

4 Estudo Paramétrico

4.1. Descrição do estudo

Neste capítulo é desenvolvido estudo paramétrico dos galpões industriais considerados, com os objetivos de avaliar a consideração ou não dos efeitos de segunda ordem, comparar a diferentes tipologias e obter uma solução prática para o pré-dimensionamento para estes tipos de estruturas treliçadas. As dimensões dos modelos de galpões considerados foram variadas de forma a poder-se comparar os diferentes tipos de análises estruturais e as metodologias utilizadas.

No desenvolvimento de um projeto de um galpão industrial com sistemas treliçados existe a necessidade de se determinar se a análise precisa ou não considerar os efeitos de segunda ordem. Para fazer esta avaliação, realizou-se um estudo paramétrico onde foram variados diversos parâmetros (Figura 4.1) e considerando diferentes soluções tipológicas. A escolha dos parâmetros foi idealizada tendo em vista a obtenção de uma melhor solução possível. Isso resultou em 42 modelos de galpões a serem analisados e dimensionados, para as três tipologias de treliças consideradas. Na Figura 4.1 apresentam-se as características dos modelos de galpões considerados e os seus respectivos parâmetros fixos e variáveis. Apresentam-se aqui as análises estruturais e o desenvolvimento dos critérios de dimensionamento. Isso foi feito através do programa *Robot* e a validação foi feita através da aplicação das formulações analíticas da norma ABNT NBR8800: 2008 para cada tipo de elemento estrutural.

4.2. Características dos modelos de galpões

Os modelos de galpões considerados para este estudo são compostos por uma cobertura de duas águas e as estruturas com as seguintes tipologias: galpão de com treliça triangular (GT), galpão com treliça de banzos paralelos (GP) e galpão com treliça trapezoidal (GZ), com vãos livres (L) de 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45

metros, distância entre pórticos (B) de 6 e 9 metros. Estes pórticos são sistemas estruturais para galpões industriais de uso geral. O estudo paramétrico considera as diversas soluções, vãos e espaçamentos.

4.2.1. Parâmetros dos galpões

Parâmetros variáveis:

- Tipologia do pórtico transversal: 3 tipos de treliças: galpão triangular (GT), banzos paralelos (GP) e trapezoidal (GZ).
- Vão livre do pórtico transversal de 15 a 45 m.
- Distância entre pórticos transversais (B) de 6m e 9m

Parâmetros fixos:

- Inclinação de cobertura: 10°
- Altura da coluna: 8 m, Comprimento total do galpão: 54 m

Vão Livre	Galpão Treliça Triangular (GT)	Galpão Treliça Banzo Paralelo (GP)	Galpão Treliça Trapezoidal (GZ)
15 m			
20 m			
25 m			
30 m			
35 m			
40 m			
45 m			

Figura 4.1 – Modelos de galpões analisado para espaçamento de pórticos de 6m e 9m.

4.2.2. Definição dos modelos

Nesta seção definem-se as características geométricas de cada modelo. As tipologias de pórticos treliçados escolhidas para o desenvolvimento do estudo são as tipicamente encontradas no Brasil. Para definição das dimensões dos modelos que compõem o estudo paramétrico, toma-se como referência uma inclinação de 10° para as vigas de cobertura (o que é usual para o caso de telhas metálicas) e a relação flecha/vão de acordo com *Bellei (2010)* recomenda que para que as armações de treliças sejam econômicas a relação flecha/vão deve ser de $1/8$ a $1/15$, sendo a mais usada a $1/10$. Portanto mantendo esta inclinação de 10° e adota-se a relação flecha da treliça / vão livre entre os valores anteriores recomendados. Do ponto de vista prático, consideram-se vãos de até 45m, dado que para valores maiores, por exemplo galpões de 50m, é mais econômico projetar dois vãos de 25m (*Carlos Martins, 2010*). Com estas medidas pretende-se manter próximas as inércias equivalentes das seções transversais no meio do vão dos diferentes tipos de pórticos. Outro fator dado por *Bellei (2010)* que possibilita a obtenção de maior economia de material, é a orientação das diagonais para trabalharem à tração.

Considera-se que os pórticos são rígidos, ou seja, engastados nas ligações treliça-coluna (com exceção do pórtico de treliça triangular com ligação articulada), constituídos por treliças ligados às colunas através de ligações rígidas, isto é, ligações com capacidade de transmissão de momentos fletores. Este tipo de pórtico é muito mais eficiente na transferência de cargas recebidas pela cobertura do que o pórtico de vigas simplesmente apoiadas. Tem ainda uma vantagem importante em relação a estes: possui resistência contra as ações do vento nas fachadas laterais do edifício, aliviando assim a necessidade de contraventamentos no plano dos pórticos. Os vínculos nas bases das colunas são considerados engastados para todos os casos.

Como estas estruturas são de um só nível, a altura mínima livre (pé-direito) é normalmente condicionada pela necessidade de movimentação de cargas, entrada de veículos de transporte, máquinas, etc. adota-se uma altura funcional de 8 metros, representando uma altura condicionada a esbeltez, normalmente as alturas estão entre os 6 m e 12 m.

- **Galpão com treliça triangular (GT)**

O galpão com treliça triangular só pode possuir conexões articuladas, o que resulta em esforços elevados nos banzos junto aos apoios. Entretanto elas são tesouras com menores alturas totais de construção se comparada com as trapezoidais (*de Brito, 2010*). Portanto, a ligação da viga de cobertura com a coluna é flexível, as barras que compõem a treliça têm suas extremidades rotuladas e as colunas são engastadas na base.

Na Figura 4.2 apresentam-se os setes modelos de galpão com treliça triangular estudados. Foram variados os vãos de 15 m a 45 m, com incrementos de 5 m. Analisaram-se, portanto um total de 14 modelos para esta tipologia, incluindo os grupos de espaçamento entre pórticos de 6m e 9m.

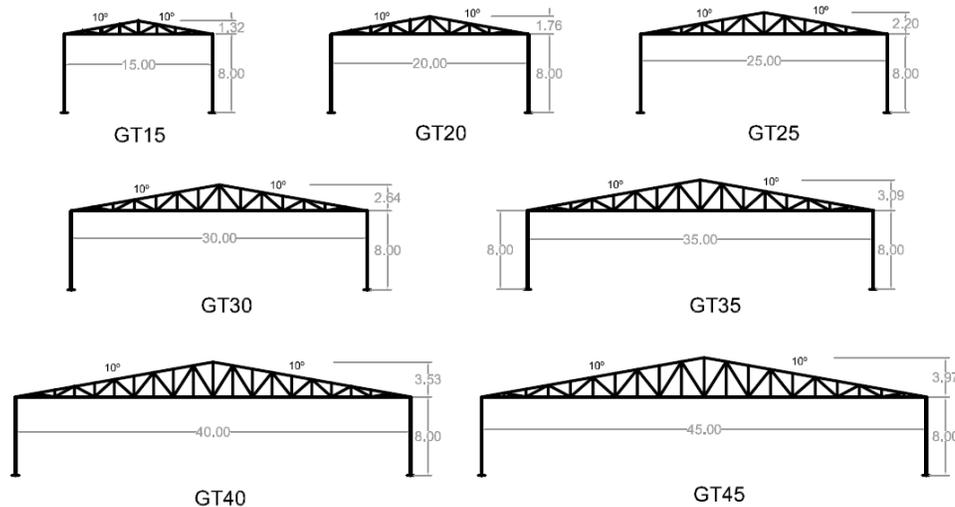


Figura 4.2 – Modelos de pórticos treliçados triangular (GT) com vão de 15 a 45 m.

- **Galpão com treliça de banzos paralelos (GP)**

Para grandes inclinações podem-se usar treliças com banzo inferior não horizontal ou treliças de banzos paralelos. As treliças de banzos paralelos são muito flexíveis e os apoios devem ser rígidos e fixos. A rigidez da estrutura pode ser melhorada com adição de tirantes ligando os apoios. Entretanto esta solução tem o inconveniente do tirante só trabalhar a tração (*de Brito, 2010*).

As colunas são engastadas na base e a ligação dos banzos da treliça com a coluna é rígida. Os elementos das diagonais e montantes são rígidos (por solda) nas suas extremidades.

Na Figura 4.3, mostram-se os sete modelos de pórticos com treliças de banzos paralelos, considerados para o estudo paramétrico. Para espaçamentos entre pórticos de 6 m e 9 m.

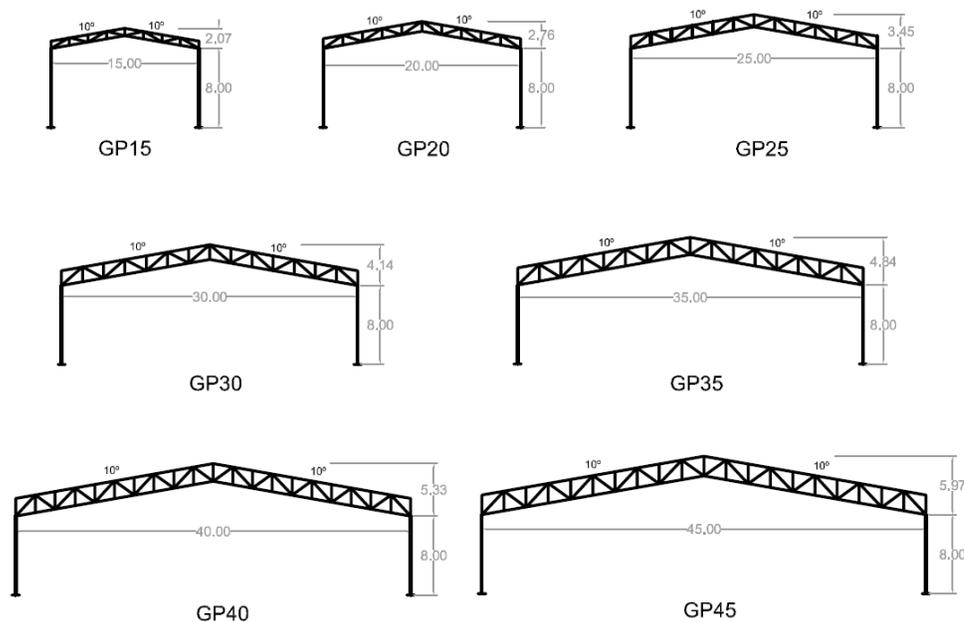


Figura 4.3 – Modelos de pórticos treliçados de banzos paralelos (GP) com vão de 15 a 45 m.

- **Galpão com treliça trapezoidal (GZ)**

Galpões com treliça trapezoidal resultam em uma viga treliçada mais alta que as triangulares e com esforços axiais menores nos banzos (*de Brito, 2010*). Essas estruturas resolvem melhor os detalhes de apoio no que diz respeito ao encaixe das calhas. Podem ser articuladas ou engastadas. A vinculação segue o mesmo princípio adotado nos modelos em pórtico com treliça de banzos paralelos, ou seja, colunas engastadas na base, ligação rígida entre os banzos da treliça e a coluna e extremidades das diagonais e montantes rígidos.

São apresentados na Figura 4.4 os modelos de pórticos trapezoidais, com a mesma variação de vãos dos modelos anteriores.

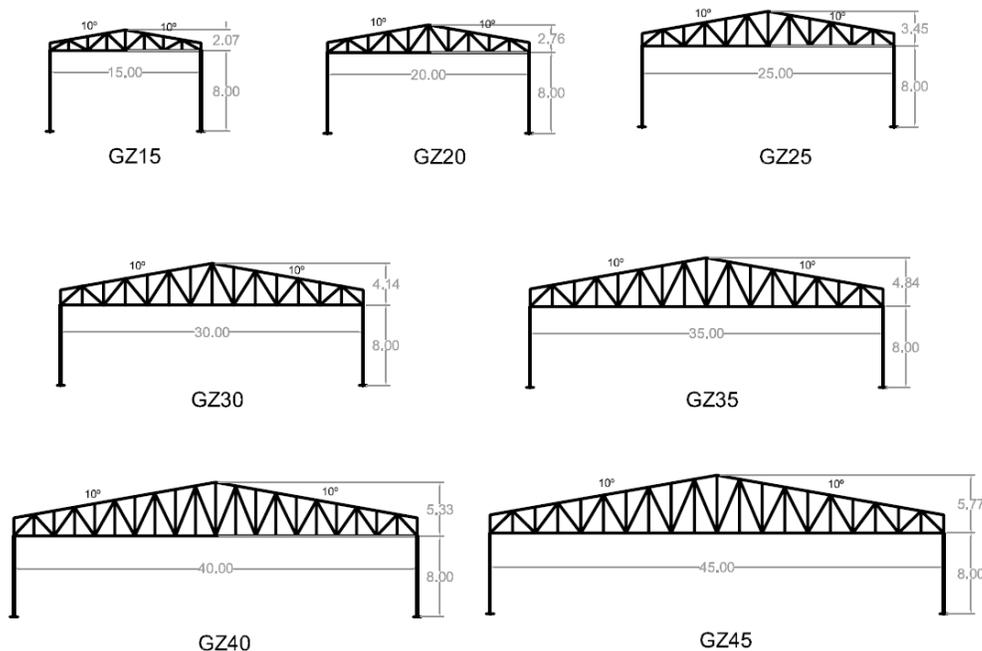


Figura 4.4 – Modelos de pórticos treçados trapezoidais (GZ) com vão de 15 a 45 m.

4.3. Determinação dos tipos de seções

De acordo com os critérios mencionados no capítulo 2 na seção 2.6.3 os tipos de seção determinados para os elementos das treliças, agrupados em banzos, diagonais e montantes, escolhe-se dupla cantoneiras (DL) para os banzos e cantoneira simples (L) para as diagonais e montantes. Para o grupo das colunas opta-se por perfis tipo W.

4.3.1. Tipos de materiais

Para a verificação dos elementos que se segue, o aço utilizado para as cantoneiras, ASTM A36 elementos da treliça de cobertura apresenta $f_y=250MPa$ e $f_u=400MPa$, enquanto que para as seções tipo W das colunas (perfis laminados), o aço utilizado ASTM A-572 Gr50 possui $f_y=345MPa$ e $f_u=450MPa$.

4.4. Indicadores comparativos das tipologias estruturais

A avaliação do desempenho de um sistema estrutural pode ser feita em função de diferentes indicadores. O consumo de aço é o indicador mais utilizado para avaliar o desempenho econômico de um sistema estrutural. O trabalho de *D'Alembert (2012)* desenvolveu um estudo sobre galpões formados por pórticos de alma cheia compostos por perfis laminados que abrange uma variação de vãos livres de 15 a 45 metros, alturas de colunas de 6 a 12 metros, distâncias entre pórticos de 6 a 12 metros e diferentes estágios de ação do vento (Q4, Q5, Q6), sendo os valores de Q estabelecidos para as diferentes velocidades do vento e distância entre pórticos. Os gráficos representam o consumo estimado de aço considerando na quantificação os seguintes elementos: peso dos pórticos, peso das placas de base e de ligação, contraventamentos verticais e horizontais necessários para a estabilização dos pórticos. O peso próprio total dos galpões apresentado não inclui o peso dos elementos de fechamento lateral, usualmente estimado entre 6,00 e 12,00 kg/m² dependendo de cada tipo de projeto de galpão. Mostra-se um gráfico desenvolvido por *D'Alembert (2012)* na Fig.4.5. O gráfico da Figura 4.5 indica a variação do consumo aproximado de aço em função do vão livre para um galpão de alma cheia, de altura de coluna H=9m e distância entre pórticos B=6m para três diferentes estágios de ações do vento Q4, Q5 e Q6.

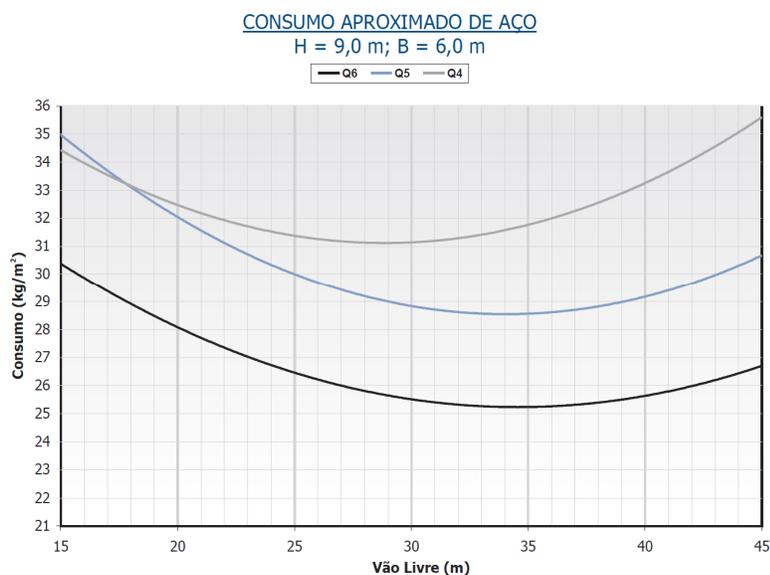


Figura 4.5 – Consumo aproximado de aço para galpão de alma cheia, H=9 m, B=6m para diferentes estágios de ações do vento. D'Alembert (2012).

4.5. Carregamentos atuantes

São apresentadas na sequencia as ações solicitantes das estruturas, agrupadas de acordo com sua variabilidade no tempo. As “ações permanentes” são um conjunto de ações que apresentam valores praticamente constantes durante a vida útil da edificação. Por outro lado, as ações variáveis contemplam o conjunto de ações que apresentam grande variação com o decorrer do tempo.

• Ações permanentes

- *Peso-próprio da estrutura de aço (PERM1)*: valor considerado automaticamente pelo software utilizado para a análise e dimensionamento da estrutura.
- *Carga permanente (PERM2)*: carregamento que envolve o peso de terças, telhas, tirantes, e demais elementos que permanecem fixos a edificação. Valor estimado em $0,25 \text{ kN/m}^2$.
- *Força nocional (Fn)*: aplica-se uma força equivalente igual a 0,3% do valor das cargas gravitacionais de cálculo. Portanto, essa força varia em função de cada galpão como mostra a tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Força nocional

Força nocional (kN)							
espaçamento pórticos	Vão Livre (m)						
	15	20	25	30	35	40	45
B=6	0,27	0,36	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81
B=9	0,41	0,54	0,68	0,81	0,95	1,08	1,22

• Ações de sobrecarga

- *Carga acidental de cobertura ou sobrecarga (SC)*: valor utilizado para levar em conta sobreposições que possam danificar a cobertura. Valor segundo a ABNT NBR 8800/08 é $0,25 \text{ kN/m}^2$.

• Ações do vento

- *Forças devidas ao vento a 0° (VENTO 1)*: valor calculado conforme indicações da ABNT NBR 6123:1988. Para o cálculo da ação do vento, foi utilizado a velocidade básica do vento de 45 m/s, terreno categoria III. O resultado da ação do vento a 0° foi sucção na cobertura.
- *Forças devidas ao vento a 90° (VENTO 2)*: valor calculado adotando-se as mesmas considerações feitas para o vento a 0° . Para o vento a 90° o resultado também foi de sucção na cobertura.

Procedimento determinação da ação do vento ABNT NBR6123/1988

Para construção totalmente fechada, sem aberturas dominantes e com as quatro faces igualmente permeáveis.

Fatores considerados:

1. Velocidade básica do vento:

$V_0 = 45 \text{ m/s}$ (Figura da ABNT NBR 6123:1988)

2. Determinação dos fatores utilizados no cálculo

Fator Topográfico $\rightarrow S_1 = 1$ (terreno fracamente acidentado – item 5.2 da ABNT NBR 6123:1988)

Fator de Rugosidade S_2 para categoria III e Classe B $\rightarrow S_2 = 0,94$

Fator estatístico $\rightarrow S_3 = 0,95$ (Edifícios industriais baixo fator de ocupação– Tabela 3 da ABNT NBR 6123:1988).

Na tabela 1 da ABNT NBR 6123:1988 são mostrados os parâmetros meteorológicos de acordo com a categoria do terreno e a classe da edificação. Para o edifício em estudo os parâmetros são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros meteorológicos

Categoria	Z_g	Parâmetros	Classe B
III	350	b	0,94
		Fr	0,98
		p	0,105

Com uso destes parâmetros, calcula-se S_2 através da equação 4.1:

$$S_2 = bF_r \left(\frac{z}{10}\right)^p = 0,94 \times 0,98 \times \left(\frac{12}{10}\right)^{0,105}$$

$$S_2 = 0,94$$

Sendo Fr o fator de rajada sempre o correspondente a categoria II e z a altura.

3. Cálculo da velocidade característica do vento:

A determinação da velocidade característica do vento é feita pela equação da ABNT NBR 6123:1988. Essa equação é dada por:

$$\rightarrow V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 V_k = 45 \times 1 \times 0,94 \times 0,95 = 40,18 \text{ m/s}$$

Os valores das velocidades características do vento para as faixas de variação de altura são mostradas na tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Valores dos fatores de S_2, V_k e q em função da altura z .

$z(m)$	S_2	$V_k(m/s)$	$q(kN/m^2)$
3,00	0,81	34,63	0,74
6,00	0,87	37,19	0,85
9,00	0,91	38,90	0,93
12,00	0,94	40,19	0,99

4. Cálculo da pressão dinâmica do vento (q)

O valor da pressão dinâmica do vento é determinado pelo 4.2.c da ABNT NBR 6123:1988 a partir da expressão 4.3:

$$q = 0,613V_k^2 \quad (4.3)$$

$$q = 0,613 \times (40,19)^2 = 990 \text{ N/m}^2 = 0,99 \text{ kN/m}^2$$

Assim como S_2 e V_k , pressão dinâmica q também é variável em função da altura. Na Tabela 4.3 são mostrados os valores obtidos para q .

5. Determinação das forças devidas ao vento

Para realizar o estudo paramétrico obtêm-se as forças devidas ao vento, para um caso ($b=35m$) organizam-se logo nas tabelas 4.4 e 4.5 para os demais casos.

- Coeficientes de pressão externa (C_{pe}) para as paredes:

Na Tabela 4 da ABNT NBR 6123/88 são especificados os coeficientes de pressão para diversos tipos de edificação. Para uma edificação retangular, verificam-se a altura (h), a largura (b) e comprimento (a) da edificação. Assim para: $b=35m$ $h=8m$ $a=54m$, temos:

Relação altura/largura:

$$\frac{h}{b} = \frac{8}{35} = 0,23 < \frac{1}{2}$$

Relação comprimento/largura:

$$\frac{a}{b} = \frac{54}{35} = 1,54$$

Com isso tem-se a distribuição para os coeficientes de pressão externos, dos com os comprimentos nas paredes (A_1, B_1) como mostra Figura 4.6 para ventos de 0° e 90° .

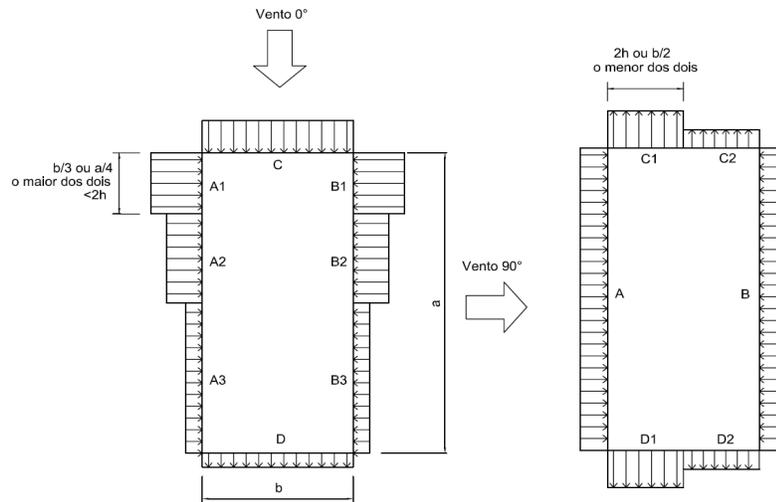


Figura 4.6– Cpe para Paredes - vento a 0° e 90°

Na Figura 4.7 se mostra a distribuição dos coeficientes de pressão externa para o telhado em uma direção do vento. Na tabela 5 da ABNT NBR 6123:1988 são especificados os coeficientes e pressão pra telhados de duas águas simétricas para edificações de planta retangular.

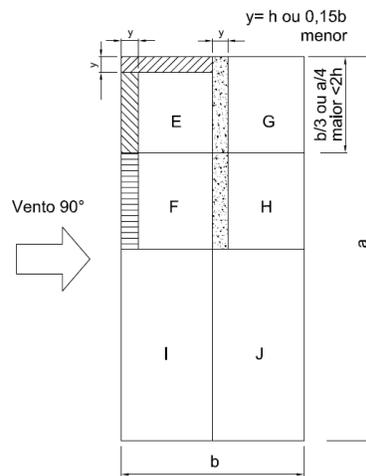


Figura 4.7 – Cpe para telhados - vento a 0° e 90°

- Coeficientes de pressão interna (C_{pi})

O cálculo dos coeficientes de pressão interna é feito de acordo com as indicações do item 6.2 da ABNT NBR 6123/88. Os fechamentos laterais, frontais e a cobertura do galpão são feitos em chapa metálica, portanto permeáveis, de acordo com a norma. A permeabilidade deve-se à presença de aberturas, tais como juntas entre telhas. Para efeitos de simplificação será desprezada a existência de

abertura dominante em qualquer face do galpão e serão adotados os coeficientes previstos no item 6.2.5.a da ABNT NBR 6123/88.

Os coeficientes de pressão interna podem ser obtidos de acordo com o Anexo D da ABNT NBR 6123:1988. Neste caso, foram adotados os seguintes valores:

- vento perpendicular a uma face permeável: $c_{pi} = + 0,2$;
- vento perpendicular a uma face impermeável: $c_{pi} = - 0,3$;

Após o cálculo dos coeficientes de pressão para a edificação, passa-se para as combinações das cargas de vento.

As hipóteses de cálculo a considerar na análise, são os casos de vento 1 (direção 0°) e vento 2 (direção 90°) para os diferentes vãos e espaçamentos entre pórticos considerados. Nas figuras 4.8 e 4.9 mostra-se um exemplo dos carregamentos linearmente distribuídos (kN/m) para os casos de ventos descritos para o pórtico de $L= 35$ m e $B= 6$ m. Valores de sucção do vento (-) e valores pressão do vento (+).

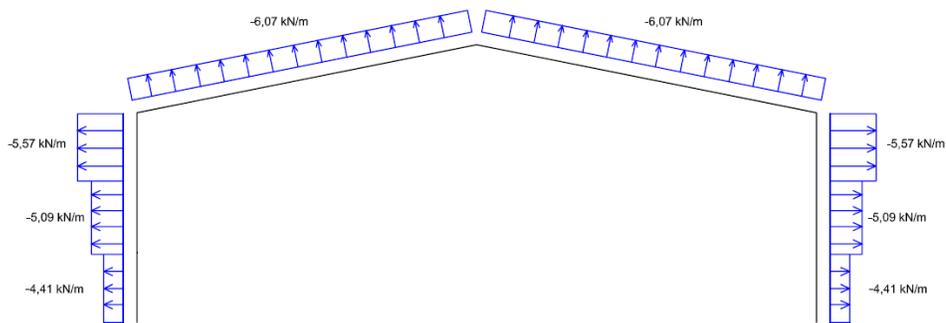


Figura 4.8 – Vento 1 (longitudinal 0°) G15 B6

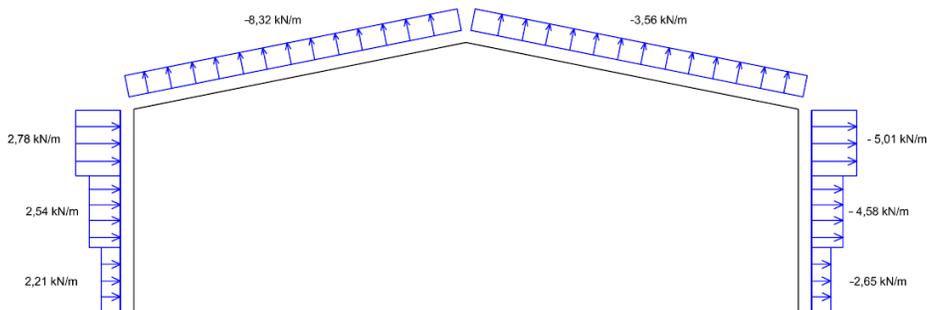


Figura 4.9 – Vento 2 (Transversal) G15 B6

Para as demais dimensões de galpões considerados mostram-se os valores dos carregamentos devidos à ação do vento nos casos analisados nas tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 – Valores cargas devidas ao vento 0° e 90° nos pórticos para B=6

		espaçamento B = 6 m							
Vão Livre	Caso	Coluna 1 (kN/m)			Coluna 2 (kN/m)			Cobertura 1 (kN/m)	Cobertura 2 (kN/m)
		1 a 3m	3 a 6 m	6 a 8 m	1 a 3m	3 a 6 m	6 a 8 m		
L=15m	Vento 0°	-4,85	-5,60	-6,12	-4,85	-5,60	-4,85	-5,94	-5,94
	Vento 90°	2,78	2,54	2,78	-3,53	-4,07	-4,45	-8,32	-3,56
L=20m	Vento 0°	-4,41	-5,09	-5,57	-4,41	-5,09	-5,57	-5,94	-5,94
	Vento 90°	2,78	2,54	2,78	-2,65	-4,58	-5,01	-8,32	-3,56
L=25m	Vento 0°	-4,41	-5,09	-5,57	-4,41	-5,09	-5,57	-5,94	-5,94
	Vento 90°	2,78	2,54	2,78	-2,65	-4,58	-5,01	-8,32	-3,56
L=30m	Vento 0°	-4,41	-5,09	-5,57	-4,41	-5,09	-5,57	-5,94	-5,94
	Vento 90°	2,78	2,54	2,78	-2,65	-4,58	-5,01	-8,32	-3,56
L=35m	Vento 0°	-4,41	-5,09	-5,57	-4,41	-5,09	-5,57	-5,94	-5,94
	Vento 90°	2,78	2,54	2,78	-2,65	-4,58	-5,01	-8,32	-3,56
L=40m	Vento 0°	-4,41	-5,09	-5,57	-4,41	-5,09	-5,57	-6,07	-6,07
	Vento 90°	2,78	2,54	2,78	-2,65	-4,58	-5,01	-8,32	-3,56
L=45m	Vento 0°	-4,41	-5,09	-5,57	-4,41	-5,09	-5,57	-6,07	-6,07
	Vento 90°	2,78	2,54	2,78	-2,65	-4,58	-5,01	-8,32	-3,56

Tabela 4.5 – Valores cargas devidas ao vento 0° e 90° nos pórticos para B=6

		espaçamento B = 9 m							
Vão Livre	Caso	Coluna 1 (kN/m)			Coluna 2 (kN/m)			Cobertura 1 kN/m	Cobertura 2 kN/m
		1 a 3m	3 a 6 m	6 a 8 m	1 a 3m	3 a 6 m	6 a 8 m		
L=15m	Vento 0°	-7,28	-8,39	-9,18	-7,28	-8,39	-9,18	-8,91	-8,91
	Vento 90°	3,31	3,82	4,17	-5,29	-6,11	-6,68	-12,47	-5,35
L=20m	Vento 0°	-6,62	-7,63	-8,35	-6,62	-7,63	-8,35	-8,91	-8,91
	Vento 90°	4,17	3,82	3,31	-4,63	-5,34	-5,84	-12,47	-6,24
L=25m	Vento 0°	-6,62	-7,63	-8,35	-6,62	-7,63	-8,35	-8,91	-8,91
	Vento 90°	4,17	3,82	3,31	-4,63	-5,34	-5,84	-12,47	-6,24
L=30m	Vento 0°	-6,62	-7,63	-8,35	-6,62	-7,63	-8,35	-8,91	-8,91
	Vento 90°	4,17	3,82	3,31	-4,63	-5,34	-5,84	-12,47	-6,24
L=35m	Vento 0°	-6,62	-7,63	-8,35	-6,62	-7,63	-8,35	-9,10	-9,10
	Vento 90°	4,17	3,82	3,31	-4,63	-5,34	-5,84	-12,74	-6,37
L=40m	Vento 0°	-6,62	-7,63	-8,35	-6,62	-7,63	-8,35	-9,10	-9,10
	Vento 90°	4,17	3,82	3,31	-4,63	-5,34	-5,84	-12,74	-6,37
L=45m	Vento 0°	-6,62	-7,63	-8,35	-6,62	-7,63	-8,35	-9,10	-9,10
	Vento 90°	4,17	3,82	3,31	-4,63	-5,34	-5,84	-12,74	-6,37

4.5.1.

Combinações de carregamentos

As combinações de carregamentos aqui apresentadas foram definidas segundo as considerações do item 4.7.7 da ABNT NBR 8800:2008.

- **Combinações de Estados Limites Últimos**

As combinações últimas são utilizadas para a verificação da resistência dos elementos. Essas combinações são definidas com base no item 4.7.7.2 da ABNT

NBR 8800:2008. Para a definição de Ψ_0 para SC1 (sobrecarga de utilização) foi adotado o critério da Tabela 2 da ABNT NBR 8800:2008 de “local sem elevada concentração de pessoas”. As combinações últimas obtidas para a estrutura são:

$$\text{COMB1 (ELU)} = (1,25. \text{PERM1} + 1,50. \text{PERM2}) + 1,50. \text{SC1} + F_n$$

$$\text{COMB2 (ELU)} = (1,00. \text{PERM1} + 1,00. \text{PERM2}) + 1,40. \text{VENTO1}$$

$$\text{COMB3 (ELU)} = (1,00. \text{PERM1} + 1,00. \text{PERM2}) + 1,40. \text{VENTO2}$$

- **Combinações de Estados Limites de Serviços**

As combinações de limites serviço são utilizadas para a verificação da deformação dos da estrutura e são definidas de acordo com o item 4.7.7.3 da ABNT NBR 8800:2008. As mesmas considerações citadas no item 4.5.3.1 da foram feitas para a determinação de Ψ_1 para SC1.

$$\text{COMB1 (ELS)} = (1,00. \text{PERM1} + 1,00. \text{PERM2}) + 0,70. \text{SC1}$$

$$\text{COMB2 (ELS)} = (1,00. \text{PERM1} + 1,00. \text{PERM2}) + 1,0. \text{VENTO1} + 0,70. \text{SC1}$$

$$\text{COMB3 (ELS)} = (1,00. \text{PERM2} + 1,00. \text{PERM2}) + 1,00. \text{VENTO2} + 0,70. \text{SC1}$$

4.5.2. Vinculações dos elementos

Todos os elementos dos pórticos foram assumidos travados na direção fora do plano. Enquanto os elementos longitudinais que interligam esses pórticos são definidos com ligações flexíveis (sem transmissão de momentos) em suas extremidades.

A opção pela vinculação rígida no sentido transversal se dá devido à inexistência nesse sentido de contenções laterais em “X”, “K” ou outra disposição, exigindo que a estabilização da estrutura seja exercida pelos elementos verticais e horizontais que constituem o pórtico. Já para o sentido longitudinal (sentido que apresenta contenções em “X” em alguns vão entre pórticos transversais), a opção pelo uso de vinculação flexível entre os elementos é devida a sua economia e facilidade de execução. *Chamberlain (2013)*.

As condições de vínculos das colunas são; na base do tipo engastado e no topo com a treliça por com uma vinculação rígida (para a treliça triangular

considera-se articulada às colunas), que permite uma transmissão de momentos nos extremos.

4.5.3. Tipos de análises e metodologias

Realiza-se nesta etapa do trabalho o estudo comparativo da aplicação entre os diferentes tipos de análises e metodologias descritos no capítulo anterior:

- Análise de primeira ordem
- Análise de segunda ordem simplificada por Método de Amplificações de Esforços Solicitantes (MAES) NBR 8800:2008.
- Análise de segunda ordem avançada usando o programa *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*.

Avalia-se a aplicação das análises e métodos para as diferentes tipologias de galpões considerados no estudo. Apresenta-se um exemplo completo para o galpão com treliça banzo paralelos de $L= 30$ m e espaçamento $B= 6$ m. Para os outros tipos de treliças os resultados obtidos são apresentados em forma de tabelas.

Primeiramente realiza-se a classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais, seguida da análise de primeira ordem e da análise de segunda ordem através do programa de cálculo *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*. Para efeito de comparação e de validação realizou-se a análise de segunda ordem por meio do MAES, previsto no Anexo D da ABNT NBR8800:2008, que utiliza o valor do coeficiente B_2 para classificação da estrutura. Esse método não requer uma análise de segunda ordem para calcular a relação $\Delta_{2^\circ\text{Ordem}} / \Delta_{1^\circ\text{Ordem}}$. Aqui realiza-se a classificação em função dos dois métodos com auxílio do programa de cálculo para análise de segunda ordem.

Apresentam-se os resultados dos esforços obtidos para cada tipo de análise para as colunas como elementos de comparação para cada tipologia.

a) Método de amplificação de esforços solicitantes (MAES)

Para efetuar uma análise de segunda ordem, a NBR8800:2008 permite ao projetista a realização de uma análise adaptada e propõe, para isso, o Método de Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES). Um caso completo de um pórtico treliçado do galpão de banzos paralelos com vão livre de 30 m é

Perfis adotados:

Treliça: Banzos dupla cantoneira DL 2,5x2,5x0,25;

Diagonais cantoneira L 2,5x2,5x0,25; Montantes cantoneira L 2x2x0,25

Colunas: tipo W 12x45

Combinações de carregamentos:

COMB1 (ELU) = (1,25. PERM1+ 1,50. PERM2) + 1,50.SC1 + Fn

COMB2 (ELU) = (1,00. PERM1+ 1,00. PERM2) + 1,40.VENTO1

COMB3 (ELU) = (1,00. PERM1+ 1,00. PERM2) + 1,40.VENTO2

- Análise Estrutural**

De acordo a o item 4.9.4.5 da ABNT NBR 8800:2008 a classificação da estrutura deve ser obtida para as combinações últimas de ações em que os deslocamentos horizontais provocados pelas forças horizontais tenham os mesmos sentidos dos deslocamentos horizontais decorrentes das forças gravitacionais. Neste estudo esta situação é analisada para cada uma das combinações de carregamentos. Realiza-se para o galpão a classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais, utilizando a relação de deslocamentos do piso relativo à base obtido da análise de segunda ordem (Δ_2) e o obtido na análise de primeira ordem (Δ_1) os resultados são mostrados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Deslocamentos nos nós para análise de primeira e segunda ordem

DESLOCAMENTOS NOS NÓS PARA ANÁLISES DE PRIMEIRA SEGUNDA ORDEM (GBP)									
nós	COMB1			COMB2			COMB3		
	Δ_1 (mm)	Δ_2 (mm)	Δ_1/Δ_2	Δ_1 (mm)	Δ_2 (mm)	Δ_1/Δ_2	Δ_1 (mm)	Δ_2 (mm)	Δ_1/Δ_2
1	54,74	53,33	0,97	68,19	68,75	1,01	128,45	123,94	0,96
2	57,21	56,02	0,98	65,09	65,95	1,01	28,92	37,15	1,28
Média Dislocabilidade									

Utilizando o coeficiente B_2 , também pode ser feita a classificação de maneira aproximada, a tabela 4.7 mostra os valores de B_2 obtidos.

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\Delta_h \sum N_{sd}}{h \sum H_{sd}}}$$

Tabela 4.7 – Cálculo do coeficiente B_2

	Cálculo do Coeficiente B_2							Classificação
	Nós	Rm	H(mm)	Δ_{1h} (mm)	ΣN (kN)	ΣH (kN)	B_2	
COMB1	1	1	8000	54,04	156,02	12,95	1,09	Pequena Deslocabilidade
	2	1	8000	57,88	156,02	13,76	1,09	Pequena Deslocabilidade
COMB2	1	1	8000	68,9	156,02	33,09	1,04	Pequena Deslocabilidade
	2	1	8000	64,42	156,02	33,90	1,04	Pequena Deslocabilidade
COMB3	1	1	8000	128,45	156,02	41,62	1,06	Pequena Deslocabilidade
	2	1	8000	28,25	156,02	6,35	1,11	Média Deslocabilidade

Em função dos valores obtidos nas tabelas 4.6 e 4.7 e as descrições feitas na seção 3.5.1 deste trabalho a estrutura é classificada como de média deslocabilidade. Portanto, os efeitos de imperfeições geométricas iniciais e de material devem ser levados em conta na análise.

1) Análise de primeira ordem

A seguir apresentam-se os diagramas de esforços solicitantes para uma análise de primeira ordem para o pórtico treliçado (estrutura original) considerado para a combinação 1 (COMB1). A análise estrutural desses casos foi realizada no programa *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*.

Diagrama de Esforços Normais 1ª ordem (COMB1)

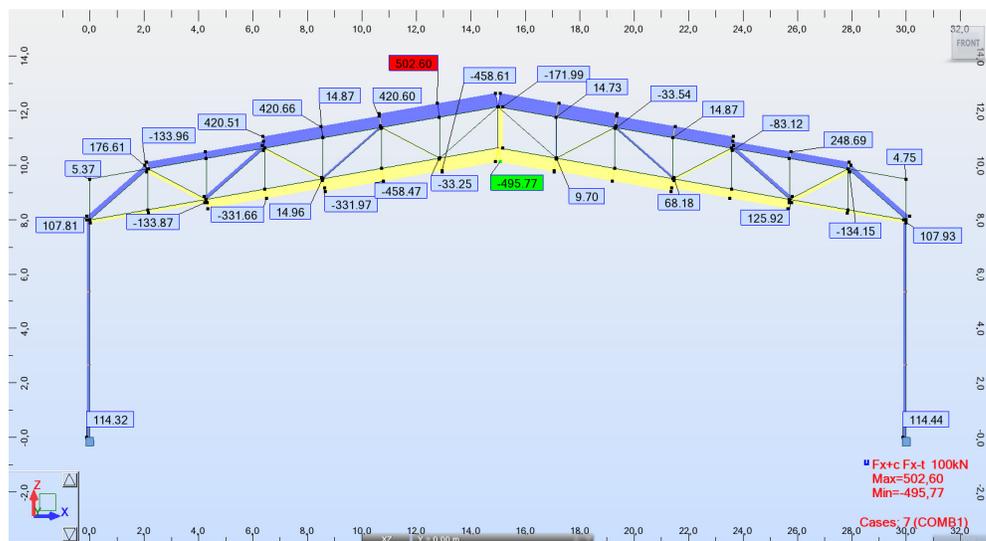


Figura 4.12 – Diagrama de Esforços Normais (kN) 1ª Ordem COMB1

Diagrama de Esforços Cortantes 1ª ordem (COMB1)

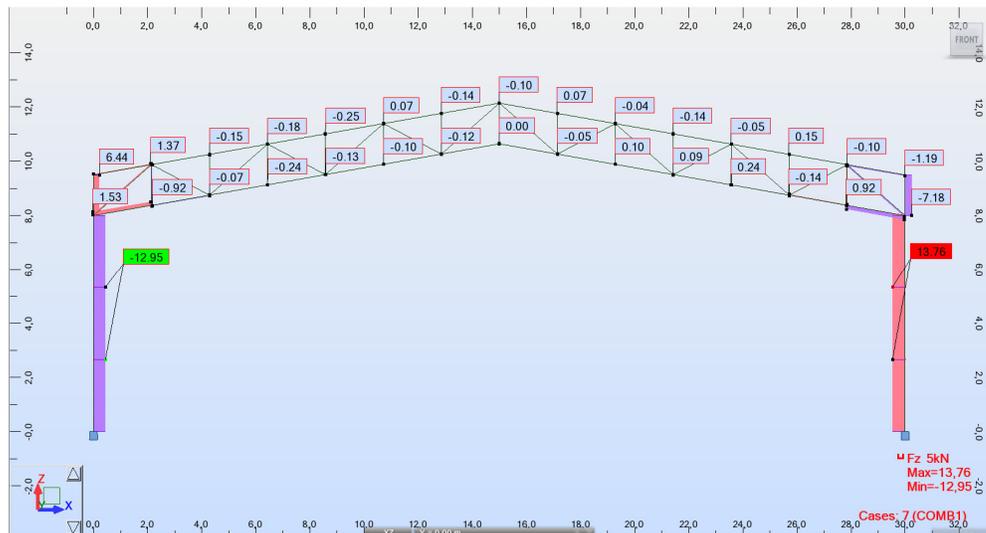


Figura 4.13 – Diagrama de Esforços Cortantes (kN) 1ª Ordem COMB1

Diagrama de Momentos Fletores 1ª ordem (COMB1)

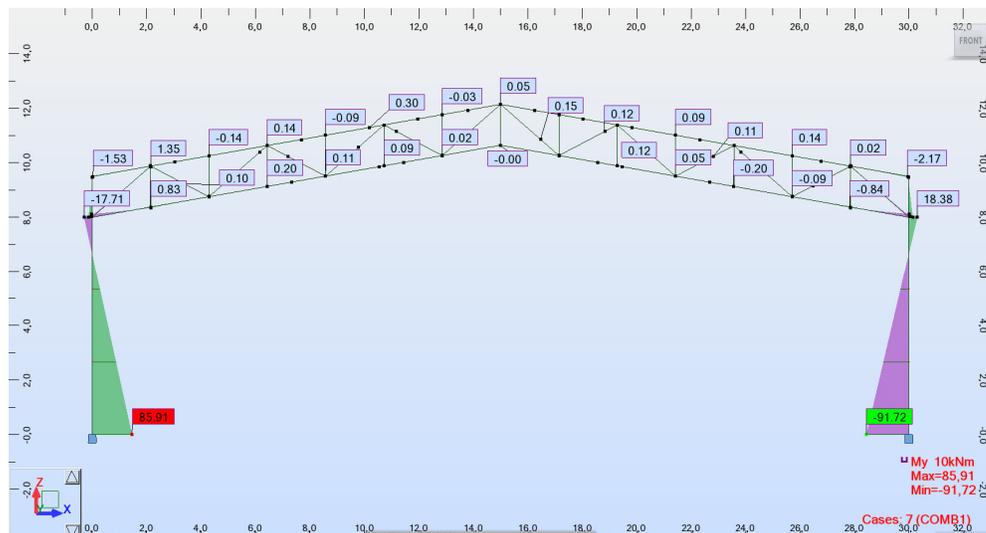


Figura 4.14 – Diagrama de Momentos Fletores (kNm) 1ª Ordem COMB1

2) Análise de segunda ordem

Nessa subseção apresenta-se os resultados obtidos pela análise de segunda ordem de acordo com o MAES ABNT NBR 8800:2008. Primeiramente, mostra-se os modelos das estruturas “nt” e “lt” na Figura 4.15 para análise, de acordo o

Anexo D da ABNT NR8800:2008. A estrutura “nt” é impedida de se deslocar horizontalmente devido a contenção lateral fictícia. A estrutura “It” permite o deslocamento horizontal da estrutura provocados pela aplicação, em sentido contrario, da reação da contenção fictícia, no mesmo ponto onde foi colocada.

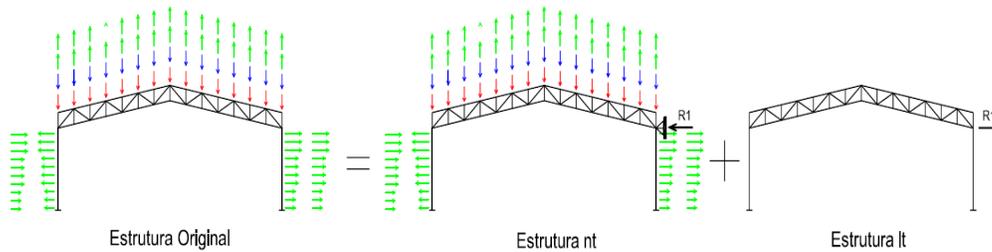


Figura 4.15 – Estruturas para aplicação do MAES

Este método permite que as estruturas “nt” e “It” sejam analisadas em primeira ordem. A seguir são apresentados os diagramas de esforços solicitantes para cada uma das estruturas modeladas no programa de análises estrutural.

- **Esforços Solicitantes Estrutura “nt”**

Diagrama de Esforços Normais “nt” (COMB1)

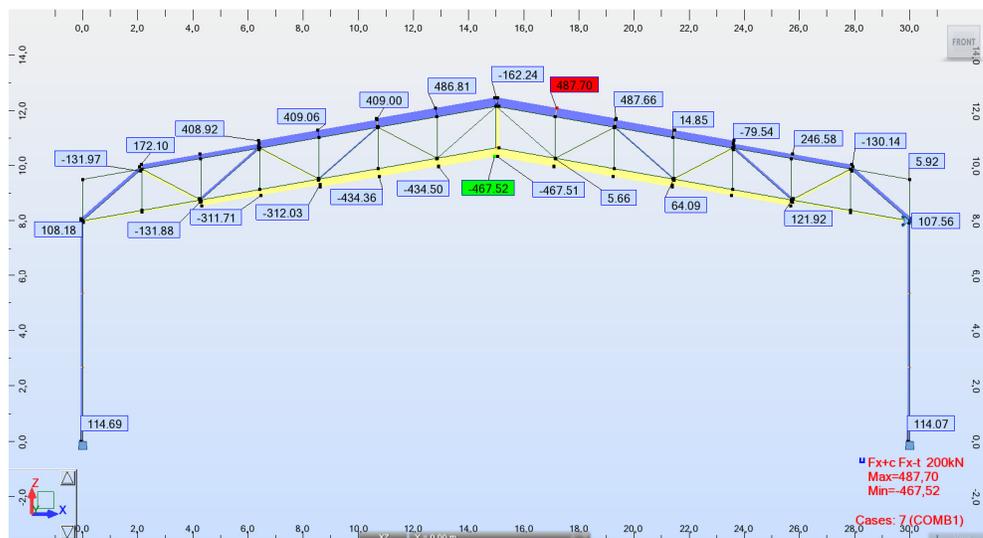


Figura 4.16 – Diagrama de Esforço Normal Estrutura “nt” COMB1

Diagrama de Momento Fletor “nt” (COMB1)

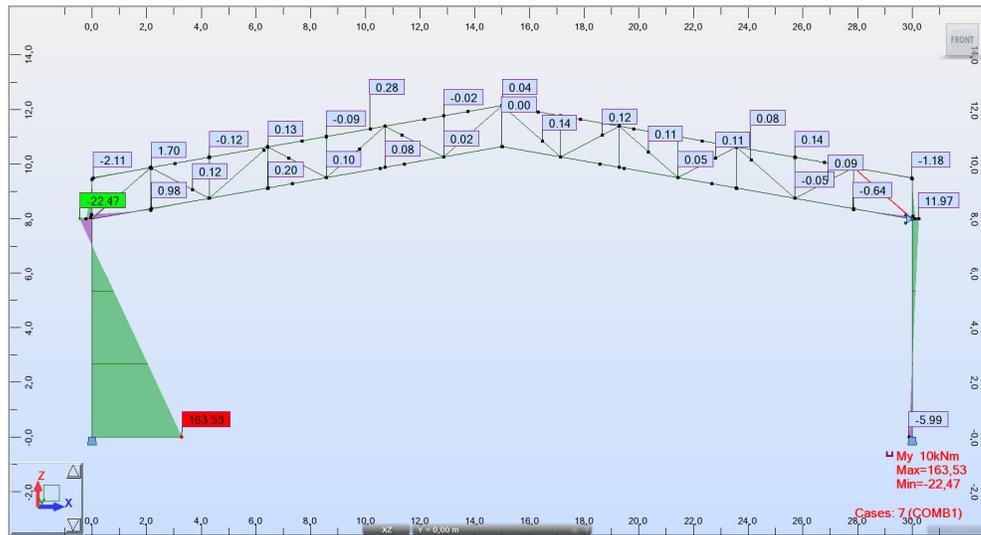


Figura 4.17– Diagrama de Momento Fletor Estrutura “nt” COMB1

- **Esforços Solicitantes Estrutura “It”**

Neste caso o carregamento é aplicado na estrutura no topo da coluna à direita. O valor desse carregamento é igual a o valor da reação da contenção fictícia colocado na estrutura “nt” no mesmo nó, aplicado no sentido contrario. A tabela 4.8 mostra os valores obtidos para cada combinação de carregamento.

Tabela 4.8 – Reações estrutura “nt” para as combinações COMB1, COMB2, COMB3

Reações	R_{Sd1}	R_{Sd2}	R_{Sd3}
nó 2	-21,81	24,28	10,65

Os diagramas de esforços solicitantes para essa estrutura são mostrados nas Figuras 4.18 e 4.19.

Diagrama de Esforços Normais “It” (R_{Sd1} , COMB1)

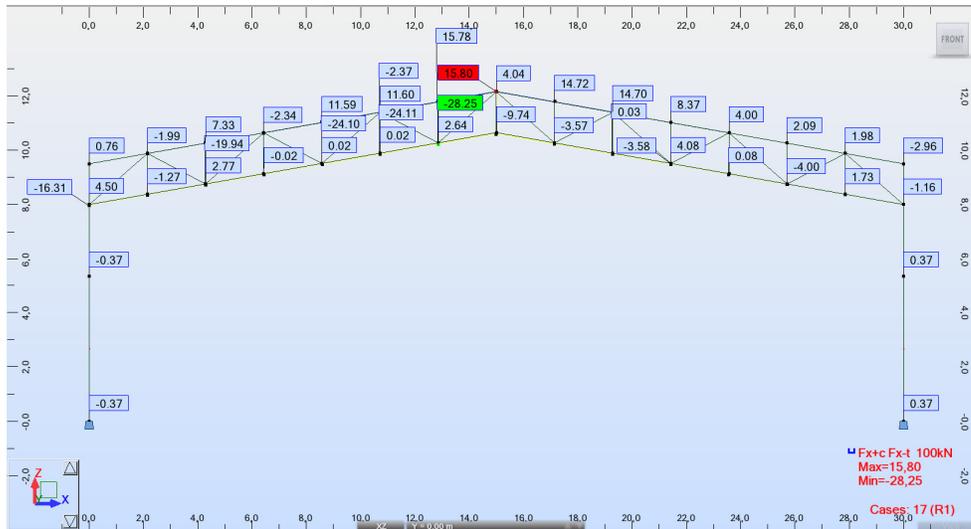


Figura 4.18 – Diagrama de Esforço Normal Estrutura "It" R_{Sd1}

Diagrama de Momento Fletor "It" (R_{Sd1} , COMB1)

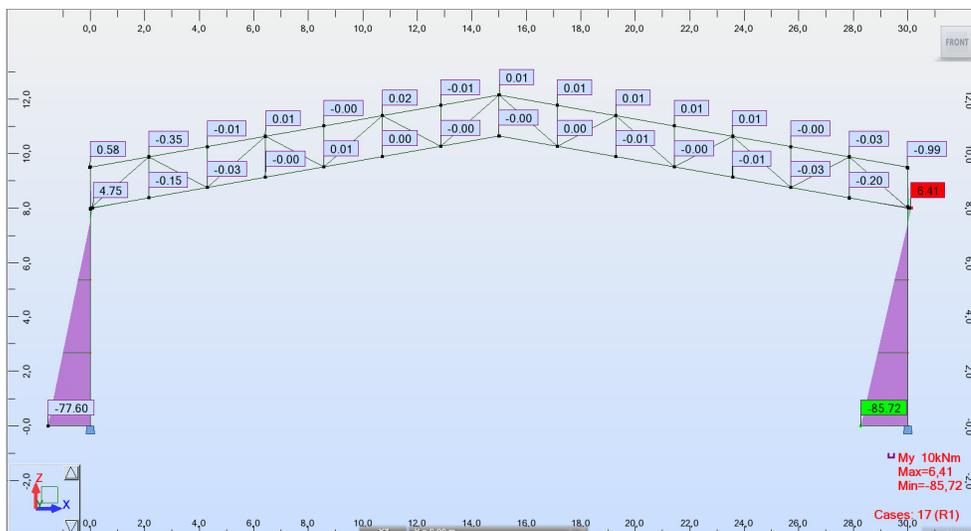


Figura 4.19 – Diagrama de Momento Fletor Estrutura "It" R_{Sd1}

Cálculo dos coeficientes B_1 e B_2

Obteve-se em função das equações apresentadas no item 3.6.1 os valores dos coeficientes B_1 e B_2 para os nós nos topo das colunas nas combinações consideradas (COMB1, COMB2 e COMB3), os resultados são mostrados nas tabelas 4.9 e 4.10.

Tabela 4.9 – Cálculo do coeficiente B_1

Barra	Cálculo do Coeficiente B_1							Combinações
	K	L (cm)	Inercia (cm ⁴)	C_m	N_e (kN)	N_{sd} (kN)	B_1	
Coluna 1	1,00	800	14484,85	1,00	4467,492	114,32	1,03	COMB1
Coluna 2	1,00	800	14484,85	1,00	4467,492	114,44	1,03	
Coluna 1	1,00	800	14484,85	1,00	4467,492	140,21	1,03	COMB2
Coluna 2	1,00	800	14484,85	1,00	4467,492	140,13	1,03	
Coluna 1	1,00	800	14484,85	1,00	4467,492	180,00	1,04	COMB3
Coluna 2	1,00	800	14484,85	1,00	4467,492	118,71	1,03	

Tabela 4.10 – Cálculo do coeficiente B_2

	Cálculo do Coeficiente B_2							Classificação
	Nós	Rm	H(mm)	Δ_{1h} (mm)	ΣN (kN)	ΣH (kN)	B_2	
COMB1	1	1	8000	54,04	156,02	12,95	1,09	Pequena Deslocabilidade
	2	1	8000	57,88	156,02	13,76	1,09	Pequena Deslocabilidade
COMB2	1	1	8000	68,9	156,02	33,09	1,04	Pequena Deslocabilidade
	2	1	8000	64,42	156,02	33,90	1,04	Pequena Deslocabilidade
COMB3	1	1	8000	128,45	156,02	41,62	1,06	Pequena Deslocabilidade
	2	1	8000	28,25	156,02	6,35	1,11	Média Deslocabilidade

Esforços solicitantes obtidos pelo MAES

De acordo com o método da amplificação dos esforços solicitantes (MAES) descrito no item 3.6.1 em cada andar o momento fletor (M_{sd}) e a esforço normal (N_{sd}) solicitantes de cálculo são determinados por:

$$M_{sd} = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt}$$

$$N_{sd} = N_{nt} + B_2 N_{lt}$$

Os resultados dos esforços obtidos pelas equações anteriores serão apresentados junto com os resultados obtidos usando o programa *Robot* na seção 4.5.6 desse trabalho.

b) Análise de segunda ordem efetuado com o programa Robot

A seguir apresentam-se os diagramas de esforços solicitantes para uma análise de segunda ordem para a combinação COMB1 realizada com o programa de cálculo *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*.

Diagrama de Esforços Normais 2ª ordem (COMB1)

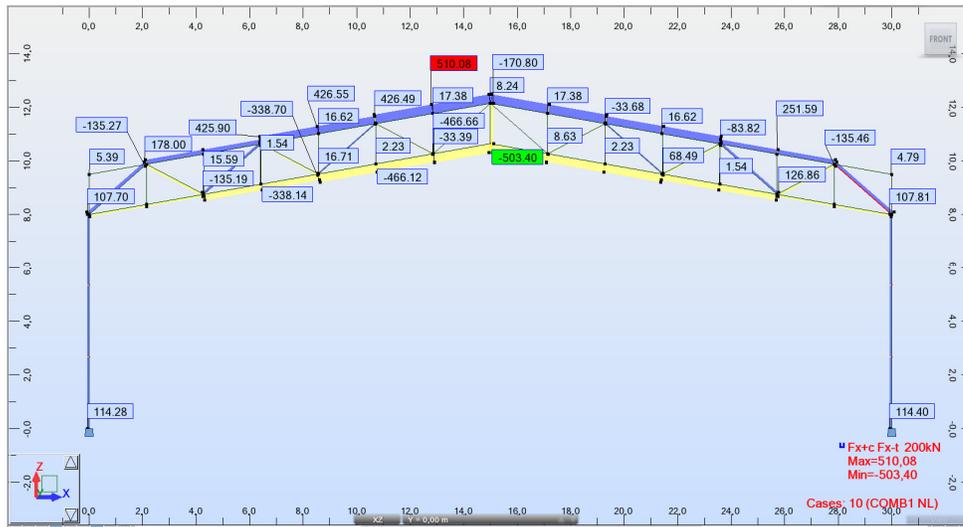


Figura 4.20 – Diagrama de Esforço Normal 2ª Ordem COMB1

Diagrama de Esforços Cortante 2ª ordem (COMB1)

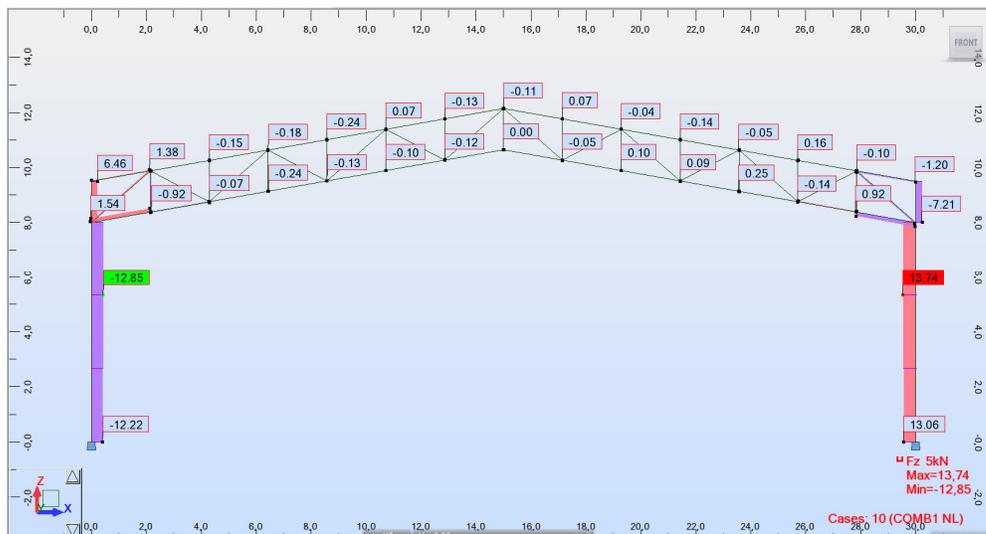


Figura 4.21 – Diagrama de Esforço Cortante 2ª Ordem COMB1

Diagrama de Momento Fletor 2ª ordem (COMB1)

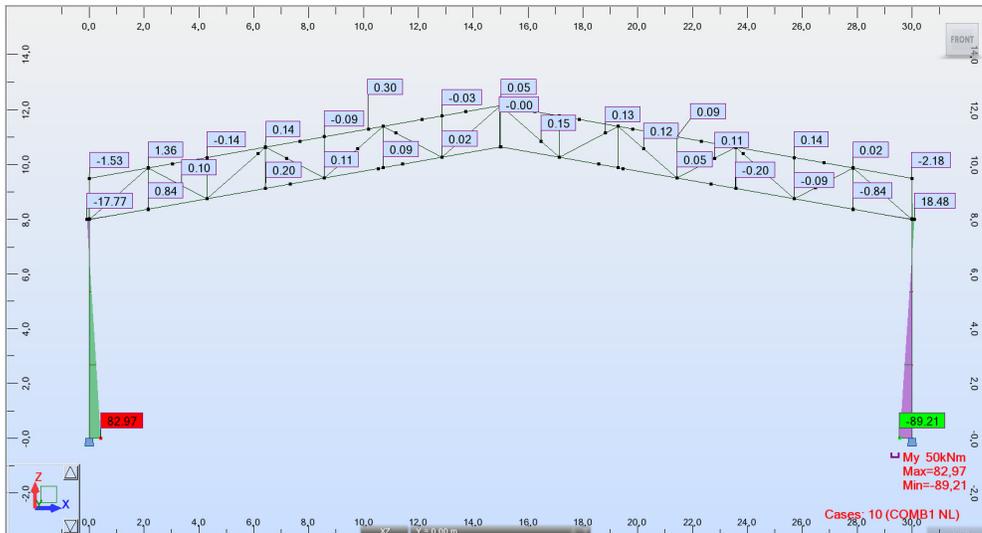


Figura 4.22 – Diagrama de Momento Fletor 2º Ordem COMB1

4.5.4. Comparação entre o método MAES e método avançado

É importante ressaltar que nesta fase o objetivo é avaliar os diferentes métodos de análise estrutural quanto à deslocabilidade lateral e os esforços solicitantes decorrentes. A segurança quanto aos estados limites dos elementos estruturais não é verificada.

Na tabela 4.11 são fornecidos os valores dos esforços resultantes obtidos pelos dois procedimentos de análises de segunda ordem aplicados. Os valores relatados são os dos nós da base das colunas.

Tabela 4.11 – Comparação esforços solicitantes Robot vs. MAES

Esforços	COMB1		COMB2		COMB3	
	Columna 1	Columna 2	Columna 1	Columna 2	Columna 1	Columna 2
GP						
M_{nt}	163,53	-5,99	-114,23	-73,97	-278,38	-48,76
N_{nt}	114,69	114,07	-140,62	-139,71	-180,18	-118,53
M_{lt}	-77,6	-85,72	86,39	95,43	37,89	41,86
N_{lt}	-0,37	0,37	0,41	-0,41	0,18	-0,18
M_{sd} (MAES)	83,85	-99,60	-27,81	23,06	-245,05	3,76
N_{sd} (MAES)	114,29	114,47	-140,19	-140,14	-179,98	-118,73
M_{sd} (Robot)	82,97	-89,21	-30,70	24,83	-236,62	6,23
N_{sd} (Robot)	114,28	114,40	-140,16	-140,08	-180,39	-118,71

Os gráficos das Figuras 4.23 a 4.25 comparam os valores do momento fletor e esforço normal na base das colunas para os três tipos de análises realizados e para cada uma das combinações de carregamentos.

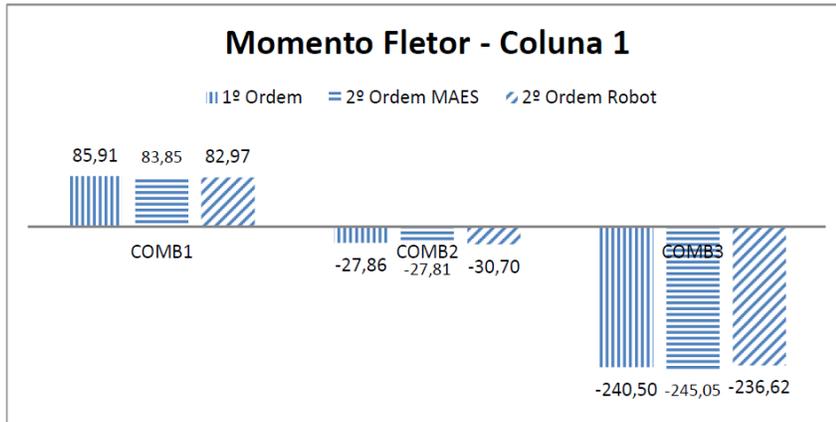


Figura 4.23 – Gráfico de momentos fletores coluna 1 para cada tipo de análise

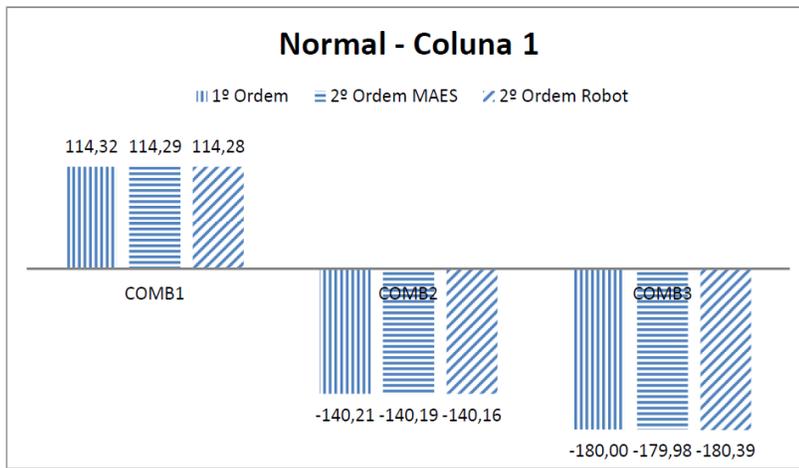


Figura 4.24 – Gráfico de esforços normais coluna 1 para cada tipo de análise

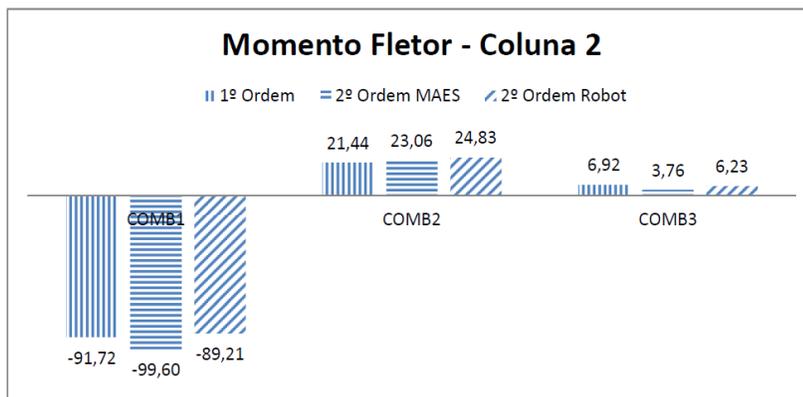


Figura 4.25 – Gráfico de momentos fletores coluna 2 para cada tipo de análise

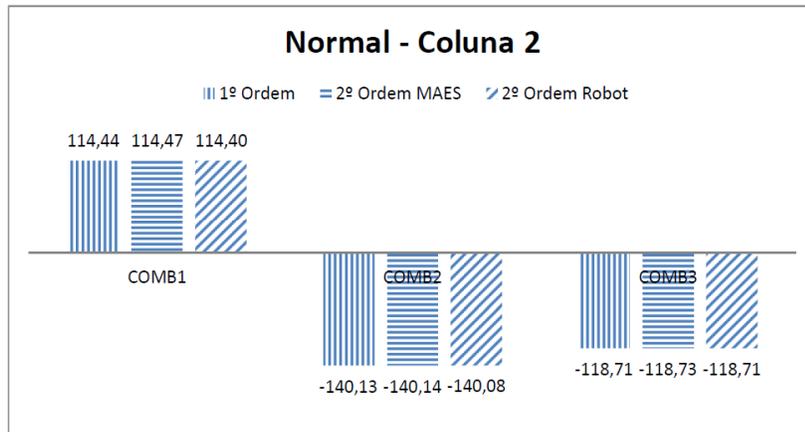


Figura 4.26 – Gráfico de esforços normais coluna 2 para cada tipo de análise

As diferentes análises e a aplicação do método MAES também foram realizadas para as outras tipologias de treliças consideradas neste estudo. A treliça triangular e treliça trapezoidal, Figura 4.27 e Figura 4.28 respectivamente. Para galpões com as mesmas características, i.e, de vão livre 30m e classificados como de média deslocabilidade como mostram as tabelas 4.12 e 4.13.

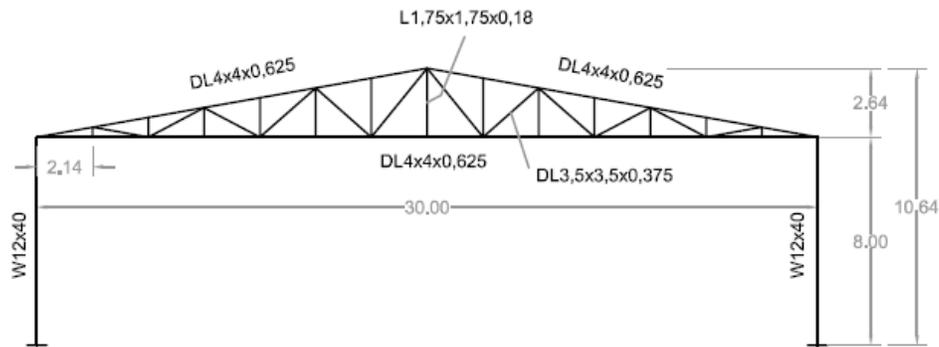


Figura 4.27 – Características do Galpão GT

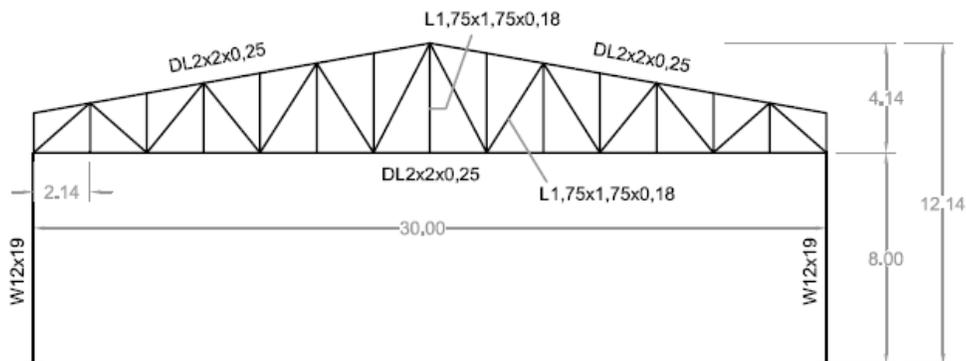


Figura 4.28 – Características do Galpão GZ

Classificação em quanto a sensibilidade aos deslocamentos laterais

Tabela 4.12 – Classificação da estrutura do pórtico GT quanto à sensibilidade lateral

		Cálculo do Coeficiente B_2 Galpão GT							
		Nós	Rm	H(mm)	Δ_{1h} (mm)	ΣN (kN)	ΣH (kN)	B2	Classificação
COMB1	1	1	8000	3,59	176,48	2,74	1,03	Pequena Deslocabilidade	
	2	1	8000	8,74	176,48	2,74	1,08	Pequena Deslocabilidade	
COMB2	1	1	8000	8,88	176,48	1,18	1,20	Média Deslocabilidade	
	2	1	8000	3,73	176,48	1,18	1,07	Pequena Deslocabilidade	
COMB3	1	1	8000	70,12	176,48	17,54	1,10	Pequena Deslocabilidade	
	2	1	8000	55,88	176,48	17,54	1,08	Pequena Deslocabilidade	

Tabela 4.13 – Classificação da estrutura do pórtico GZ quanto à sensibilidade lateral

		Cálculo do Coeficiente B_2 Galpão GZ							
		Nós	Rm	H(mm)	Δ_{1h} (mm)	ΣN (kN)	ΣH (kN)	B2	Classificação
COMB1	1	1	8000	14,85	145,07	3,71	1,08	Pequena Deslocabilidade	
	2	1	8000	26,19	145,07	3,71	1,15	Média Deslocabilidade	
COMB2	1	1	8000	30,23	145,07	2,68	1,26	Média Deslocabilidade	
	2	1	8000	18,89	145,07	2,68	1,15	Média Deslocabilidade	
COMB3	1	1	8000	169,99	145,07	15,60	1,25	Média Deslocabilidade	
	2	1	8000	110,14	145,07	15,60	1,15	Média Deslocabilidade	

Apresentam-se a seguir as Tabelas 4.14 e 4.15 comparativas dos esforços obtidos nas análises de segunda ordem através do programa Robot e o MAES para estas tipologias de galpões. Como anteriormente, consideram-se os esforços nas bases das colunas.

Tabela 4.14 – Comparação esforços solicitantes Robot vs. MAES. Galpão GT

Esforços	COMB1		COMB2		COMB3	
	Columna 1	Columna 2	Columna 1	Columna 2	Columna 1	Columna 2
GT						
M_{nt}	15,46	0	66,39	-82,23	-59,32	-57,53
N_{nt}	127,17	127,17	-129,94	-129,94	-170,46	-107,79
M_{lt}	-10,94	-10,98	4,67	4,69	-70,03	-70,19
N_{lt}	0	0	0	0	0	0
M_{sd} (MAES)	4,66	-11,86	73,99	-79,68	-139,32	-135,06
N_{sd} (MAES)	127,17	127,17	-129,94	-129,94	-170,46	-107,79
M_{sd} (Robot)	3,67	-10,86	70,85	-76,71	-121,80	-118,92
N_{sd} (Robot)	127,17	127,17	-129,93	-129,93	-170,55	-107,92

Tabela 4.15– Comparação esforços solicitantes Robot vs. MAES. Galpão GZ

Esforços	COMB1		COMB2		COMB3	
	Columna 1	Columna 2	Columna 1	Columna 2	Columna 1	Columna 2
GZ						
M_{nt}	23,2	-1,04	53,85	-80,18	-76,17	-55,63
N_{nt}	107,57	107,5	-145,68	-145,6	-185,13	-124,53
M_{lt}	-14,05	-14,29	10,15	10,33	-59,06	-60,1
N_{lt}	-0,04	0,04	0,03	0,03	-0,19	0,19
M_{sd} (MAES)	8,49	-17,49	68,25	-70,71	-153,04	-125,86
N_{sd} (MAES)	107,53	107,55	-145,64	-145,57	-185,37	-124,31
M_{sd} (Robot)	7,78	-15,42	61,14	-66,11	-120,40	-97,18
N_{sd} (Robot)	107,53	107,55	-145,75	-145,75	-185,61	-124,62

Em função dos resultados obtidos em cada uma das tipologias consideradas, pode-se observar que os resultados decorrentes da aplicação da metodologia simplificada para análise de segunda ordem foram bastante satisfatórios em comparação com os valores obtidos por meio da análise avançada considerando a proximidade entre os valores dos esforços solicitantes de momentos fletores e normais. Portanto, conclui-se que os resultados obtidos através do programa Robot e o método simplificado MAES proposto pela norma NBR8800:2008 são consistentes e válidos. Portanto, a validação dos efeitos de segunda ordem nos modelos analisados para o estudo paramétrico são realizados no programa Robot.

4.5.5. Estudo de Caso

Realiza-se a análise estrutural para um modelo de galpão considerando as imperfeições geométricas e os efeitos de segunda ordem globais para obtenção de esforços. Foram realizadas as verificações de segurança e resistência com recurso do módulo *Steel/Aluminum Design* do programa de cálculo automático *Autodesk Robot Structural Analysis Professional* validados por as formulações analíticas da norma NBR8800:2008. Para assegurar assim as verificações de resistência e estabilidade dos elementos que serão apresentadas nesta seção.

Utiliza-se como exemplo das análises que são realizadas no estudo paramétrico, através de um modelo de galpão com treliça de banzos paralelos com vão livre de 25 metros e distância entre pórticos de 6m, que é denominado aqui como GP25 B6.

Os elementos das treliças são compostos por: banzos superiores e inferiores por perfis formados por dupla cantoneiras laminadas, as diagonais e montantes por cantoneira simples, com valores de tensão de fluência e ruptura de $f_y=250Mpa$ e $f_u=400Mpa$, respectivamente. As colunas são compostas por perfis tipo W laminado com valores de $f_y=345Mpa$ e $f_u=450Mpa$.

Treliça de Banzo Paralelo GP25 B6

GP= Galpão Treliça Banzo Paralelo; vão = 25 m; B = Espaçamento= 6m

A seguir a Figura 4.29 mostra a geometria em geral e os grupos de seções dos elementos do pórtico principal do galpão considerado para o estudo. As Figuras 4.30 e 4.31 ilustram alguns dos carregamentos considerados.

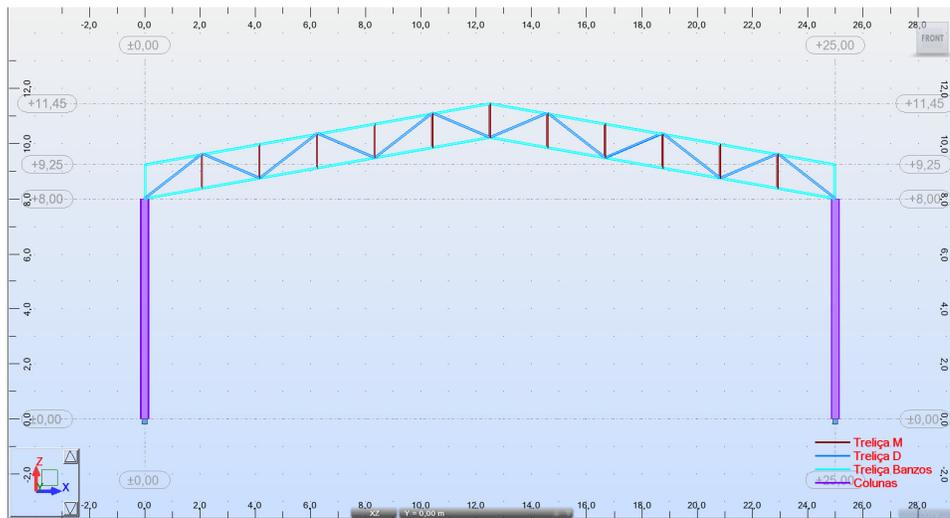


Figura 4.29 – Geometria e grupos de seções dos elementos do Pórtico GP25 B6

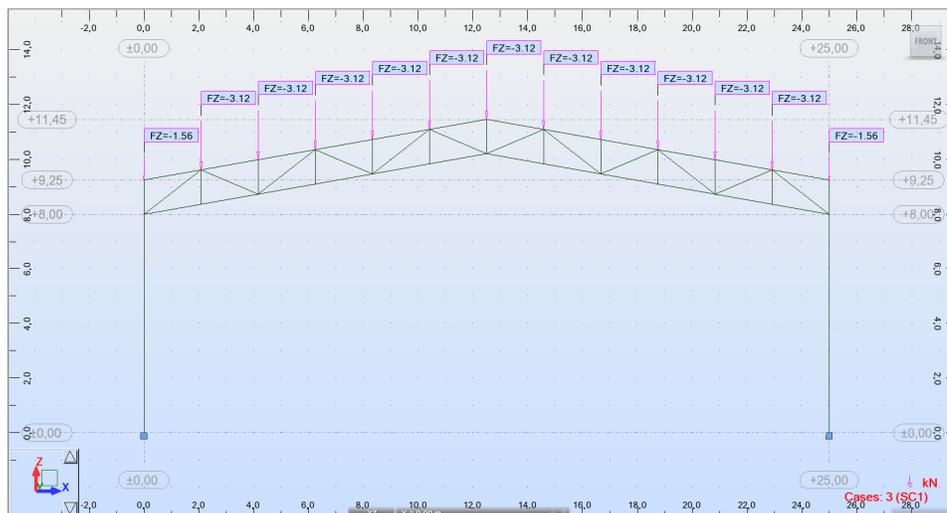


Figura 4.30 – Cargas devidas Sobrecarga de uso SC1 GP25 B6

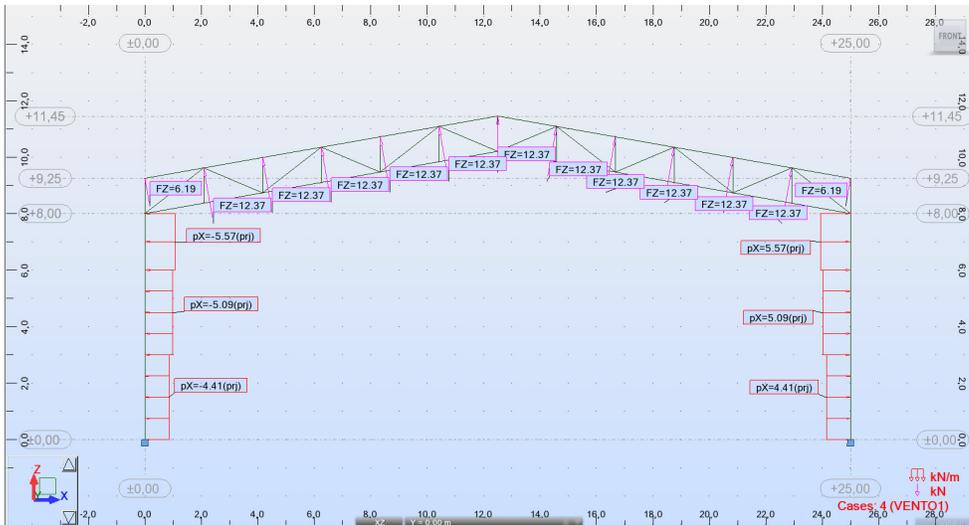


Figura 4.31 – Cargas devidas ao VENTO1 (0° Longitudinal) GP25 B6

Obtiveram-se, para as combinações correspondentes aos estados limites últimos ELU (COMB1, COMB2 e COMB3), os esforços solicitantes nas treliças, com valores máximos de tração e compressão, e nas colunas os esforços máximos normais, cortantes e momentos fletores, que serão utilizados no dimensionamento dos elementos. As figuras 4.32 e 4.33 ilustram os diagramas dos esforços solicitantes.

Observam-se os momentos praticamente nulos nos elementos da treliça e o momento no topo da coluna evidenciando a vinculação rígida da cobertura-coluna.

Diagramas de Esforços Normais (COMB 1)

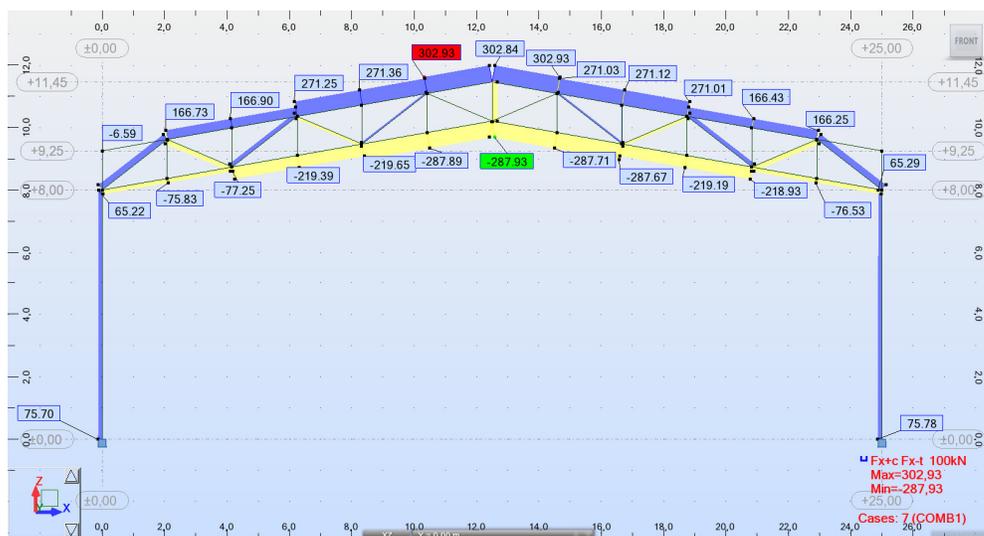


Figura 4.32 – Diagrama de esforços normais COMB1 (ELU) – GP25 B6

Diagramas de Momentos Fletores (COMB 1)

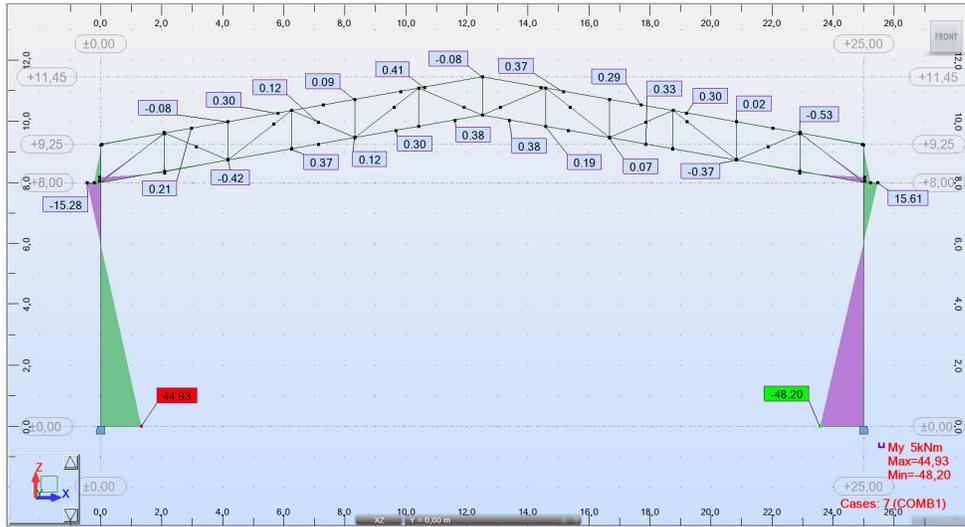


Figura 4.33– Diagrama Momentos Fletores COMB1 (ELU) - GP25 B6

Envoltórias de esforços para combinações

As verificações de elementos da estrutura são realizadas considerando a envoltória dos esforços de combinações de COMB1 a COMB3 (Figura 4.34); ou seja, os elementos serão verificados para os máximos esforços solicitantes gerados pelas combinações últimas.

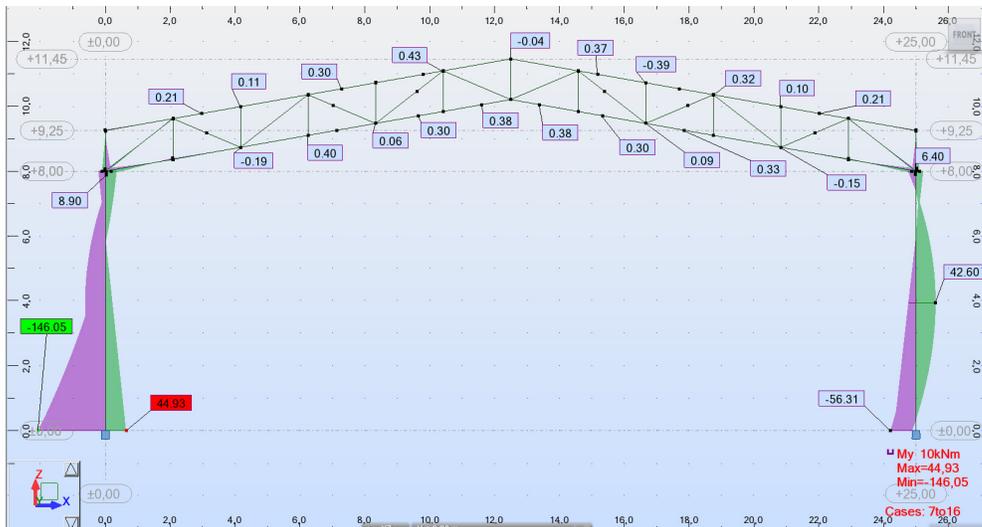


Figura 4.34– Diagrama de Envoltória Momentos Fletores - GP15 B6

4.5.6. Dimensionamento pelo programa Robot Structural Analysis

O dimensionamento das seções como descrito anteriormente, foi realizado através do módulo integrado *Steel /Aluminium Design*, que permite obter as seções otimizadas que cumprem com os critérios estruturais solicitações/resistência impostos. O cálculo dos pórticos foi realizado escolhendo a norma ANSI/AISC 360-05 disponível no programa Robot com algumas adaptações que o programa permite para requisitos inerentes à norma brasileira NBR8800:2008. Esses resultados foram validados através da comparação com o procedimento analítico de cálculo para os elementos sujeitos à compressão e a tração (treliças) e os elementos flexão-compressão (colunas) segundo as formulações da norma NBR 8800:2008. Esses procedimentos são apresentados no Apêndice A.

No exemplo apresentado na seção a) e b) mostram-se a verificações das seções adotadas para os ELS e ELU, respectivamente feitas no programa Robot. Para cada grupo de barra (banzos, diagonais, montantes e colunas). Detalham-se as verificações para o elemento banzo da treliça identificado como a barra mais solicitada do grupo dos banzos (Figura 4.37). Esta barra apresenta uma relação solicitação/resistência $N_d/R_d=0,87$ para a combinação crítica de ações COMB3 (ELU). Desenvolve-se também este procedimento para um elemento de coluna.

a) Verificações de estabilidade

Seguindo o procedimento recomendado para as verificações, começa-se avaliando o estado limite de serviço (ELS) da estrutura, ou seja, avaliando os deslocamentos dos elementos. Os deslocamentos deverão obedecer aos seguintes limites normativos da NBR 8800:2008 descrito na seção 3.7 deste trabalho. Deslocamentos máximos verticais ($L/250$) e deslocamentos máximos horizontais ($H/300$), sendo L e H, o vão livre de galpão e a altura total das colunas, respectivamente. A figura 4.35 ilustra a deformada da estrutura e os valores dos deslocamentos para a combinação de carregamento considerada. A figura 4.36 mostra a verificação do perfil W12x72 da coluna para o Estado limite de Serviço (ELS).

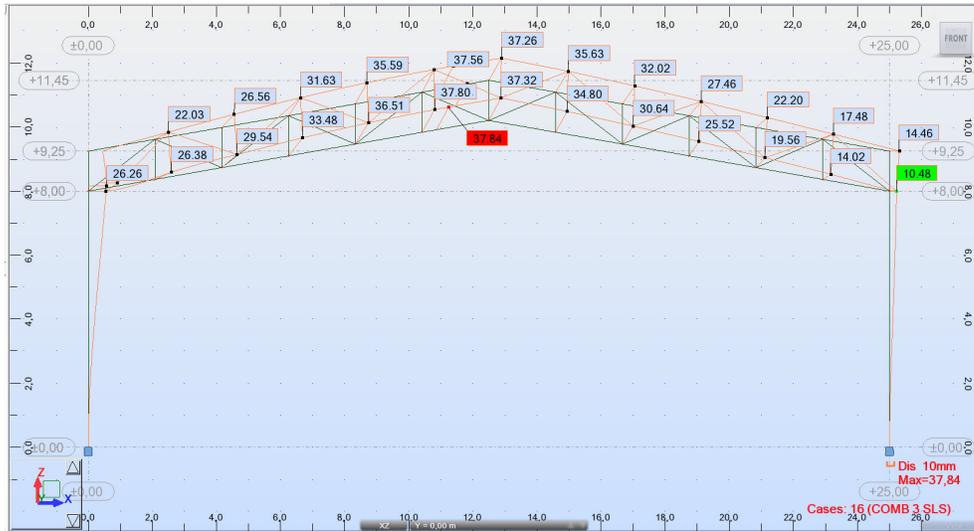


Figura 4.35 – Deformada do Pórtico.

Peça	Perfil	Material	Ratio(uy)	Caso (uy)	Ratio(uz)	Caso (uz)	Ratio(vx)
3 Barra_3	W 12x72	AÇO W	0.00	14 COMB 1 SLS	0.12	16 COMB 3 SLS	0.98

Figura 4.36 – Deslocamento Horizontal do Pórtico.

A Tabela 4.16 mostra valores dos deslocamentos verticais e horizontais nos nós para a combinação de carregamentos de estado limite de serviço considerado.

Tabela 4.16 – Deslocamentos horizontais UX e verticais UY do pórtico

Nó/Caso	UX (mm)	UZ (mm)	RY (Rad)
3/ 16 (C)	0,0	0,0	0,0
1/ 16 (C)	0,0	0,0	0,0
4/ 16 (C)	10,48	0,04	0,001
19/ 16 (C)	14,46	0,04	0,004
2/ 16 (C)	26,26	0,12	0,004
31/ 16 (C)	21,22	0,13	-0,007
18/ 16 (C)	11,85	7,50	0,004
20/ 16 (C)	15,78	7,51	0,004
6/ 16 (C)	24,23	10,44	-0,007
30/ 16 (C)	19,38	10,48	-0,005
17/ 16 (C)	13,14	14,49	0,003
21/ 16 (C)	16,80	14,50	0,003
7/ 16 (C)	22,47	19,18	-0,003
29/ 16 (C)	18,27	19,27	-0,004
16/ 16 (C)	14,54	20,97	0,003
22/ 16 (C)	17,72	20,97	0,003
15/ 16 (C)	15,74	26,29	0,002
23/ 16 (C)	18,25	26,30	0,002
8/ 16 (C)	20,65	26,35	-0,003
28/ 16 (C)	17,49	26,35	-0,003
14/ 16 (C)	16,90	30,41	0,002
24/ 16 (C)	18,56	30,42	0,001
11/ 16 (C)	19,28	31,00	-0,002
27/ 16 (C)	17,31	31,09	-0,002
25/ 16 (C)	18,33	32,44	0,001
13/ 16 (C)	17,77	32,82	0,001
12/ 16 (C)	18,32	33,06	-0,001
26/ 16 (C)	17,63	33,06	-0,000

Observa-se na Tabela 4.17 que os valores de deslocamentos obtidos (δ) para os estados limites de serviço (ELS) satisfazem com os valores máximos ($\delta_{\text{máx}}$) permitidos pela norma.

Tabela 4.17 – Limites de deformação para os elementos da estrutura

	TRELIÇA	COLUNAS
Relação	L/250	L/300
Dimensão (m)	25	8
δ (mm)	33,06	26,26
$\delta_{\text{máx}}$ (mm)	100	26,67

b) Verificações de resistência

Se as seções escolhidas tenham sido aprovadas nos critérios de deslocamentos, resta verificar se elas atendem aos critérios de resistência (ELU). Essa verificação é feita comparando a combinação entre esforços solicitantes obtidos da análise estrutural com os resistentes calculados. A Figura 4.37, por exemplo, ilustra o diagrama de envoltória da barra do banzo mais solicitado, que determina o dimensionamento desse grupo de barra.

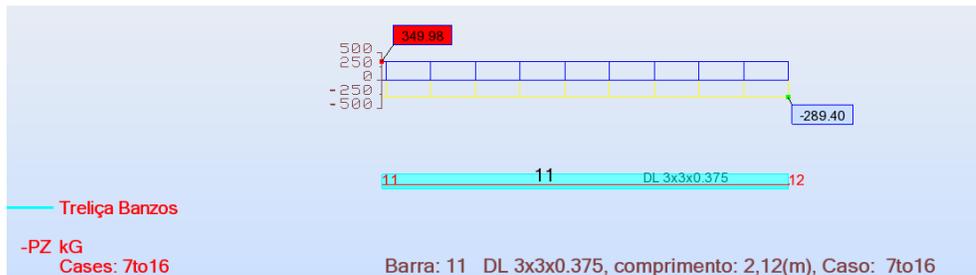


Figura 4.37 – Diagrama de envoltória de esforços normais no banzo mais solicitado.

Para cada um dos grupos de elementos estruturais do pórtico (banzos, diagonais, montantes e colunas) o programa realiza a verificação do perfil (Figura 4.38) indicando OK se corresponde ao perfil correto.

Peça	Perfil	Material	Lay	Laz	Solicita	Caso
Família : 1 Trelças Banzos						
11 Trelça Banzo	DL 3x3x0.375	AÇO TRELIÇ	91.45	65.56	0.87	9 COMB3
Família : 2 Trelças D						
45 Trelça D_45	L 3x3x0.3125	AÇO TRELIÇ	113.11	113.11	0.88	7 COMB1
Família : 3 Trelças M						
51 Trelça M_51	L 2x2x0.3125	AÇO TRELIÇ	82.02	82.02	0.93	9 COMB3
Família : 4 Colunas						
3 Barra_3	W 12x72	AÇO W	59.21	103.60	0.05	9 COMB3

ANSI/AISC 360-05 - Verificação dos grupos de barras (ELU) 1to4

Resultados Mensagens

Calc. Note Close Help

Ratio Analysis Map

Calculation points
Division: n = 3
Extremes: none
Additional: none

Figura 4.38– Verificações da seções do pórtico para estados limite últimos (ELU).

Notas de Cálculo:

O programa Robot também permite obter a nota de cálculo que mostra em forma detalhada os parâmetros da seção, as solicitações, as resistências e as verificações realizadas. Como exemplo mostra-se a nota de cálculo gerada para o elemento de banzo considerado (Figura 4.39).

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2013 Autor: Morada:	Ficheiro: GP 25 B6.rtd Projecto: GP 25 B6
---	--

CÁLCULOS DE ESTRUCTURAS DE AÇO

NORMA: *ANSI/AISC 360-05 An American National Standard, March 9,2005*
TIPO DE ANÁLISE: Dimensionamento dos grupos de barras

GRUPO: 1 Trelças Banzos
BARRA: 11 Trelça Banzos_11 **PONTO:** 1 **COORDENADA:** x = 0.00 L = 0.00 m

CARGAS:
*Caso de carga dimensionante: 9 COMB3 (1+2+6)*1.00+5*1.40*

MATERIAL:
 AÇO TRELIÇA $F_y = 250.00$ MPa $F_u = 400.00$ MPa $E = 210000.00$ MPa



PARÂMETROS DA SECÇÃO: DL 3x3x0.375

d=7.6 cm	Ay=14.52 cm ²	Az=14.52 cm ²	Ax=27.23 cm ²
b=15.2 cm	Iy=145.68 cm ⁴	Iz=283.45 cm ⁴	J=8.41 cm ⁴
tw=1.0 cm	Sy=27.15 cm ³	Sz=37.20 cm ³	
tf=1.0 cm	Zy=48.67 cm ³	Zz=61.12 cm ³	

PARÂMETROS DA BARRA :





Ly = 2.12 m	Lz = 2.12 m
Ky = 1.00	Kz = 1.00
KLy/ry = 91.45	KLz/rz = 65.56

FORÇAS INTERNAS:
Pr = 349.98 kN
Vrz = -0.21 kN

RESISTÊNCIAS NOMINAIS:
Fic*Pn = 401.59 kN
Fiv*Vnz = 195.97 kN

COEFICIENTES DE SEGURANÇA
Fic = 0.90 Fiv = 0.90

ELEMENTOS DA SECÇÃO:
UNS = Compacto STI = Compacto

FÓRMULA DE VERIFICAÇÃO:
Pr/(Fic*Pn) = 0.87 < 1.00 LRFD (H1-1a) Verificado
Vrz/(Fiv*Vnz) = 0.00 < 1.00 LRFD (G2-1) Verificado
Ky*Ly/ry = 91.45 < (K*L/r),max = 200.00 Kz*Lz/rz = 65.56 < (K*L/r),max = 200.00 ESTÁVEL

Perfil correto!!!

Figura 4.39 – Nota de cálculo ELU do elemento banzo da treliça do galpão GP25B6

- **Elementos da treliça de cobertura**

Cada elemento da treliça esta sujeito a um esforço normal de tração ou de compressão. O dimensionamento dessas barras se faz com os critérios de barras tracionadas ou barras comprimidas da norma NBR 8800:2008. O dimensionamento dos elementos comprimidos pode ser feito tomando-se $K=1$, tanto para flambagem no plano da treliça quanto fora desse plano em função do descrito na seção 2.7 deste trabalho.

As verificações das seções adotadas através das formulações são realizadas por tipo de elementos de treliças: banzos superiores e inferiores, diagonais e montantes são mostradas em forma detalhada no Apêndice A.

- ✓ **Seções transversais adotadas**

As figuras 4.40 a 4.42 ilustram as seções adotadas no programa de dimensionamento para cada grupo de barras consideradas.

Banzos Superiores e inferiores

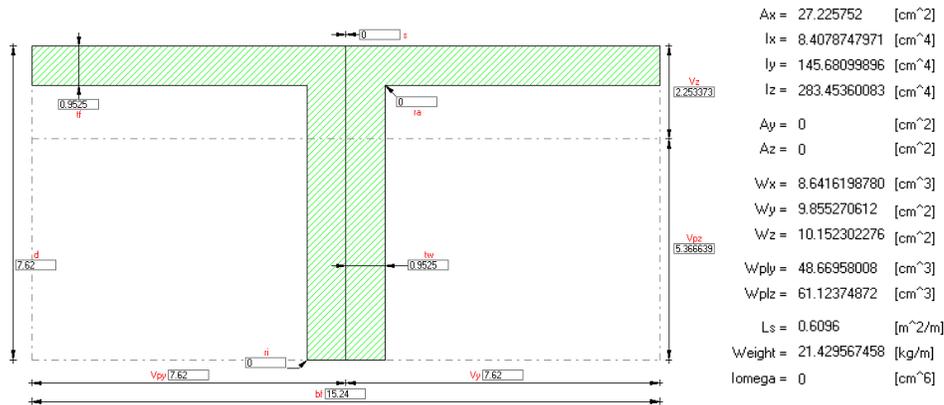


Figura 4.40– Seção dupla cantoneira L 3x3x0,375

Diagonais

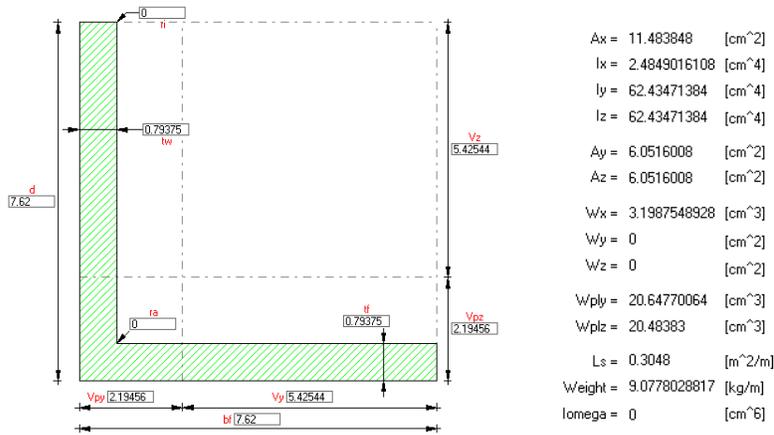


Figura 4.41 – Seção cantoneira L 3x3x0,3125

Montantes

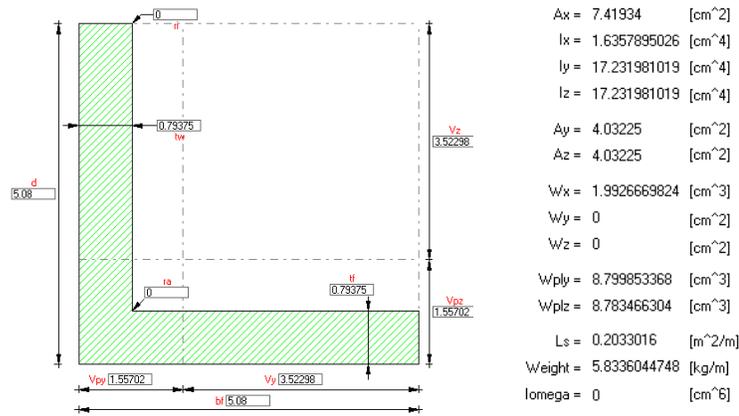


Figura 4.42 – Seção cantoneira L 2x2x0,3125

✓ **Diagrama de esforços solicitantes de cálculo do banzo**



Figura 4.43 – Esforços de compressão e tração para a barra do banzo

✓ Verificação da esbeltez

De acordo com o item 5.3.4.1 da ABNT NBR 8800:2008, o índice de esbeltez das barras comprimidas, definido pela relação KL/r , não deve ser superior a 200. No caso para cantoneira deve ser menor a 300.

$$KL_x/r_x \leq 200 \quad KL_y/r_y \leq 200$$

Onde:

L_x, L_y maiores comprimentos destravados

r_x, r_y raio de giração

K coeficiente de flambagem de barras comprimidas

- Banzo Superior e Inferior (2L 3x3x0,375)

Flambagem no plano da treliça $\frac{KL_y}{r_y} = 91,45 \leq 200$ fora do plano da treliça $\frac{KL_z}{r_z} = 65,56 \leq 200$

- Diagonais (L 3x3x0,3125)

Flambagem no plano da treliça $\frac{KL_y}{r_y} = 141,01 \leq 300$ fora do plano da treliça $\frac{KL_z}{r_z} = 141,01 \leq 300$

- Montantes (L 2x2x0,3125)

Flambagem no plano da treliça $\frac{KL_y}{r_y} = 82,02 \leq 300$ fora do plano da treliça $\frac{KL_z}{r_z} = 82,02 \leq 300$

Assim a seções escolhidas, podem ser utilizada em um elemento comprimido já que satisfazem às prescrições da norma. O resto das verificações analíticas da ABNT NBR 8800:2008 são apresentadas no Apêndice A.

✓ Verificação combinada dos esforços

Considera-se que os elementos da treliça estão submetidos apenas ao esforço normal de compressão, em função dos resultados obtidos no Apêndice A na seção A.1, a verificação combinada é dada de maneira direta dividindo-se o

esforço solicitante de cálculo pela resistência de cálculo. O resultado para o elemento analisado foi:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} = \frac{349,98kN}{400,26kN} < 0,86$$

$$\rightarrow 0,86 < 1,00 \Rightarrow \textit{Verifica}$$

Em comparação com o valor da relação calculado no programa Robot de 0,87 (Figura 4.38) ve-se que os resultados são próximos. Conclui-se então que os resultados de dimensionamento do programa para elementos sometidos a compressão é consistente com o da norma ABNT NBR 8800:2008.

• Elementos de coluna

As colunas são verificadas como elementos solicitados por flexo-compressão. Desenvolve-se então as verificações de esbeltez, de compressão e tração, de cisalhamento, de flexão e da combinação dos esforços atuantes.

✓ Seções transversais adotadas

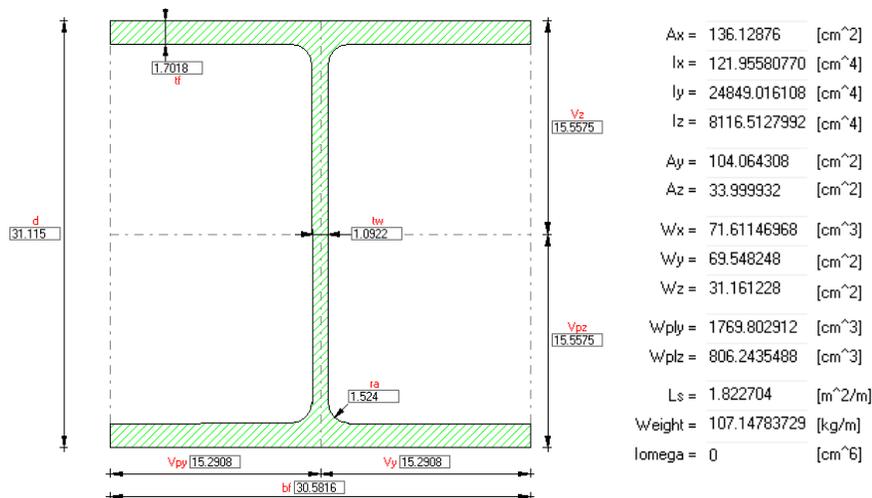


Figura 4.44– Seção Tipo W 310x107 das Colunas do pórtico GP25 B6

✓ Diagrama de esforços solicitantes de cálculo



Figura 4.45 – Envoltória de esforços axiais (coluna).

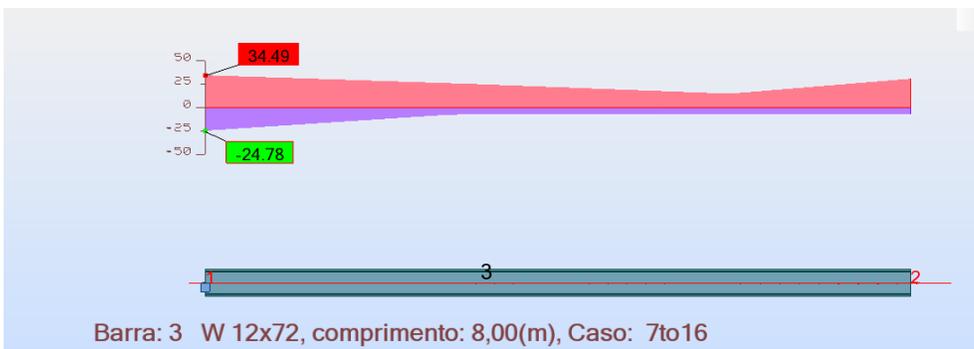


Figura 4.46 – Envoltória de esforços cortantes (coluna).

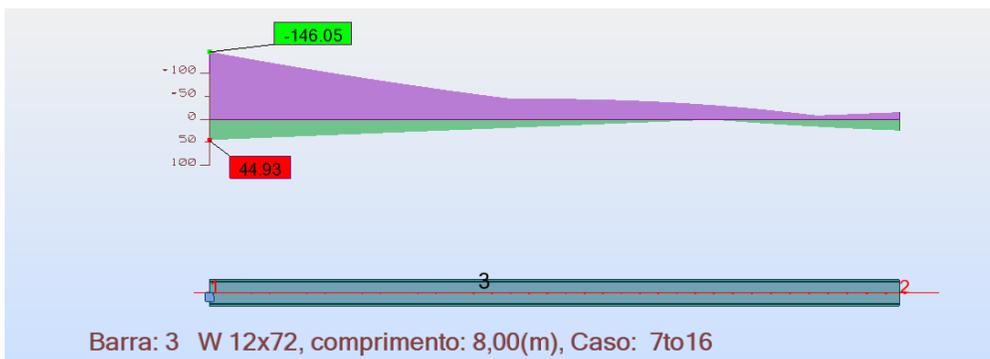


Figura 4.47 – Envoltória de momentos fletores (coluna).

✓ Verificação da esbelteza

De acordo com o item 5.3.4.1 da ABNT NBR 8800:2008, o índice de esbelteza das barras comprimidas, definido pela relação KL/r , tomado como a

maior relação entre o comprimento destravado do perfil e o raio de giração correspondente r , não deve ser superior a 200.

$$KL_x/r_x \leq 200 \quad KL_y/r_y \leq 200$$

L_x, L_y maiores comprimentos destravados

r_x, r_y raio de giração

K coeficiente de flambagem de barras comprimidas

- Coluna (W 12x72)

Flambagem no plano do pórtico $\frac{KL_y}{r_y} = 59,21 \leq 200$

fora do plano da treliça $\frac{KL_z}{r_z} = 103,60 \leq 200$

Assim o perfil adotado para a coluna pode ser utilizado como um elemento comprimido, já que satisfazem as prescrições da norma.

As demais verificações da norma NBR 8800:2008 para o perfil adotado para a coluna são apresentadas no Apêndice A na seção A.2. A verificação da capacidade de compressão e tração, a verificação da resistência ao cisalhamento e a verificação da resistência a flexão

✓ **Verificação da combinação dos esforços atuantes**

A combinação de esforços é feita conforme estabelece o item 5.5.1 da norma ABNT NBR 8800:2008.

$$\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} = \frac{96,46 \text{ kN}}{1835,09 \text{ kN}} \Rightarrow \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} = 0,05$$

Como a relação entre o esforço axial solicitante e o resistente de cálculo é maior que 0,2, aplica-se a equação do item “a” da seção 5.5.1.2 da NBR 8800:2008 para a verificação dos esforços combinados. Tal equação é dada por:

$$\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \times \left(\frac{M_{x,sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0$$

$$\frac{96,46kN}{(1835,09kN)} + \frac{8}{9} \times \left(\frac{14605 kNcm}{55.340,5 kNcm} + 0,0 \right) \leq 1,0$$

$$\rightarrow 0,30 \leq 1,0 \Rightarrow \textit{Verifica}$$

O resultado da verificação 0,30 é próximo ao obtido pelo programa Robot que é de 0,33, mostrado na nota de cálculo na seção A.3 do Apêndice A. Para o estado limite último. Após a realização das verificações, fica claro que a seção escolhida resiste a todas as solicitações críticas de projeto. Portanto, tal seção poder ser adotada com segurança, satisfazendo com os estados limites de serviço, o que é determinante para o dimensionamento das colunas para este tipo de estruturas.

É interessante notar que o fator decisivo para a escolha da seção do elemento foi à limitação do índice de esbeltez menor de 200, pois caso fosse levada em consideração apenas a capacidade resistente do elemento, a seção ainda poderia ser otimizada.