONCENTRADA (N)	DISTRIBUIDA (N/m)			
	γ	CARGA	γ	ψ	CARGA														
ELU	1	1,25	178,74	1,50	1,00	245,25			-1073,01			214,61			1000,00	0,00	1478,24	Descartado	Descartado
	2	1,00	178,74			245,25	1,40	1,00	-1073,01			214,61			1000,00	0,00	-3308,69	Crítico	Crítico
	3	1,25	178,74			245,25			-1073,01	1,40	1,00	214,61			1000,00	0,00	1309,70	Descartado	Descartado
	4	1,25	178,74	1,50	1,00	245,25	1,40	0,60	-1073,01			214,61			1000,00	0,00	-775,08	Descartado	Descartado
	5	1,25	178,74	1,50	1,00	245,25			-1073,01	1,40	0,60	214,61			1000,00	0,00	1928,93	Descartado	Descartado
	6	1,00	178,74	1,50	0,80	245,25			-1073,01			214,61			1000,00	0,00	-2572,94	Descartado	Descartado
	7	1,25	178,74	1,50	0,80	245,25			-1073,01	1,40	1,00	214,61			1000,00	0,00	2045,45	Análise	Análise
	8	1,25	178,74			245,25			-1073,01			214,61	1,50	1,00	1000,00	1500,00	558,56	Análise	Análise
																	FLEXA P/ CIMA	FLEXA P/ BAIXO	
ELS	9	1,00	178,74	0,60	1,00	245,25			-1073,01			214,61			1000,00	0,00	814,72	Descartado	Descartado
	10	1,00	178,74			245,25	1,00	1,00	-1073,01			214,61			1000,00	0,00	-2235,68	Análise	-
	11	1,00	178,74			245,25			-1073,01	1,00	1,00	214,61			1000,00	0,00	983,38	Descartado	Descartado
	12	1,00	178,74	1,00	0,70	245,25			-1073,01			214,61			1000,00	0,00	-1806,49	Descartado	Descartado
	13	1,00	178,74	1,00	0,70	245,25			-1073,01	1,00	1,00	214,61			1000,00	0,00	1412,56	-	Análise
	14	1,00	178,74			245,25			-1073,01			214,61	1,00	1,00	1000,00	1000,00	446,85	-	Análise

APÊNDICE B – EXTRAÇÃO DOS ESFORÇOS SOLICITANTES – FORÇA CORTANTE

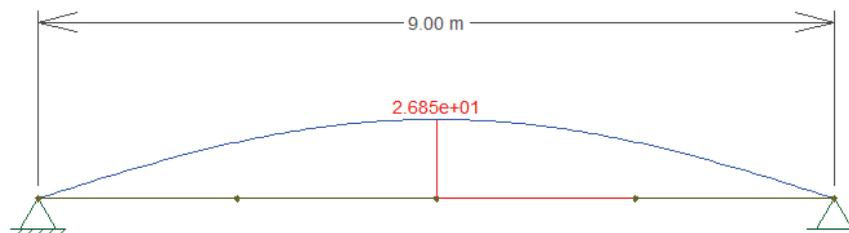
Com o auxílio do software Ftool, foram realizadas análises de esforços cortantes, momentos fletores e deslocamentos máximos para os casos analisados, os quais podem ser visualizados através dos apêndices B, B.1 e C.



APÊNDICE B.1 – EXTRAÇÃO DOS ESFORÇOS SOLICITANTES – MOMENTO FLETOR



APÊNDICE C – ANÁLISE DE DESLOCAMENTOS





APÊNDICE D – PLANILHA DESENVOLVIDA PARA VERIFICAÇÃO DE PERFIL Z DOBRADO

Para verificação da resistência de perfis Z, foi desenvolvida uma planilha em que é possível selecionar diversas seções de perfis. Nessas seções, estão implementadas as propriedades de cada perfil. A figura a seguir demonstra essa etapa de seleção através da planilha.

Verificação de Resistência de Perfis Z

Tipo de Material

Tipo de Aço:	A36	2
Tensão de Escoamento (f_y):	25 kN/cm ²	
Tensão de Ruptura (f_u):	40 kN/cm ²	
Módulo de Elasticidade (E):	20000 kN/cm ²	
Módulo Elasticidade Transv. (G):	7700 kN/cm ²	

Tipo de Perfil

Perfil:	300x85x25x3,75	45
Altura do Perfil (bw):	300 mm	
Largura da Mesa (bf):	85 mm	
Largura da Aba Enrijecida (D):	25 mm	
Espessura do Perfil (t):	3,75 mm	
Altura da alma (a):	285 mm	

Propriedades do Perfil

Pos. CG (inferior):	150 mm	
Massa:	14,84 kg/m	
Área(Ag):	18,9 cm ²	1890 mm ²
Inércia x (Ix)	2483,35 cm ⁴	24833500 mm ⁴
Módulo Resistente x (Wx):	165,56 cm ³	
Raios de Giração x (rx):	11,46 cm	
Inércia y (Iy)	288,89 cm ⁴	
Módulo Resistente y (Wy):	28,5 cm ³	
Raios de Giração y (ry):	3,91 cm	
Inércia Torção (IT) ou (J)	0,901 cm ⁴	
Coefficiente de Empenamento (Cw):	46302,22 cm ⁶	
r0	12,11 cm	
My	4139 kNcm	
Fator de Força Ml	4912,52 kNcm	
Fator de Força Mdist	10000 kNcm	

Comprimento de Flambagem e Carregamentos

Comprimento Destravado Flexão (Lb):	500	cm (Dist. entre pórticos / número de correntes)
Fator de Modificação do Diagrama do Fletor (Cb)	2,381	

Esforço Cortante de Cálculo ($V_{y_{sd}}$):	16,500	kN (Envoltória da Análise Estrutural)
Momento Fletor de Cálculo ($M_{y_{sd}}$):	27,600	kN.m (Envoltória da Análise Estrutural)

APÊNDICE D.1 – CÁLCULOS DE VERIFICAÇÕES

A seguir, serão apresentados os cálculos realizados para verificação de momento fletor e resistência ao cisalhamento, conforme formulário apresentado na NBR 14762:2010. De modo a verificar a resistência para momento fletor, é considerado o menor valor entre os modos de flambagem.

Verificação do Momento Fletor Resistente - Eixo x		
FLAMBAGEM GLOBAL		
$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2}$	609,42 kN	
$N_{oy} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2}$	281,21 kN	
$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$	406,41 kN	
$M_e = 0,5 C_v r_0 (N_{oy} N_{ez})^{0,5}$	4845,58 kNcm	
$\lambda_0 = \left(\frac{W f_y}{M_e} \right)^{0,5}$	1,03	
$M_{Re} = W f_y$ para $\lambda_0 \leq 0,6$	51455,00 kNmm	(Condição 1)
$M_{Re} = 1,11(1 - 0,278 \lambda_0^2) W f_y$ para $0,6 < \lambda_0 < 1,336$	40254,27 kNmm	(Condição 2)
$M_{Re} = \frac{W f_y}{\lambda_0^2}$ para $\lambda_0 \geq 1,336$	48455,76 kNmm	(Condição 3)
$M_{Re} =$	40254,27394 kNmm	Vale Condição 2
$M_{Re} =$	40,25 kNm	
FLAMBAGEM LOCAL		
$M_l =$	14180,45 kNcm	
$\lambda_l = \left(\frac{M_{Re}}{M_l} \right)^{0,5}$	0,53	
$M_{Rl} = M_{Re}$ para $\lambda_l \leq 0,776$	40254,27 kNmm	(Condição 1)
$M_{Rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}} \right) \left(\frac{M_{Re}}{\lambda_l^{0,8}} \right)$ para $\lambda_l > 0,776$	50078,59 kNmm	(Condição 2)
$M_{Rl} =$	40254,27394 kNmm	Vale Condição 1
$M_{Rl} =$	40,25 kNm	
FLAMBAGEM DISTORCIONAL		
$M_{dist} =$	10000,00 kNcm	
$\lambda_{dist} = \left(\frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5}$	0,72	
$M_{Rdist} = W f_y$ para $\lambda_{dist} \leq 0,673$	51455,00 kNmm	(Condição 1)
$M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}} \right) \left(\frac{W f_y}{\lambda_{dist}} \right)$ para $\lambda_{dist} > 0,673$	49732,14 kNmm	(Condição 2)
$M_{Rdist} =$	49732,14063 kNmm	Vale Condição 2
$M_{Rdist} =$	49,73 kNm	
MOMENTO RESISTENTE $M_{x,rd} =$	36,59 kNm	
$M_{xsd}/M_{xrd} =$	0,75 Perfil OK - Momento	

Verificação da Resistência ao Cisalhamento - Eixo y

h (altura da alma)	28,1	cm
t (espessura da alma)	0,475	cm
γ (gama)	1,1	
k _v =	5,0	
h/t =	59,1579	
E*k _v /f _y	4000	
E*k _v *f _y	2500000	

$$V_{Rd} = \frac{0,6f_y h t}{\gamma} \quad \text{para } h/t \leq 1,08(Ek_v/f_y)^{0,5} \quad \boxed{182,01} \text{ kN} \quad (\text{Condição 1})$$

$$V_{Rd} = \frac{0,65t^2(k_v f_y E)^{0,5}}{\gamma} \quad \text{para } 1,08(Ek_v/f_y)^{0,5} < h/t \leq 1,4(Ek_v/f_y)^{0,5} \quad \boxed{210,80} \text{ kN} \quad (\text{Condição 2})$$

$$V_{Rd} = \frac{0,905Ek_v t^3}{\gamma h} \quad \text{para } h/t > 1,4(Ek_v/f_y)^{0,5} \quad \boxed{313,78} \text{ kN} \quad (\text{Condição 3})$$

FORÇA CORTANTE V_{y,rd} = 182,01 kN Vale Condição 1

V_{y,rd}/V_{y,rd} = 0,09 Perfil OK - Cisalhamento

APÊNDICE D.2 – RESUMO DO DIMENSIONAMENTO

Realizadas as verificações, é possível analisar um resumo do resultado final do dimensionamento em que são apresentados valores como: solicitações do perfil, peso final conforme o sistema estrutural e deslocamentos máximos.

Resultado Final das Verificações

MOMENTO RESISTENTE M_{x,rd} = 28,29 kN	M_{x,sd}/M_{x,rd} = 0,98	Perfil OK - Momento
FORÇA CORTANTE V_{y,rd} = 131,39 kN	V_{y,sd}/V_{y,rd} = 0,13	Perfil OK - Cisalhamento

Peso das Terças

Tipo de Sistema	Transpasse
Comprimento do perfil	10 m
Comprimento total galpão	50 m
Quantidade	10
Massa do Perfil	14,84 kg/m
Peso Total	8162 kg

Deslocamentos Máximos

	Admissível	Real		
Limite p/ cima	83,3	13,4	mm	Deslocamento Aprovado
Limite p/ baixo	55,6	8,5	mm	Deslocamento Aprovado