



Universidade Federal  
de São João del-Rei

**CAMPUS ALTO PARAPEBA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI**

**CARLOS FERNANDO ÁVILA DE SOUZA JÚNIOR**

**JÉSSICA LETÍCIA OLIVEIRA RESENDE**

**Análise das resistências de vigas em perfil U enrijecido com mesa superior  
inclinada em 30° aplicado em um telhado de galpão industrial.**

Ouro Branco – MG

Dezembro de 2022



Universidade Federal  
de São João del-Rei

**CAMPUS ALTO PARAPEBA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI**

CARLOS FERNANDO ÁVILA DE SOUZA JÚNIOR

JÉSSICA LETÍCIA OLIVEIRA RESENDE

**Análise das resistências de vigas em perfil U enrijecido com mesa superior  
inclinada em 30° aplicado em um telhado de galpão industrial.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João Del-Rei, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

**Orientador:** Dr. Lucas Roquete

Ouro Branco – MG

Dezembro de 2022

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S729a Souza Júnior, Carlos Fernando Ávila de.  
Análise das resistências de vigas em perfil U enrijecido com mesa superior inclinada em 30° aplicado em um telhado de galpão industrial./ Carlos Fernando Ávila de Souza Júnior; Jéssica Letícia Oliveira Resende; orientador Lucas Roquete Amparo. -- Ouro Branco, MG, 2022.  
38 p. il.

Trabalho de Conclusão (Graduação - Engenharia Civil) - Universidade Federal de São João del-Rei, 2022.

1. Perfil formado a frio 2. Estruturas metálicas 3. Método da seção efetiva 4. Método da resistência direta I. Resende, Jéssica Letícia Oliveira. II. Amparo, Lucas Roquete, orient. III. Título.

CARLOS FERNANDO ÁVILA DE SOUZA JÚNIOR  
JÉSSICA LETÍCIA OLIVEIRA RESENDE

**Análise das resistências de vigas em perfil U enrijecido com mesa superior  
inclinada em 30° aplicado em um telhado de galpão industrial.**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de  
Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João del-  
Rei, Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia Civil.*

Aprovado em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

---

Prof. Dr. Lucas Roquete Amparo  
(Orientador)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Ana Amélia Oliveira Mazon – UFSJ  
(Banca Examinadora)

---

Eng. Me. Matheus Miranda de Oliveira - UFOP  
(Banca Examinadora)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradecemos a Deus por ter nos proporcionados os conhecimentos e sabedoria, que foram cruciais para a realização deste trabalho e para a conclusão de mais um ciclo em nossas vidas.

Aos nossos familiares e amigos por todo apoio durante essa caminhada, que sempre nos deram força para concluirmos nossos objetivos.

Ao nosso orientador, Lucas Roquete por todo conhecimento compartilhado, paciência e disposição para nos atender durante todo esse processo.

A UFSJ, por nos proporcionar enorme aprendizado durante esses anos de curso.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do Perfil Ue com a mesa superior inclinada em 30° .....	12
Figura 2 – Galpão de estrutura metálica – projetado via <i>Robot</i> (2022).....	21
Figura 3 – Detalhe Perfil U utilizado para apoio da cobertura.....	22
Figura 4 – Destaque da viga mais solicitada. ....	23
Figura 5 – Eixo Referência do Perfil .....	23
Figura 6 – Comparação dos valores de resistência para o MSE e MRD: (a) compressão axial; (b) momento fletor.....	26
Figura 7 – Perfil 1 - MSE .....	29
Figura 8 – Perfil 1 – MRD – Força Axial.....	29
Figura 9 – Perfil 1 – MRD – Momento Resistente.....	30
Figura 10 – Perfil 2 - MSE .....	30
Figura 11 – Perfil 2 – MRD – Força Axial.....	31
Figura 12 – Perfil 2 – MRD – Momento Resistente.....	31
Figura 13 – Perfil 3 - MSE .....	32
Figura 14 – Perfil 3 – MRD – Força Axial.....	32
Figura 15 – Perfil 3 – MRD – Momento Resistente.....	33
Figura 16 – Perfil 4 - MSE .....	33
Figura 17 – Perfil 4 – MRD – Força Axial.....	34
Figura 18 – Perfil 4 – MRD – Momento Resistente.....	34
Figura 19 – Perfil 5 - MSE .....	35
Figura 20 – Perfil 5 – MRD – Força Axial.....	35
Figura 21 – Perfil 5 – MRD – Momento Resistente.....	36
Figura 22 – Perfil 6 – MSE.....	36
Figura 23 – Perfil 6 – MRD – Força Axial.....	37
Figura 24 – Perfil 6 – MRD – Momento Resistente.....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Esforços Solicitantes obtidos via <i>Robot</i> (2022).....	23
Tabela 2 – Características Geométricas.....	23
Tabela 3 – Dados de Entrada.....	24
Tabela 4- Dados perfis analisados .....	25
Tabela 5 – Esforços Resistentes MSE x MRD .....	25
Tabela 6 – Resultados Solicitantes x Resistentes .....	26

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PFF	Perfil Formado a Frio;
MSE	Método da seção efetiva;
MRD	Método da resistência direta;
$k_l$	Coefficiente de Flambagem local;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
NBR	Norma Brasileira;
$\eta$	Relação entre a largura nominal da mesa e a da alma;
$b_f$	Largura nominal da mesa;
$b_w$	Largura nominal da alma;
D	Altura enrijecedor do perfil;
h	Altura da mesa superior do perfil;
$N_{c,Rd}$	Força axial de compressão resistente de cálculo;
$f_y$	Resistência ao escoamento do aço;
$A_{ef}$	Área efetiva da seção transversal da barra;
$\chi$	Fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global;
A	Área bruta da seção transversal da barra;
$\lambda_p$	Índice de esbeltez reduzido do elemento ou da seção completa;
Nl	Força axial de Flambagem local elástica;
E	Módulo de elasticidade;
$\nu$	Coefficiente de Poisson;
t	Espessura do elemento;
$\gamma$	Coefficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral;
$\lambda_0$	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global;
$N_e$	Força axial de flambagem global elástica;
$I_y$	Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo principal y;
$K_y * L_y$	Comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo y;
MRd	Momento fletor resistente de cálculo;
$W_{ef}$	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;
$M_l$	Momento fletor de Flambagem local elástica;
$W_c$	Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida;
$\chi_{FLT}$	Fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção;
$W_{c,ef}$	Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida;
$W_c$	Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida;
$M_e$	Momento fletor de flambagem global elástica (FLT – flambagem lateral com torção);
$C_b$	Fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme;
$r_0$	Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção;
$N_{ey}$	Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo y;
$N_{ez}$	Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo z;
$r_x$	Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal x;
$r_y$	Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal y;
$x_0$	Distância do centro de torção ao centróide, na direção do eixo x;
$y_0$	Distância do centro de torção ao centróide, na direção do eixo y;
$N_{c,Re}$	Valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global;
$N_{c,RI}$	Valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local;
$\lambda_l$	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local;
$N_e$	Força axial de flambagem global elástica;
$N_{c,Rdist}$	Valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem distorcional;
$\lambda_{dist}$	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional;
$N_{c,Rk}$	Valor característico da força axial de compressão resistente;
$N_{c,Rd}$	Força axial de compressão resistente de cálculo;
$M_{Re}$	Valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem global;

$M_e$	Momento fletor de flambagem global elástica (FLT – flambagem lateral com torção);
$M_{Rl}$	Valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem local;
$M_{Rdist}$	Valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem distorcional;
$M_{dist}$	Momento fletor de flambagem distorcional elástica;
$MR_K$	Valor característico do momento fletor resistente;
$MR_d$	Momento fletor resistente de cálculo;
$M_{RK}$	Valor característico do momento fletor resistente;
$M_{Rd}$	Momento fletor resistente de cálculo;

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 COEFICIENTE DE FLAMBAGEM LOCAL ( $k_l$ ).....	14
2.2 MÉTODO DA SEÇÃO EFETIVA.....	14
2.2.1 Força axial de compressão resistente de cálculo.....	14
2.2.2 Momento Resistente.....	15
2.3 MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA.....	17
2.3.1 Força axial de compressão resistente de cálculo.....	17
2.3.2 Momento Resistente.....	18
3. METODOLOGIA.....	20
4. DESENVOLVIMENTO.....	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	25
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	27
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28
APÊNDICE A.....	29
MEMORIAL CÁLCULO - PERFIL 1.....	29
MEMORIAL CÁLCULO – PERFIL 2.....	30
MEMORIAL CÁLCULO - PERFIL 3.....	32
MEMORIAL CÁLCULO - PERFIL 4.....	33
MEMORIAL CÁLCULO - PERFIL 5.....	35
MEMORIAL CÁLCULO - PERFIL 6.....	36
APÊNDICE B.....	38

## **Análise das resistências de viga em perfil U enrijecido com mesa superior inclinada em 30° aplicado em um telhado de galpão industrial.**

Júnior, C. F. A de S.; Resende, J. L. O.; Roquete, L.;

Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ, Departamento de Tecnologia em Engenharia Civil - DTECH, Ouro Branco – Minas Gerais – Brasil.

### **RESUMO**

Este trabalho apresenta a aplicação de um Perfil Formado a Frio (PFF) em U, enrijecido com a mesa superior inclinada em 30° não normatizado, estudado por pesquisas anteriores. O objetivo foi realizar o dimensionamento de uma viga aplicando o uso do perfil proposto. O dimensionamento foi feito baseando-se no método da seção efetiva (MSE) e no método da resistência direta (MRD). Para a aplicação deste PFF, foi desenvolvido uma estrutura de um galpão e escolheu-se as vigas para aplicação do perfil proposto. As análises para avaliação dos esforços solicitantes foram desenvolvidas pelo *software da Autodesk Robot Structural Analysis Professional* (2022). Foi desenvolvida uma comparação, envolvendo os esforços solicitados e os esforços resistentes, obtidos pela aplicação do MSE e do MRD, de acordo com a prescrição normativa, visto que os valores de coeficiente de Flambagem local ( $k_l$ ) foram obtidos a partir de equações propostas em trabalhos anteriores. As propriedades geométricas do perfil foram obtidas pelo *software GBTUL 2.06* (Bebiano et al. 2010). Os resultados comprovaram que é possível utilizar o perfil proposto em um telhado com inclinação de 30°, aplicado em um galpão industrial. Além disso, no cálculo do momento fletor houve a predominância de Flambagem Global, ou seja, os dimensionamentos serão feitos na análise do FLT.

**Palavras-chave:** Perfil formado a frio, PFF, Estruturas Metálicas, Método da seção efetiva, Método da resistência direta.

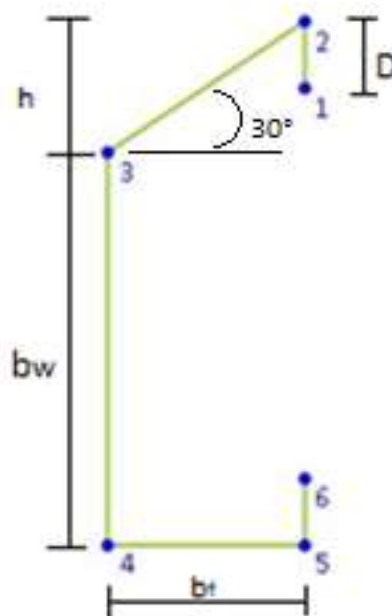
## 1. INTRODUÇÃO

Perfis metálicos são altamente utilizados na construção civil atualmente, podem apresentar diferentes maneiras de produção, variados formatos e tamanhos. Na confecção dos perfis de aço Formados a Frio (PFF) não é utilizada fonte de calor, eles são moldados por meio de prensas, gerando um perfil mais leve e com maior elasticidade. (ABNT NBR 14762, Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, 2010).

Essa facilidade de fabricação em variadas seções transversais gerou uma análise de aplicação voltada para a utilização do PFF em telhados e coberturas, onde é avaliada uma tipologia de PFF em U<sub>e</sub> com a mesa superior inclinada em 30°, não padronizada por norma, o que é verificado em Roquete et al (2021).

Na Figura 1 é apresentado o formato do perfil utilizado nas análises.

Figura 1 - Representação do Perfil U<sub>e</sub> com a mesa superior inclinada em 30°



Este trabalho tem como objetivo apresentar a aplicação de um perfil PFF em U<sub>e</sub> com a mesa superior inclinada em 30° em um projeto de um galpão industrial, que atende as solicitações da estrutura. O perfil estudado é uma viga que serve de apoio diretamente ao telhado devido a inclinação de sua mesa superior, sem que exista a necessidade de, por exemplo, uma inclinação da estrutura, ou realizar a estrutura em treliça, entre outras soluções realizadas atualmente.

O galpão foi projetado com dimensões reais, apresentado Apêndice B, e desenvolvido no *software Robot* (2022), utilizando perfis normatizados, presentes no software, e foi utilizado como referência, o que permitiu obter os esforços solicitantes na estrutura de apoio do telhado

Dentre as vigas de apoio ao telhado, a de maior solicitação foi a referência para se comparar com os esforços resistidos pelos PFF U<sub>e</sub> com a mesa superior inclinada em 30° com uso de métodos de dimensionamento apresentados pela ABNT NBR 14762 (2010) e assim determinar dentre os perfis estudados, um PFF U<sub>e</sub> com a mesa superior inclinada em 30°, que tem a resistência superior as solicitações analisadas.

Para realizar essa comparação aplicou-se os Métodos da Seção Efetiva (MSE) e da Resistência Direta (MRD)) para a determinação da resistência do perfil, conforme ABNT NBR 14762 (2010). Aliado a esses, é utilizado o artigo Roquete et al. (2021), obtendo os valores de coeficiente de flambagem local ( $k_l$ ), por meio das equações propostas no trabalho, descritas no item 2 a seguir. As propriedades geométricas do perfil foram determinadas pelo *software* GBTUL 2.06 (Bebiano et al. 2010).

No item 2.1 será abordado sobre o coeficiente de flambagem, o qual é utilizado para o desenvolvimento dos métodos apresentados no tópico 2.2.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 COEFICIENTE DE FLAMBAGEM LOCAL ( $k_l$ )

Segundo Roquete et al. (2021) as Equações 01 e 02, representam o coeficiente de Flambagem ( $k_l$ ), utilizando o Método da Seção Efetiva, para os perfis descritos.

- Barra sob compressão centrada:

$$k_l = 7,6347 - 5,3696\eta - 93,839\eta^2 + 679,08\eta^3 - 1883,4\eta^4 + 2396,3\eta^5 - 1164,5\eta^6 \quad (\text{Eq. 01})$$

- Barra sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia:

$$k_l = -1276,2 + 18509\eta - 105239\eta^2 + 311754\eta^3 - 513225\eta^4 + 447141\eta^5 - 161357\eta^6 \quad (\text{Eq.02})$$

As Equações 01 e 02 são válidas para as seguintes condições:

$(0,1 \leq \eta \leq 1,0)$  e  $(0,1 \leq D/b_w \leq 0,3)$

Onde:

$$\eta = b_f / b_w$$

$b_f$ ,  $b_w$ ,  $D$  são as dimensões nominais dos elementos, conforme apresentado na Figura 1.

### 2.2 MÉTODO DA SEÇÃO EFETIVA

Segundo a ABNT NBR 14762 (2010), no Método da Seção Efetiva (MSE) a flambagem local do Perfil formado a frio, leva em consideração as propriedades geométricas efetivas. Desse modo, a seguir são apresentadas as formulações utilizando esse método para os cálculos das resistências de um PFF.

#### 2.2.1 Força axial de compressão resistente de cálculo

A força axial de compressão resistente de cálculo é calculada conforme a Equação 03.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma} \quad (\text{Eq.03})$$

Onde:

$$\gamma = 1,20$$

Para a obtenção da área efetiva da seção transversal, são utilizadas as Equações 04, 05, 06 e 07:

$$A_{ef} = A \text{ para } \lambda_p \leq 0,776 \quad (\text{Eq.04})$$

$$A_{ef} = \left( A * \left( 1 - \left( \frac{0,15}{\lambda_p^{0,8}} \right) \right) * \left( \frac{1}{\lambda_p^{0,8}} \right) \right) \text{ para } \lambda_p > 0,776 \quad (\text{Eq.05})$$

$$\lambda_p = \left( \frac{\chi * A * f_y}{Nl} \right)^{0,5} \quad (\text{Eq.06})$$

$$Nl = k_1 * \left( \frac{\pi^2 * E}{12 * (1 - \nu^2) * \left( \frac{bw}{t} \right)^2} \right) * A \quad (\text{Eq.07})$$

Na Equação 07, o valor de  $k_1$  é obtido utilizando as Equação 01.

O fator de redução da força axial de compressão resistente ( $\chi$ ), é calculado de acordo com o índice de esbeltez reduzido ( $\lambda_0$ ), de acordo com as Equações 08, 09 e 10.

$$\lambda_0 \leq 1,5; \quad \chi = 0,658 \lambda_0^2 \quad (\text{Eq.08})$$

$$\lambda_0 > 1,5; \quad \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (\text{Eq.09})$$

$$\lambda_0 = \left( \frac{A * f_y}{N_e} \right)^{0,5} \quad (\text{Eq.10})$$

Onde  $N_e$  é a força axial de flambagem global elástica, calculada conforme a Equação 11.

$$N_e = \left( \frac{\pi^2 * E * I_y}{k_y * L_y} \right) \quad (\text{Eq.11})$$

## 2.2.2 Momento Resistente

O Momento resistente é definido como o menor valor calculado entre as metodologias apresentadas nos tópicos 2.2.2.1 e 2.2.2.2.

### 2.2.2.1 Início de escoamento da seção efetiva

$$MRd = \frac{W_{ef} * f_y}{\gamma} \quad (\text{Eq.12})$$

Onde:

$$\gamma = 1,10 \quad (\text{Eq.13})$$

O módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento ( $W_{ef}$ ), e é calculado de acordo com as Equações 14, 15, 16 e 17.

$$W_{ef} = W \text{ para } \lambda_p \leq 0,673 \quad (\text{Eq.14})$$

$$W_{ef} = \left( W * \left( 1 - \left( \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \right) * \left( \frac{1}{\lambda_p} \right) \right) \text{ para } \lambda_p > 0,673 \quad (\text{Eq.15})$$



$$\lambda_p = \left( \frac{W * f_y}{Ml} \right)^{0,5} \quad (\text{Eq.16})$$

$$Ml = kl * \left( \frac{\pi^2 * E}{12 * (1 - \nu^2) * \left( \frac{bw}{t} \right)^2} \right) * W_c \quad (\text{Eq.17})$$

Na Equação 17, o valor de  $kl$  é obtido utilizando as Equação 02.

#### 2.2.2.2. Flambagem Lateral com torção

$$MRd = \frac{\chi_{FLT} * W_{c,ef} * f_y}{\gamma} \quad (\text{Eq.18})$$

Onde:

$$\gamma = 1,10 \quad (\text{Eq.19})$$

O módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida ( $W_{c,ef}$ ), e é calculado de acordo com as Equações 20, 21, 22 e 23.

$$W_{c,ef} = W_c \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,673 \quad (\text{Eq.20})$$

$$W_{c,ef} = \left( W_c * \left( 1 - \left( \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \right) * \left( \frac{1}{\lambda_p} \right) \right) \quad \text{para } \lambda_p > 0,673 \quad (\text{Eq.21})$$

$$\lambda_p = \left( \frac{\chi_{FLT} * W_c * f_y}{Ml} \right)^{0,5} \quad (\text{Eq.22})$$

$$Ml = kl * \left( \frac{\pi^2 * E}{12 * (1 - \nu^2) * \left( \frac{bw}{t} \right)^2} \right) * W_c \quad (\text{Eq.23})$$

O fator de redução do momento fletor resistente ( $\chi_{FLT}$ ) é calculado pelas Equações 24, 25, 26, 27, 28 e 29.

Sendo:

$$\lambda_0 \leq 0,6; \quad \chi_{FLT} = 1,0 \quad (\text{Eq.24})$$

$$0,6 < \lambda_0 < 1,336; \quad \chi_{FLT} = 1,11 * (1 - 0,278 * \lambda_0^2) \quad (\text{Eq.25})$$

$$\lambda_0 \geq 1,336; \quad \chi_{FLT} = \frac{1}{\lambda_0^2} \quad (\text{Eq.26})$$

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c * f_y}{M_e} \right)^{0,5} \quad (\text{Eq.27})$$

$$M_e = C_b * r_0 * (N_{ey} * N_{ez})^{0,5} \quad (\text{Eq.28})$$

De acordo com a ABNT NBR 14762 (2010), o fator de modificação para momento fletor não uniforme (Cb) pode ser considerado com valor igual a 1,0, sendo a favor da segurança.

$$r_0 = (r_x^2 * r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)^{0,5} \quad (\text{Eq.29})$$

Sendo  $r_x$  e  $r_y$  os raios de giração da seção bruta e  $x_0$  e  $y_0$  as distâncias do centro de torção ao centróide.

Os valores de  $M_e$  são dados pela Equação 28.

## 2.3 MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Segundo a ABNT NBR 14762 (2010), no Método Resistência Direta (MRD) são utilizadas as propriedades geométricas da seção bruta. Visto isso, a seguir são apresentadas as formulações utilizando este método para os cálculos das resistências de um PFF.

A ABNT NBR 14762 (2010) utilizada para o cálculo de MRD pressupõe a análise geral de estabilidade elástica da viga. Para flambagem global, os valores para flambagem global elástica,  $M_{Re}$  e  $N_{c,Re}$ , são obtidos valores exatos. Para a obtenção dos valores críticos para os flambagem elástica local ( $N_{c,RI}$  e  $M_{RI}$ ) e distorcional ( $N_{c,Rdist}$  e  $M_{RI}$ ) é necessário recursos para análise com base na teoria de estabilidade elástica.

### 2.3.1 Força axial de compressão resistente de cálculo

A força axial de compressão resistente característica ( $N_{c,RK}$ ) é o menor valor calculado entre os métodos para Flambagem global, local e distorcional, conforme as Equações 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37 e 38:

#### 2.3.1.1 Flambagem global

$$N_{c,Re} = (0,658\lambda_0^2) * A * f_y \quad \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad (\text{Eq.30})$$

$$N_{c,Re} = \left(\frac{0,877}{\lambda_0^2}\right) * A * f_y \quad \text{para } \lambda_0 > 1,5 \quad (\text{Eq.31})$$

$$\lambda_0 = \left(\frac{A * f_y}{N_e}\right)^{0,5} \quad (\text{Eq.32})$$

#### 2.3.1.2 Flambagem local

$$N_{c,RI} = N_{c,Re} \quad \text{para } \lambda_1 \leq 0,776 \quad (\text{Eq.33})$$

$$N_{c,RI} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_1^{0,8}}\right) * \left(\frac{N_{c,Re}}{\lambda_1^{0,8}}\right) \quad \text{para } \lambda_1 > 0,776 \quad (\text{Eq.34})$$

$$\lambda_1 = \left(\frac{N_{c,Re}}{N_I}\right)^{0,5} \quad (\text{Eq.35})$$

#### 2.3.1.3 Flambagem distorcional

$$N_{c,Rdist} = A * f_y \quad \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,561 \quad (\text{Eq.36})$$

$$N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) * \left(\frac{A * f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \quad \text{para } \lambda_{dist} > 0,561 \quad (\text{Eq.37})$$

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{A * f_y}{N_{dist}}\right)^{0,5} \quad (\text{Eq.38})$$

Para a obtenção da força axial de compressão resistente de cálculo é utilizada a Equação 39.

$$N_{c,Rd} = \frac{N_{c,Rk}}{\gamma} \quad (\text{Eq.39})$$

Onde  $N_{c,Rk}$  é o menor valor entre  $N_{c,Re}$ ;  $N_{c,Rl}$ ;  $N_{c,Rdist}$ .

Sendo  $\gamma$  é igual a 1,20.

### 2.3.2 Momento Resistente

O Momento fletor resistente característico ( $M_{Rk}$ ) é o menor valor calculado entre os métodos para Flambagem lateral com torção, local e distorcional, conforme as Equações 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48 e 49:

#### 2.3.2.1 Flambagem lateral com torção

$$M_{Re} = W * f_y \quad \text{para } \lambda_0 \leq 0,6 \quad (\text{Eq.40})$$

$$M_{Re} = 1,11 * (1 - 0,278 * \lambda_0^2) * W * f_y \quad \text{para } 0,6 < \lambda_0 < 1,336 \quad (\text{Eq.41})$$

$$M_{Re} = \left(\frac{W * f_y}{\lambda_0^2}\right) \quad \text{para } \lambda_0 \geq 1,336 \quad (\text{Eq.42})$$

$$\lambda_0 = \left(\frac{W * f_y}{M_e}\right)^{0,5} \quad (\text{Eq.43})$$

#### 2.3.2.2 Flambagem local

$$M_{Rl} = M_{Re} \quad \text{para } \lambda_1 \leq 0,776 \quad (\text{Eq.44})$$

$$M_{Rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_1^{0,8}}\right) * \frac{M_{Re}}{\lambda_1^{0,8}} \quad \text{para } \lambda_1 > 0,776 \quad (\text{Eq.45})$$

$$\lambda_1 = \left(\frac{M_{Re}}{M_l}\right)^{0,5} \quad (\text{Eq.46})$$

#### 2.3.2.3 Flambagem distorcional

$$M_{Rdist} = W * f_y \quad \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,673 \quad (\text{Eq.47})$$

$$M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}}\right) * \left(\frac{W * f_y}{\lambda_{dist}}\right) \quad \text{para } \lambda_{dist} > 0,673 \quad (\text{Eq.48})$$

$$\lambda_{\text{dist}} = \left( \frac{W \cdot f_y}{M_{\text{dist}}} \right)^{0,5} \quad (\text{Eq.49})$$

Para a obtenção do momento fletor resistente de cálculo é utilizada a Equação 50.

$$M_{\text{Rd}} = \frac{M_{\text{Rk}}}{\gamma} \quad (\text{Eq.50})$$

Onde:

$M_{\text{Rk}}$  é o menor valor entre  $M_{\text{Re}}$ ;  $M_{\text{Rl}}$ ;  $M_{\text{Rdist}}$

Sendo  $\gamma$  é igual a 1,10.

### 3. METODOLOGIA

Para a análise proposta, pode-se dividir o presente trabalho em quatro etapas, sendo: os estudos bibliográficos, avaliação de características da estrutura e os esforços solicitantes, a definição do PFF e por fim, as comparações e avaliações do estudo.

Após estudos bibliográficos, foi desenvolvido um galpão industrial com as cargas atuantes sobre uma viga de perfil U normatizado, utilizado como apoio da cobertura e por meio do *software Robot* (2022) obtiveram-se os valores dos esforços solicitantes.

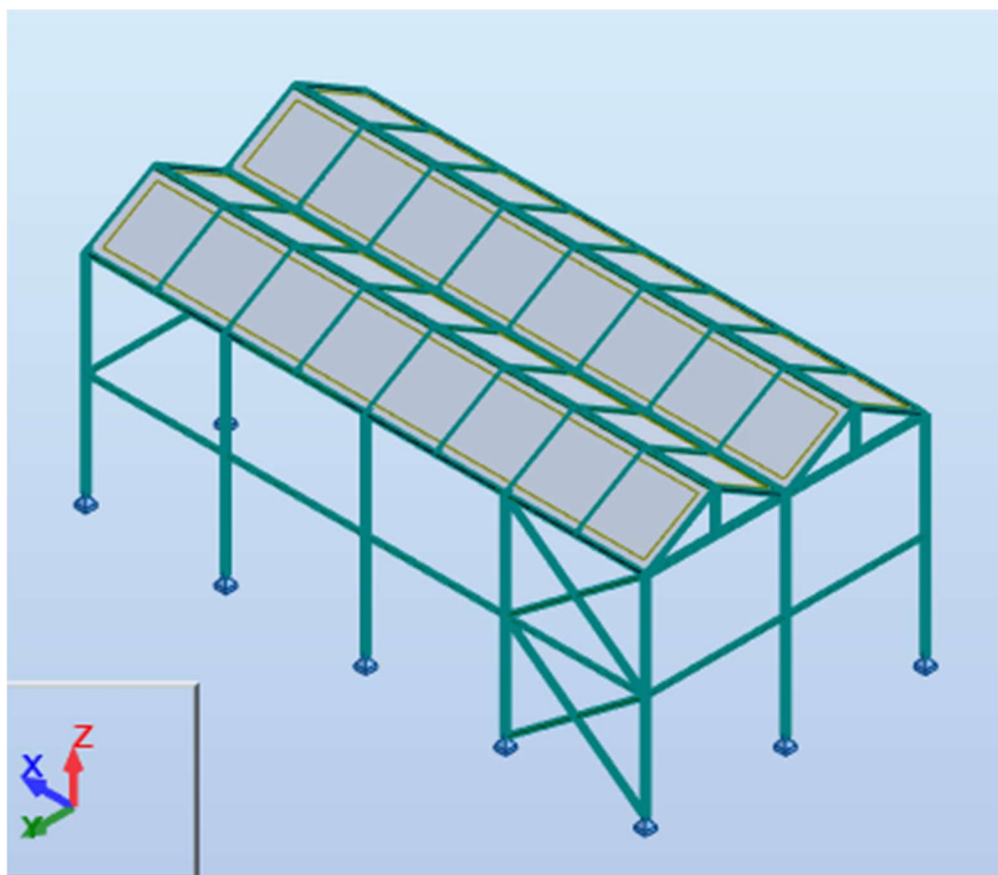
Por meio do *software* GBTUL 2.06 (BEBIANO et al., 2010) e usando como referência os estudos do artigo Roquete et al. (2021), foram estudados os PFF Ue com mesa inclinada em 30° para ser utilizado no telhado da estrutura até que os valores resistentes, dados pelas verificações da ABNT NBR 14762 (2010) atendessem aos valores dos esforços solicitantes.

Com as verificações realizadas, este trabalho apresentou os resultados dos valores resistentes obtidos dos perfis e também uma comparação entre MSE e MRD, assim como estudados pelo trabalho Monteiro et al. (2017), apresentando as médias de cada método e os coeficientes de variação entre os métodos.

#### 4. DESENVOLVIMENTO

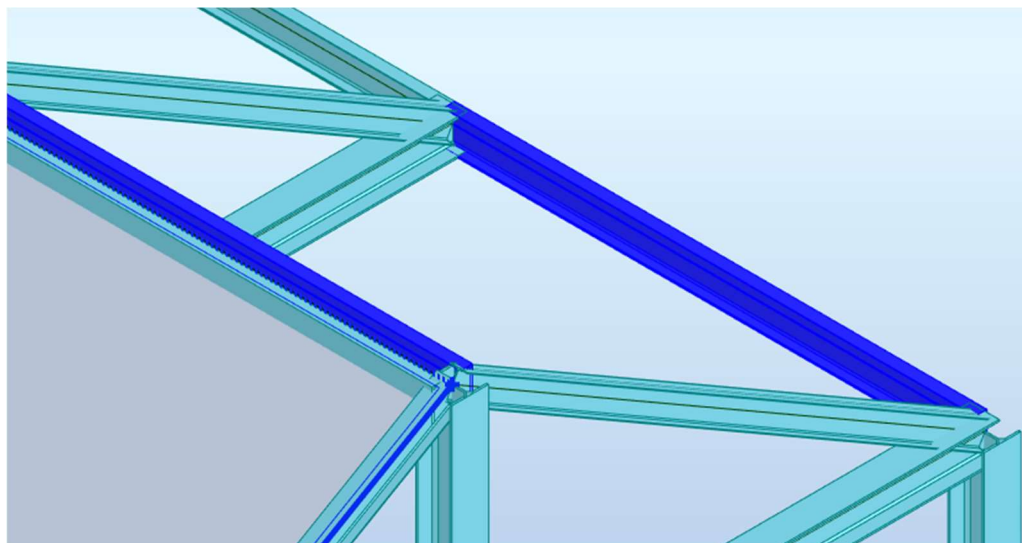
Para o desenvolvimento deste trabalho, foi tomado como premissa, que o perfil proposto seria aplicado estruturalmente para suportar a cobertura de um telhado em estrutura de aço em uma estrutura usual, um galpão de estrutura metálica (Figura 22). Esse apresentando dimensões aplicáveis na prática, descritas no Apêndice B.

Figura 2 – Galpão de estrutura metálica – projetado via *Robot* (2022).



A estrutura foi projetada realizando as verificações necessárias, via *software Robot* (2022). Como o perfil de tipologia (Ue) e mesa superior inclinada em  $30^\circ$  não é normatizado e não existe a possibilidade de alteração no *software*, no projeto Como um pré-dimensionamento foi utilizado um perfil U laminados a quente nas vigas para sustentação do telhado conforme indicado por um exemplo na Figura 3.

Figura 3 – Detalhe Perfil U utilizado para apoio da cobertura.



As cargas consideradas para o projeto foram a de peso próprio da estrutura (inclusive telhado em aço – espessura 0,1cm) ( $F_g$ ), obtida via *Robot* (2022) e de uma ação variável sobre a cobertura, sendo sua carga característica ( $F_q$ ) adotada no valor de 0,5 kPa, e coeficientes de ponderação para determinar a combinação última normal, pela Equação 51, conforme ABNT NBR 8681:2003.

$$F_d = \gamma_g \cdot F_g + \gamma_q \cdot F_q \quad (\text{Eq.51})$$

Dados:

$\gamma_g = 1,25$  – Coeficiente de ponderação de ações permanentes direta – devido a peso próprio das estruturas – conforme a tabela 1 da ABNT NBR 8681:2003

$\gamma_q = 1,5$  – Coeficiente de ponderação de ações variáveis em geral – conforme tabela 4 da ABNT NBR 8681:2003

A partir da simulação estrutural via *Robot* (2022), foram obtidos os valores máximos de esforços solicitantes, obtidos da viga mais solicitada mostrada em destaque na Figura 4 e os resultados apresentados na Tabela 1, e as características geométricas do perfil U laminado a quente, usado como pré-dimensionamento (apenas para determinação da solicitação estrutural) na Tabela 2.

Figura 4 – Destaque da viga mais solicitada.

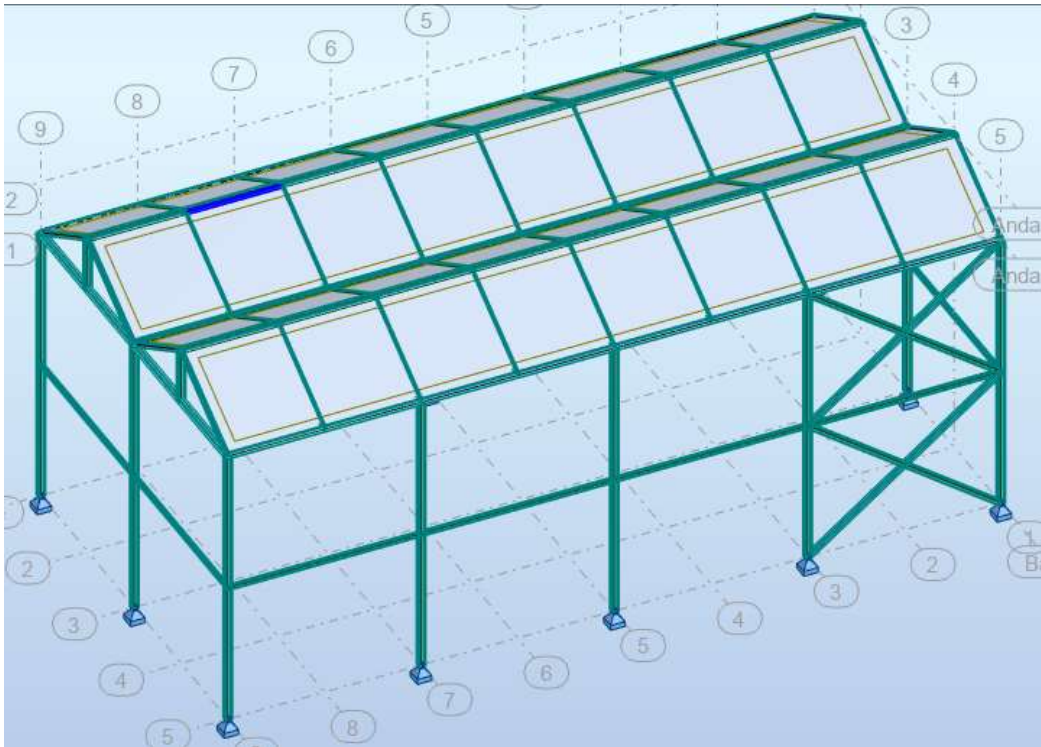


Tabela 1 – Esforços Solicitantes obtidos via *Robot* (2022).

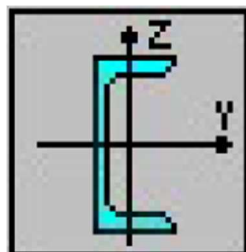
<b>Axial de compressão</b>	<b>68,36 kN</b>
<b>Momento Fletor em Y</b>	<b>3,91 kN.m</b>

Tabela 2 – Características Geométricas.

Perfil	bw[mm]	bf[mm]	tw[mm]	tf[mm]	D[mm]	Iy[mm <sup>4</sup> ]	A[mm <sup>2</sup> ]	Wc[mm <sup>3</sup> ]
U	203	64	1,2	1,0	0	18272600	3555	16430,00

As coordenadas de referências são conforme Figura 5:

Figura 5 – Eixo Referência do Perfil



Fonte: *Robot* (2022).



Alguns dados de entrada foram padronizados para que pudesse ser realizada a comparação e as verificações necessárias, descritos na Tabela 3, sendo L o comprimento do vão livre da viga.

Tabela 3 – Dados de Entrada.

<b>fy[MPa]</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b>E[MPa]</b>	<b>L[m]</b>
250	0,3	200000	3

Para iniciar as comparações entre o perfil U laminado obtido via *Robot* (2022) e o perfil Ue formado a frio com mesa inclinada em 30° por meio do *software* GBTUL 2.06 (BEBIANO et al., 2010), foi selecionado o perfil com proximidade entre os módulos elásticos ( $W_c$ ) dos perfis.

Em seguida foram realizadas as verificações conforme a ABNT NBR 14762 (2010) pelo MSE e MRD, comparando as resistências do perfil com as solicitantes, caso o perfil não tenha atendido algum dos métodos, ele não era aprovado e se iniciava as verificações em outro perfil, sendo analisados os parâmetros que interferiam nos resultados de resistência, como as dimensões de mesa e alma, espessura, entre outros.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O módulo elástico ( $W_c$ ) de valor 16.430 mm<sup>3</sup> para o perfil U laminado a quente e a Tabela 4 apresenta os perfis Ue com mesa inclinada em 30° analisados com seus respectivos módulos elásticos e suas características geométricas por meio do *software* GBTUL 2.06 (BEBIANO et al., 2010). Destaca-se que os perfis foram analisados na sequência de 1 a 6 até a convergência do resultado para resistência comparada a solicitação.

Tabela 4- Dados perfis analisados

Perfil	bw[mm]	bf[mm]	tw[mm]	tf[mm]	D[mm]	Iy[mm <sup>4</sup> ]	A[mm <sup>2</sup> ]	Wc[mm <sup>3</sup> ]
1	75	40	2,65	2,65	15	677529,6	506,6	15642,31
2	100	35	2,25	2,25	17	767050,1	471,19	16751,67
3	100	40	2,00	2,00	17	910793,3	440,38	16377,58
4	75	40	3,00	3,00	15	767050,1	573,6	17709,09
5	100	40	2,25	2,25	17	1024512,4	495,42	18423,46
6	100	40	3,00	3,00	17	1366088,3	660,56	24565,91

A Tabela 5 apresenta os resultados dos esforços resistentes para cada perfil analisado.

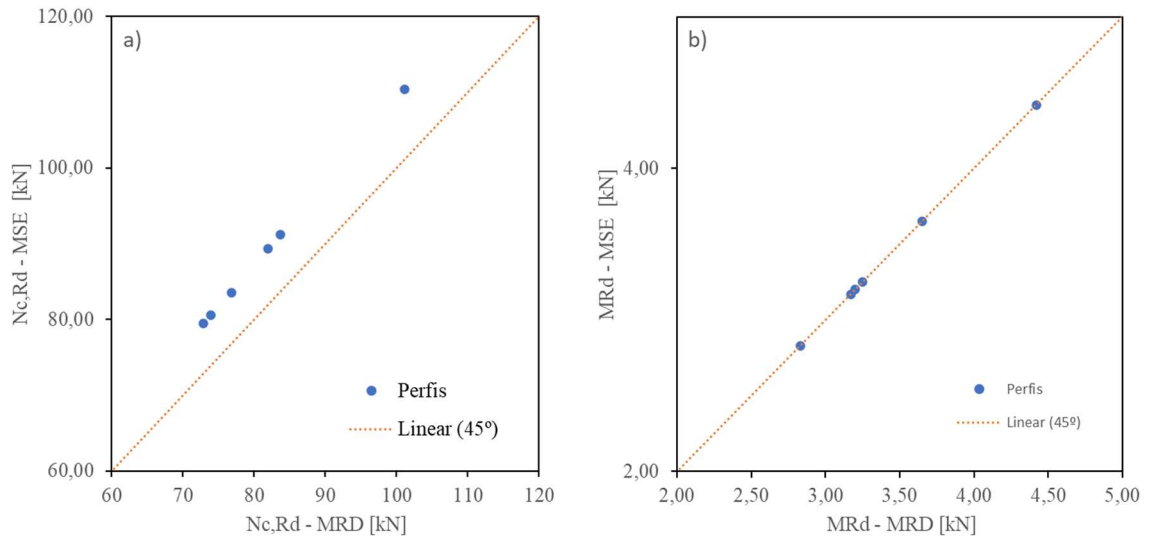
Tabela 5 – Esforços Resistentes MSE x MRD

Perfil	Método da Seção Efetiva (MSE)		Método da Resistência Direta (MRD)		Nc,Rd - MSE / Nc,Rd - MRD	MRd - MSE / MRd - MRD
	Nc,Rd [kN]	Mc,Rd (FLT) [kN.m]	Nc,Rd [kN]	Mc,Rd (FLT) [kN.m]		
1	73,88	2,83	80,60	2,83	0,917	1,00
2	76,87	3,17	83,56	3,17	0,920	1,00
3	72,85	3,25	79,47	3,25	0,917	1,00
4	83,64	3,20	91,24	3,20	0,917	1,00
5	81,95	3,65	89,40	3,65	0,917	1,00
6	101,18	4,42	110,38	4,42	0,917	1,00
				Média	0,917	1,00
				CoV	0,001	0,00

Ao se comparar os valores de resistência à compressão axial obtidos para o MRD com os valores obtidos pelo MSE observa-se que a relação de MSE por MRD se aproxima de 1,0 (Tabela 5), apresentando uma média de 0,917 com um coeficiente de variação (CoV) igual a 0,001, indicando uma boa correlação entre os resultados. O que também pode ser observado na Figura 6(a) valores mais próximos da reta 45° indicam maior semelhança.

Avaliando a relação de resistência ao momento fletor para o MSE com o MRD os valores foram iguais, logo apresentando a média igual a 1 com CoV nulo (Tabela 5). Podendo ser confirmado também na Figura 6(b), sendo os valores iguais da reta de 45°. A igualdade ocorreu devido o dimensionamento, em ambos os métodos, foram realizados em função de predominância de flambagem global.

Figura 6 – Comparação dos valores de resistência para o MSE e MRD: (a) compressão axial; (b) momento fletor



Comparando os esforços resistentes da Tabela 5 com os esforços solicitantes da Tabela 1 é possível identificar quais perfis tiveram as condições de verificações atendidas pelos métodos MRD e MSE, conforme Tabela 6. Observa-se que a relação de solicitação por resistência não deve ultrapassar o valor unitário. Nesse caso o perfil 6 é o que se adequa para aplicação na estrutura proposta. No Apêndice A é apresentado o memorial de cálculo do dimensionamento realizado nesse trabalho.

Tabela 6 – Resultados Solicitantes x Resistentes

Perfil	Método da Resistência Direta (MRD)				Método da Seção Efetiva (MSE)			
	Nc,Sd / Nc,Rd	Nc,Rd [kN]	MSd / MRd	MRd [kN.m]	Nc,Sd / Nc,Rd	Nc,Rd [kN]	MSd / MRd	MRd [kN.m]
1	0,85	ATENDIDO	1,38	NÃO ATENDIDO	0,93	ATENDIDO	1,38	NÃO ATENDIDO
2	0,82	ATENDIDO	1,23	NÃO ATENDIDO	0,89	ATENDIDO	1,23	NÃO ATENDIDO
3	0,86	ATENDIDO	1,20	NÃO ATENDIDO	0,94	ATENDIDO	1,20	NÃO ATENDIDO
4	0,75	ATENDIDO	1,22	NÃO ATENDIDO	0,82	ATENDIDO	1,22	NÃO ATENDIDO
5	0,76	ATENDIDO	1,07	NÃO ATENDIDO	0,83	ATENDIDO	1,07	NÃO ATENDIDO
6	0,62	ATENDIDO	0,88	ATENDIDO	0,68	ATENDIDO	0,88	ATENDIDO

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresenta as verificações de resistência de um perfil formado a frio, enrijecido, com mesa superior inclinada em  $30^\circ$  não normatizado, para ser aplicado em telhados, utilizando com referência um perfil normatizado foi apresentado que é possível realizar a aplicação do perfil estudado. É interessante observar que devido diferenças geométricas e características de fabricação, a primeira relação realizada, feita pelo módulo elástico, não apresentou um perfil que atendia as cargas solicitantes no perfil de referência, mas foi possível após algumas verificações encontrar dentre os possíveis PFF Ue com mesa inclinada em  $30^\circ$  apresentados em Roquete et al. (2021) um que fosse aprovado pelos Método de Resistência Direta e de Seção Efetiva, logo atendendo a ABNT NBR 14762 (2010).

Os resultados em todos os perfis analisados atendiam as verificações dos esforços normais e tendo sua resistência limitada devido aos esforços de momento. Dentre as características geométricas dos perfis, foi observado que houve uma melhora significativa dos valores resistentes aos esforços de momento em função do aumento espessura, aliado o aumento da área da seção, com isso o perfil 6, apresentado na Tabela 6, foi aprovado pelos métodos citados em norma.

Vale ressaltar que neste trabalho, as análises para momento fletor tiveram predominância de Flambagem Global, o que pode ser visto na Tabela 5, devido o coeficiente de variação entre MSE e MRD ser nulo e nos apêndices de cálculo, comprovando que sempre os dimensionamentos serão na análise do FLT. Como sugestão para um seguinte trabalho, pode ser adotado um comprimento menor no travamento da viga, resultando em um condição na qual o dimensionamento não ocorre-se pela flambagem global.

Com a conclusão deste trabalho, é possível afirmar que os estudos apresentados em Roquete et al. (2021) apresentam soluções viáveis para aplicação em telhados de um perfil com a mesa já apropriada para tal situação.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. Ações e segurança nas estruturas - Procedimento - NBR8681:2003. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. NBR14762:2010. Rio de Janeiro. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação- NBR10520:2002. Rio de Janeiro. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. Informação e documentação — Referências — Elaboração- NBR 6023:2018. Rio de Janeiro. 2018.

AUTODESK, Robot Structural Analysis Professional. Versão 2022. [S.I.]: Autodesk, 2022. Disponível em: < <https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/robot-structuralanalysis-professional?sort=score> >. Acesso em: 19 nov. 2022.

BEBIANO, R.; SILVESTRE, N.; CAMOTIM, D., 2010. GBT theoretical background. Disponível em: <<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt/>>. Acesso em: 12 de out. 2022.

MONTEIRO, T. S.; BRANDÃO, A. L. R.; VIEIRA, W. B.; OLIVEIRA, C. E. M.; FREITAS, M. S. da R. (2017). Estudo comparativo entre o método da resistência direta e o método da seção efetiva para perfis formados a frio submetidos a compressão. ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil, November 5-8, 2017

ROQUETE, L.; OLIVEIRA, M. M. de; COSTA, F. N. da S.; MARINHO, L. V.; SARMANHO, A. M. C. Local buckling coefficient for thin-walled lipped channel section with top flange inclined. Research, Society and Development, [S. l.], v. 10, n. 12, p. e92101220254, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/20254>. Acesso em 31 oct. 2022.

## APÊNDICE A

### MEMORIAL CÁLCULO - PERFIL 1

Figura 7 – Perfil 1 - MSE

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da seção efetiva (MSE)			
Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo		Cálculo do momento resistente	
<b>Ney</b> =	148,626 kN	<b>Início de escoamento da seção efetiva</b>	
<b>Equação:</b>	$kl = 7,6347 - 5,3696 \eta - 93,839 \eta^2 + 679,08 \eta^3 - 1883,4 \eta^4 + 2396,3 \eta^5 - 1164,5 \eta^6$ ; onde: $\eta = bf / bw$	<b>Equação:</b>	$kl = -1276,2 + 18509 \eta - 105239 \eta^2 + 311754 \eta^3 - 513225 \eta^4 + 447141 \eta^5 - 161357 \eta^6$ ; onde: $\eta = bf / bw$
<b>KI</b> =	5,318	<b>KI</b> =	11,74880983
<b>Área seção:</b>	0,000507 m <sup>2</sup>	<b>MI</b> =	41,474 kN*m
<b>fy</b> =	250000 kPa	<b>Wc</b> =	1,56423E-05 m <sup>3</sup>
<b>v</b> =	0,3	<b>λp</b> =	0,307
<b>ly</b> =	6,77653E-07 m <sup>4</sup>	<b>W</b> =	1,56423E-05 m <sup>3</sup>
<b>L</b> =	3 m	<b>γ</b> =	1,1
<b>bw</b> =	0,075 m	<b>Wef</b> =	1,56423E-05 m <sup>3</sup>
<b>bf</b> =	0,04 m		
<b>t</b> =	0,00265 m		
<b>γ</b> =	1,2		
<b>E</b> =	200000000 kPa		
<b>λ0</b> =	0,92		
<b>X</b> =	0,699983416		
<b>NI</b> =	608,06		
<b>λp</b> =	0,381853069		
<b>Aef</b> =	0,000507 m <sup>2</sup>	<b>MRd</b> =	3,555 kN*m
<b>Nc,Rd</b> =	73,885 kN	<b>MRd</b> =	2,831 kN*m
		<b>MRd</b> =	2,831 kN*m

Figura 8 – Perfil 1 – MRD – Força Axial

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da resistência direta (MRD)					
Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo					
Flambagem Global		Flambagem Local		Flambagem Distorcional	
<b>A</b> =	0,000507 m <sup>2</sup>	<b>NI</b> =	607,01 kN	<b>Ndist</b> =	504,18 kN
<b>fy</b> =	250000 kPa	<b>Nc,Re</b> =	88,662 kN	<b>A</b> =	0,000507 m <sup>2</sup>
<b>Ney</b> =	148,626 kN	<b>λl</b> =	0,3822	<b>fy</b> =	250000 kPa
<b>λ0</b> =	0,9232			<b>λdist</b> =	0,50122
<b>Nc,Re</b> =	88,662 kN	<b>Nc,RI</b> =	88,662 kN	<b>Nc,Rdist</b> =	126,663 kN
<b>Nc,Rd</b> =	80,601 kN	<b>Nc,Rd</b> =	80,601 kN	<b>Nc,Rd</b> =	115,148 kN
<b>Nc,Rd</b> =		<b>Nc,Rd</b> =	80,601	<b>Nc,Rd</b> =	kN

Figura 9 – Perfil 1 – MRD – Momento Resistente

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da resistência direta (MRD)					
Cálculo do momento resistente					
Flambagem lateral com torção		Flambagem Local		Flambagem Distorcional	
W=	0,00001564 m <sup>3</sup>	MI=	41,701 kN*m	Mdist=	15,73823 kN*m
fy=	250000 kPa	Mc,Re=	3,114	W=	0,0000156 m <sup>3</sup>
Me=	3,846 kN*m	λl=	0,2733	fy=	250000 kPa
λ0=	1,0084			λdist=	0,49847
X <sub>FLT</sub> =	0,796240382				
Mc,Re=	3,114 kN*m	Mc,RI=	3,114 kN*m	Mc,Rdist=	3,911 kN*m
Mc,Rd=	2,831 kN*m	Mc,Rd=	2,831 kN*m	Mc,Rd=	3,555 kN*m
Mc,Rd=	2,831		kN*m		

## MEMORIAL CÁLCULO – PERFIL 2

Figura 10 – Perfil 2 - MSE

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da seção efetiva (MSE)					
Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo		Cálculo do momento resistente			
Ney=		Início de escoamento da seção efetiva		Flambagem Lateral com torção	
201,632 kN		Equação: $kl = -1276,2 + 18509 \eta - 105239 \eta^2 + 311754 \eta^3 - 513225 \eta^4 + 447141 \eta^5 - 161357 \eta^6$ ; onde: $\eta = bf / bw$		Iz= 9,42509E-08 m <sup>4</sup>	
KI=	5,558	KI=	26,89393823	Cb=	1
Área seção:	0,000471 m <sup>2</sup>	MI=	41,227 kN*m	Me=	4,658 kN*m
fy=	250000 kPa	Wc=	1,67517E-05 m <sup>3</sup>	λ0=	0,948183093
v=	0,3	λp=	0,319	X <sub>FLT</sub> =	0,832570788
Iy=	9,19331E-07 m <sup>4</sup>	W=	1,67517E-05 m <sup>3</sup>	MI=	41,227 kN*m
L=	3 m	γ=	1,1	λp=	0,290815344
bw=	0,1 m	Wef=	1,67517E-05 m <sup>3</sup>	Wc,ef=	1,67517E-05
bf=	0,035 m			r0=	0,0722 m
t=	0,00225 m			ry=	-0,001 m
γ=	1,2			rz=	0,045 m
E=	200000000 kPa			y0=	0,012 m
λ0=	0,76			z0=	0,055 m
X=	0,783079814			Nez=	20,672 kN
NI=	239,65				
λp=	0,620408254				
Aef=	0,000471 m <sup>2</sup>	MRd=	3,807 kN*m	MRd=	3,170 kN*m
Nc,Rd=	76,869 kN	MRd=	3,170 kN*m		

Figura 11 – Perfil 2 – MRD – Força Axial

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da resistência direta (MRD)								
Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo								
Flambagem Global			Flambagem Local			Flambagem Distorcional		
A=	0,000471	m <sup>2</sup>	NI=	243,97	kN	Ndist=	328,56	kN
fy=	250000	kPa	Nc,Re=	92,243	kN	A=	0,000471	m <sup>2</sup>
Ney=	201,632	kN	λI=	0,6149		fy=	250000	kPa
λ0=	0,7643					λdist=	0,59876	
<b>Nc,Re=</b>	<b>92,243</b>	<b>kN</b>	<b>Nc,RI=</b>	<b>92,243</b>	<b>kN</b>	<b>Nc,Rdist=</b>	<b>117,137</b>	<b>kN</b>
<b>Nc,Rd=</b>	<b>83,857</b>	<b>kN</b>	<b>Nc,Rd=</b>	<b>83,857</b>	<b>kN</b>	<b>Nc,Rd=</b>	<b>106,488</b>	<b>kN</b>
<b>Nc,Rd=</b>	<b>83,857</b>						<b>kN</b>	

Figura 12 – Perfil 2 – MRD – Momento Resistente

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da resistência direta (MRD)								
Cálculo do momento resistente								
Flambagem lateral com torção			Flambagem Local			Flambagem Distorcional		
W=	0,00001675	m <sup>3</sup>	MI=	37,630	kN*m	Mdist=	20,03819	kN*m
fy=	250000	kPa	Mc,Re=	3,487		W=	0,0000168	m <sup>3</sup>
Me=	4,658	kN*m	λI=	0,3044		fy=	250000	kPa
λ0=	0,9482					λdist=	0,45716	
X <sub>FLT</sub> =	0,832570788							
<b>Mc,Re=</b>	<b>3,487</b>	<b>kN*m</b>	<b>Mc,RI=</b>	<b>3,487</b>	<b>kN*m</b>	<b>Mc,Rdist=</b>	<b>4,188</b>	<b>kN*m</b>
<b>Mc,Rd=</b>	<b>3,170</b>	<b>kN*m</b>	<b>Mc,Rd=</b>	<b>3,170</b>	<b>kN*m</b>	<b>Mc,Rd=</b>	<b>3,807</b>	<b>kN*m</b>
<b>Mc,Rd=</b>	<b>3,170</b>						<b>kN*m</b>	



## MEMORIAL CÁLCULO - PERFIL 3

Figura 13 – Perfil 3 - MSE

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da seção efetiva (MSE)						
Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo			Cálculo do momento resistente			
Ney=		199,759 kN	Início de escoamento da seção efetiva		Flambagem Lateral com torção	
Equação:	$kl = 7,6347 - 5,3696 \eta - 93,839 \eta^2 + 679,08 \eta^3 - 1883,4 \eta^4 + 2396,3 \eta^5 - 1164,5 \eta^6$ ; onde: $\eta = bf/bw$		Equação:	$kl = -1276,2 + 18509 \eta - 105239 \eta^2 + 311754 \eta^3 - 513225 \eta^4 + 447141 \eta^5 - 161357 \eta^6$ ; onde: $\eta = bf/bw$		
Kl=	5,487		Kl=	20,661568	Cb=	1
Área seção:	0,000440 m <sup>2</sup>		MI=	30,966 kN*m	Me=	5,304 kN*m
fy=	250000 kPa		Wc=	1,63776E-05 m <sup>3</sup>	$\lambda_0=$	0,878605325
v=	0,3		$\lambda_p=$	0,364	$X_{FLT}=$	0,871792497
Iy=	9,10793E-07 m <sup>4</sup>		W=	1,63776E-05 m <sup>3</sup>	MI=	30,966 kN*m
L=	3 m		$\gamma=$	1,1	$\lambda_p=$	0,339514917
bw=	0,1 m		Wef=	1,63776E-05 m <sup>3</sup>	Wc,ef=	1,63776E-05
bf=	0,04 m				r0=	0,0755 m
t=	0,00225 m				ry=	-0,020 m
$\gamma=$	1,2				rz=	0,045 m
E=	200000000 kPa				y0=	0,014 m
$\lambda_0=$	0,74				z0=	0,056 m
X=	0,793994226				Nez=	24,713 kN
NI=	221,12					
$\lambda_p=$	0,628744697					
Aef=	0,000440 m <sup>2</sup>		MRd=	3,722 kN*m	MRd=	3,245 kN*m
Nc,Rd=	72,846 kN		MRd=	3,245		kN*m

Figura 14 – Perfil 3 – MRD – Força Axial

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da resistência direta (MRD)					
Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo					
Flambagem Global		Flambagem Local		Flambagem Distorcional	
A=	0,000440 m <sup>2</sup>	NI=	175,38 kN	Ndist=	256,03 kN
fy=	250000 kPa	Nc,Re=	87,415 kN	A=	0,000440 m <sup>2</sup>
Ney=	199,759 kN	$\lambda_1=$	0,7060	fy=	250000 kPa
$\lambda_0=$	0,7424			$\lambda_{dist}=$	0,65575
Nc,Re=	87,415 kN	Nc,RI=	87,415 kN	Nc,Rdist=	106,899 kN
Nc,Rd=	79,468 kN	Nc,Rd=	79,468 kN	Nc,Rd=	97,181 kN
Nc,Rd=			79,468		kN

Figura 15 – Perfil 3 – MRD – Momento Resistente

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da resistência direta (MRD)					
Cálculo do momento resistente					
Flambagem lateral com torção		Flambagem Local		Flambagem Distorcional	
W=	0,00001638 m <sup>3</sup>	MI=	24,083 kN*m	Mdist=	13,46373 kN*m
fy=	250000 kPa	Mc,Re=	3,569	W=	0,0000164 m <sup>3</sup>
Me=	5,304 kN*m	λl=	0,3850	fy=	250000 kPa
λ0=	0,8786			λdist=	0,55146
X <sub>FLT</sub> =	0,871792497				
Mc,Re=	3,569 kN*m	Mc,RI=	3,569 kN*m	Mc,Rdist=	4,094 kN*m
Mc,Rd=	3,245 kN*m	Mc,Rd=	3,245 kN*m	Mc,Rd=	3,722 kN*m
Mc,Rd=	3,245		kN*m		

## MEMORIAL CÁLCULO - PERFIL 4

Figura 16 – Perfil 4 - MSE

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da seção efetiva (MSE)					
Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo		Cálculo do momento resistente			
Ney=		Início de escoamento da seção efetiva		Flambagem Lateral com torção	
Ney=	168,233 kN	Equação:	$kl = -1276,2 + 18509 \eta - 105239 \eta^2 + 311754 \eta^3 - 513225 \eta^4 + 447141 \eta^5 - 161357 \eta^6$ ; onde: $\eta = bf/bw$	Iz=	1,44443E-07 m <sup>4</sup>
KI=	5,318	KI=	11,74880983	Cb=	1
Área seção:	0,000574 m <sup>2</sup>	MI=	60,175 kN*m	Me=	4,355 kN*m
fy=	250000 kPa	Wc=	1,77091E-05 m <sup>3</sup>	λ0=	1,008312308
v=	0,3	λp=	0,271	X <sub>FLT</sub> =	0,796268655
Iy=	7,6705E-07 m <sup>4</sup>	W=	1,77091E-05 m <sup>3</sup>	MI=	60,175 kN*m
L=	3 m	γ=	1,1	λp=	0,242041221
bw=	0,075 m	Wef=	1,77091E-05 m <sup>3</sup>	Wc,ef=	1,77091E-05
bf=	0,04 m			r0=	0,0596 m
t=	0,003 m			ry=	-0,021 m
γ=	1,2			rz=	0,032 m
E=	200000000 kPa			y0=	0,015 m
λ0=	0,92			z0=	0,043 m
X=	0,699947939			Nez=	31,680 kN
NI=	882,21				
λp=	0,337294997				
Aef=	0,000574 m <sup>2</sup>	MRd=	4,025 kN*m	MRd=	3,205 kN*m
Nc,Rd=	83,639 kN	MRd=	3,205 kN*m		

Figura 17 – Perfil 4 – MRD – Força Axial

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da resistência direta (MRD)								
Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo								
Flambagem Global			Flambagem Local			Flambagem Distorcional		
A=	0,000574	m <sup>2</sup>	NI=	878,74	kN	Ndist=	664,67	kN
fy=	250000	kPa	Nc,Re=	100,367	kN	A=	0,000574	m <sup>2</sup>
Ney=	168,233	kN	λl=	0,3380		fy=	250000	kPa
λ0=	0,9232					λdist=	0,46447	
<b>Nc,Re=</b>	<b>100,367</b>	<b>kN</b>	<b>Nc,RI=</b>	<b>100,367</b>	<b>kN</b>	<b>Nc,Rdist=</b>	<b>143,393</b>	<b>kN</b>
<b>Nc,Rd=</b>	<b>91,243</b>	<b>kN</b>	<b>Nc,Rd=</b>	<b>91,243</b>	<b>kN</b>	<b>Nc,Rd=</b>	<b>130,357</b>	<b>kN</b>
<b>Nc,Rd=</b>	<b>91,243</b>						<b>kN</b>	

Figura 18 – Perfil 4 – MRD – Momento Resistente

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da resistência direta (MRD)								
Cálculo do momento resistente								
Flambagem lateral com torção			Flambagem Local			Flambagem Distorcional		
W=	0,00001771	m <sup>3</sup>	MI=	59,499	kN*m	Mdist=	20,99555	kN*m
fy=	250000	kPa	Mc,Re=	3,525		W=	0,0000177	m <sup>3</sup>
Me=	4,355	kN*m	λl=	0,2434		fy=	250000	kPa
λ0=	1,0083					λdist=	0,45920	
X <sub>FLT</sub> =	0,796268655							
<b>Mc,Re=</b>	<b>3,525</b>	<b>kN*m</b>	<b>Mc,RI=</b>	<b>3,525</b>	<b>kN*m</b>	<b>Mc,Rdist=</b>	<b>4,427</b>	<b>kN*m</b>
<b>Mc,Rd=</b>	<b>3,205</b>	<b>kN*m</b>	<b>Mc,Rd=</b>	<b>3,205</b>	<b>kN*m</b>	<b>Mc,Rd=</b>	<b>4,025</b>	<b>kN*m</b>
<b>Mc,Rd=</b>	<b>3,205</b>						<b>kN*m</b>	

## MEMORIAL CÁLCULO - PERFIL 5

Figura 19 – Perfil 5 - MSE

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da seção efetiva (MSE)						
Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo			Cálculo do momento resistente			
Ney=		224,732 kN	Início de escoamento da seção efetiva		Flambagem Lateral com torção	
Equação:	$kl = 7,6347 - 5,3696 \eta - 93,839 \eta^2 + 679,08 \eta^3 - 1883,4 \eta^4 + 2396,3 \eta^5 - 1164,5 \eta^6$ ; onde: $\eta = bf / bw$		Equação:	$kl = -1276,2 + 18509 \eta - 105239 \eta^2 + 311754 \eta^3 - 513225 \eta^4 + 447141 \eta^5 - 161357 \eta^6$ ; onde: $\eta = bf / bw$		
			KI=	20,661568	Cb=	1
Área seção:	0,000495 m <sup>2</sup>		MI=	34,834 kN*m	Me=	5,968 kN*m
fy=	250000 kPa		Wc=	1,84235E-05 m <sup>3</sup>	λ0=	0,878519946
v=	0,3		λp=	0,364	X <sub>FLT</sub> =	0,87183879
Iy=	1,02466E-06 m <sup>4</sup>		W=	1,84235E-05 m <sup>3</sup>	MI=	34,834 kN*m
L=	3 m		γ=	1,1	λp=	0,339523931
bw=	0,1 m		Wef=	1,84235E-05 m <sup>3</sup>	Wc,ef=	1,84235E-05
bf=	0,04 m				r0=	0,0755 m
t=	0,00225 m				ry=	-0,020 m
γ=	1,2				rz=	0,045 m
E=	200000000 kPa				y0=	0,014 m
λ0=	0,74				z0=	0,056 m
X=	0,793995898				Nez=	27,808 kN
NI=	936,74					
λp=	0,324012247					
Aef=	0,000495 m <sup>2</sup>		MRd=	4,187 kN*m	MRd=	3,651 kN*m
Nc,Rd=	81,952 kN		MRd=	3,651		kN*m

Figura 20 – Perfil 5 – MRD – Força Axial

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da resistência direta (MRD)					
Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo					
Flambagem Global		Flambagem Local		Flambagem Distorcional	
A=	0,000495 m <sup>2</sup>	NI=	249,37 kN	Ndist=	333,12 kN
fy=	250000 kPa	Nc,Re=	98,342 kN	A=	0,000495 m <sup>2</sup>
Ney=	224,732 kN	λI=	0,6280	fy=	250000 kPa
λ0=	0,7424			λdist=	0,60976
Nc,Re=	98,342 kN	Nc,RI=	98,342 kN	Nc,Rdist=	122,746 kN
Nc,Rd=	89,402 kN	Nc,Rd=	89,402 kN	Nc,Rd=	111,587 kN
Nc,Rd=	89,402				kN

Figura 21 – Perfil 5 – MRD – Momento Resistente

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da resistência direta (MRD)					
Cálculo do momento resistente					
Flambagem lateral com torção		Flambagem Local		Flambagem Distorcional	
W=	0,00001842 m <sup>3</sup>	MI=	34,158 kN*m	Mdist=	17,43438 kN*m
fy=	250000 kPa	Mc,Re=	4,016	W=	0,0000184 m <sup>3</sup>
Me=	5,968 kN*m	λl=	0,3429	fy=	250000 kPa
λ0=	0,8785			λdist=	0,51399
X <sub>FLT</sub> =	0,87183879				
Mc,Re=	4,016 kN*m	Mc,RI=	4,016 kN*m	Mc,Rdist=	4,606 kN*m
Mc,Rd=	3,651 kN*m	Mc,Rd=	3,651 kN*m	Mc,Rd=	4,187 kN*m
Mc,Rd=	3,651		kN*m		

## MEMORIAL CÁLCULO - PERFIL 6

Figura 22 – Perfil 6 – MSE

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da seção efetiva (MSE)					
Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo		Cálculo do momento resistente			
Ney=		Início de escoamento da seção efetiva		Flambagem Lateral com torção	
224,732 kN		Equação: $kl = -1276,2 + 18509 \eta - 105239 \eta^2 + 311754 \eta^3 - 513225 \eta^4 + 447141 \eta^5 - 161357 \eta^6$ ; onde: $\eta = bf/bw$		lz=	1,26791E-07 m <sup>4</sup>
Equação: $kl = 7,6347 - 5,3696 \eta - 93,839 \eta^2 + 679,08 \eta^3 - 1883,4 \eta^4 + 2396,3 \eta^5 - 1164,5 \eta^6$ ; onde: $\eta = bf/bw$		KI=	20,661568	Cb=	1
Área seção=	0,000661 m <sup>2</sup>	MI=	82,574 kN*m	Me=	5,968 kN*m
fy=	250000 kPa	Wc=	2,45659E-05 m <sup>3</sup>	λ0=	1,014454228
v=	0,3	λp=	0,273	X <sub>FLT</sub> =	0,792434958
ly=	1,02466E-06 m <sup>4</sup>	W=	2,45659E-05 m <sup>3</sup>	MI=	82,574 kN*m
L=	3 m	γ=	1,1	λp=	0,242770198
bw=	0,1 m	Wef=	2,45659E-05 m <sup>3</sup>	Wc,ef=	2,45659E-05
bf=	0,04 m			r0=	0,0755 m
t=	0,003 m			ry=	-0,020 m
γ=	1,2			rz=	0,045 m
E=	200000000 kPa			y0=	0,014 m
λ0=	0,86			z0=	0,056 m
X=	0,735236469			Nez=	27,808 kN
NI=	589,66				
λp=	0,453774876				
Aef=	0,000661 m <sup>2</sup>	MRd=	5,583 kN*m	MRd=	4,424 kN*m
Nc,Rd=	101,181 kN	MRd=	4,424	kN*m	

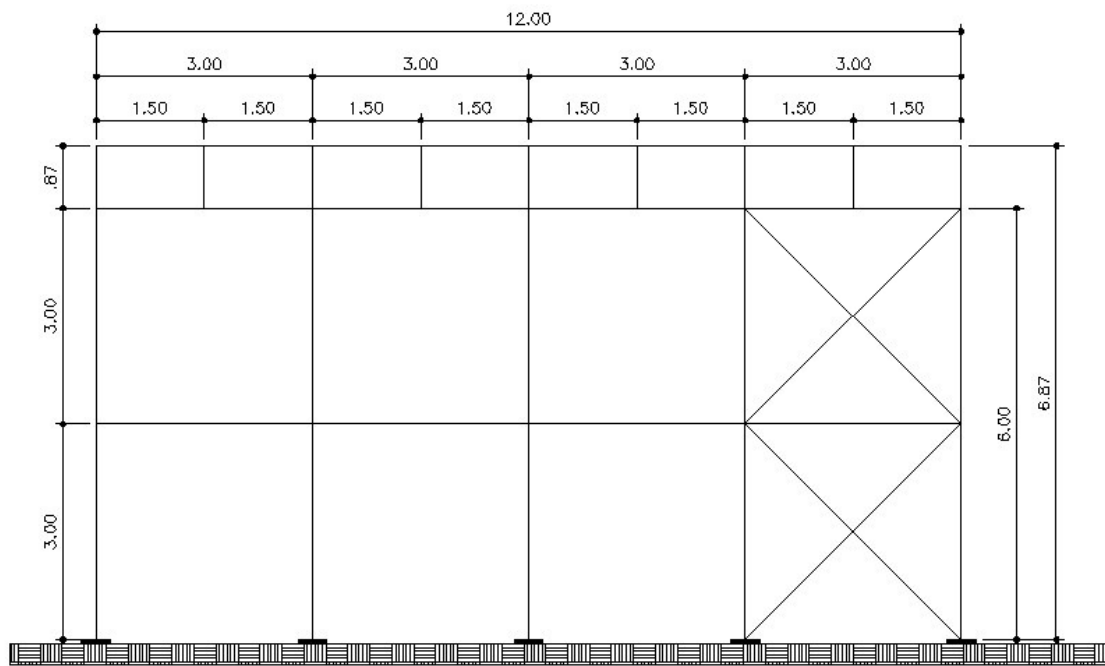
Figura 23 – Perfil 6 – MRD – Força Axial

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da resistência direta (MRD)								
Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo								
Flambagem Global			Flambagem Local			Flambagem Distorcional		
A=	0,000661	m <sup>2</sup>	NI=	588,02	kN	Ndist=	635,3	kN
fy=	250000	kPa	Nc,Re=	121,417	kN	A=	0,000661	m <sup>2</sup>
Ney=	224,732	kN	λl=	0,4544		fy=	250000	kPa
λ0=	0,8572					λdist=	0,50984	
<b>Nc,Re=</b>	<b>121,417</b>	<b>kN</b>	<b>Nc,RI=</b>	<b>121,417</b>	<b>kN</b>	<b>Nc,Rdist=</b>	<b>165,140</b>	<b>kN</b>
<b>Nc,Rd=</b>	<b>110,379</b>	<b>kN</b>	<b>Nc,Rd=</b>	<b>110,379</b>	<b>kN</b>	<b>Nc,Rd=</b>	<b>150,127</b>	<b>kN</b>
<b>Nc,Rd=</b>	<b>110,379</b>						<b>kN</b>	

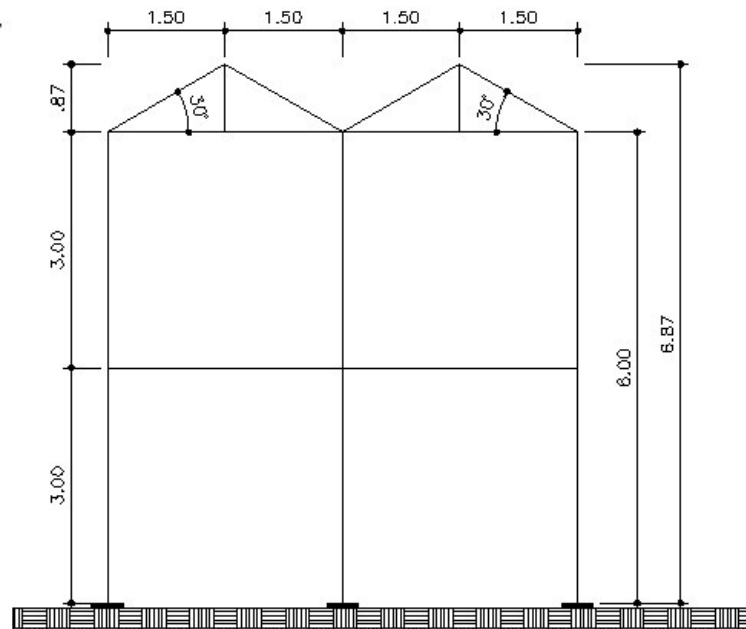
Figura 24 – Perfil 6 – MRD – Momento Resistente

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS - Método da resistência direta (MRD)								
Cálculo do momento resistente								
Flambagem lateral com torção			Flambagem Local			Flambagem Distorcional		
W=	0,00002457	m <sup>3</sup>	MI=	79,745	kN*m	Mdist=	31,60496	kN*m
fy=	250000	kPa	Mc,Re=	4,867		W=	0,0000246	m <sup>3</sup>
Me=	5,968	kN*m	λl=	0,2470		fy=	250000	kPa
λ0=	1,0145					λdist=	0,44082	
X <sub>FLT</sub> =	0,792434958							
<b>Mc,Re=</b>	<b>4,867</b>	<b>kN*m</b>	<b>Mc,RI=</b>	<b>4,867</b>	<b>kN*m</b>	<b>Mc,Rdist=</b>	<b>6,141</b>	<b>kN*m</b>
<b>Mc,Rd=</b>	<b>4,424</b>	<b>kN*m</b>	<b>Mc,Rd=</b>	<b>4,424</b>	<b>kN*m</b>	<b>Mc,Rd=</b>	<b>5,583</b>	<b>kN*m</b>
<b>Mc,Rd=</b>	<b>4,424</b>						<b>kN*m</b>	

## APÊNDICE B



**VISTA LONGITUDINAL**



**VISTA TRANSVERSAL**