

AVALIAÇÃO DE PROJETOS DE ESTRUTURA DE AÇO USANDO ANÁLISE ESTRUTURAL EM DUAS E TRÊS DIMENSÕES

EVALUATION OF STRUCTURAL STEEL DESIGN USING STRUCTURAL ANALYSIS IN TWO AND THREE DIMENSIONS

Ricardo Fabeane¹, Emmyle Marcon², Zacarias Martin Chamberlain Pravia³

¹Acadêmico do curso de Engenharia Civil, Universidade de Passo Fundo – RS. E-mail: ricardo.fabeane@gmail.com

²Acadêmica do curso de Engenharia Civil, Universidade de Passo Fundo – RS. E-mail: emmylemarcon@hotmail.com

³Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade de Passo Fundo – RS. E-mail: zacarias@upf.br

RESUMO

Ao desenvolver o projeto de estruturas de aço, é possível usar modelos simplificados em duas dimensões. Este trabalho avalia as limitações e compara o projeto de edifícios industriais de um único nível e cobertura de duas águas usando análise em duas e três dimensões. Todos os cálculos são baseados nas normas vigentes, desde a obtenção das forças devida ao vento, a definição de combinações de estados limites últimos e a obtenção de esforços para verificar as seções.

Palavras-Chave: análise estrutural 2D, análise estrutural 3D, Estruturas de aço

ABSTRACT

The design of steel structures is feasible to use simplified models in two dimensions. This paper evaluates and compares the design limitations of industrial building from a single level and simple roof using analysis in two and three dimensions. All calculations were based on current standards, from the definition of forces due to wind, combinations for ultimate limit state forces to obtain and verify the sections of the elements.

Keywords: 2D structural analysis, 3D structural analysis, Steel structures.

1. INTRODUÇÃO

A exigência cada vez maior da realização de trabalhos de cálculos estruturais em um prazo cada vez menor, principalmente na etapa de orçamento das obras, faz com que o engenheiro responsável seja obrigado a adotar algumas simplificações durante a realização de seus cálculos.

Dentre tais simplificações, figura em destaque aquela relacionada ao modelo de análise que será utilizado, sendo por vezes optado pela utilização da análise bidimensional em substituição à análise tridimensional da estrutura. Entretanto, durante essa tomada de decisão, o engenheiro deve ter claro em seu raciocínio a representatividade que os resultados fornecidos por este tipo de análise darão a estrutura em questão.

Dentre as principais referências sobre o assunto pode-se citar o trabalho de Mahendran e Moor (1999), que analisaram a influência de elementos secundários no comportamento da estrutura através da comparação dos resultados das análises em 2D e 3D de um galpão com resultados experimentais do mesmo modelo construído. Dentre as principais conclusões obtidas pelos autores está a de que se a estrutura for analisada de maneira tridimensional, com a inclusão no modelo de cálculo das rigidezes dos elementos secundários, obtêm-se reduções significativas nos valores das solicitações nos elementos e nos deslocamentos da estrutura, assumindo o modelo de cálculo um comportamento

quase idêntico ao comportamento real da estrutura. Tais autores citam ainda a impossibilidade da obtenção destes resultados trabalhando-se com análises bidimensionais.

Tendo por base as considerações supracitadas buscou-se desenvolver o presente artigo, que tem como objetivo principal apontar o “grau de convergência” ou a confiabilidade dos resultados de dimensionamento da estrutura de um galpão através dos esforços e deslocamentos obtidos por análises bidimensionais e tridimensionais.

2. CONSIDERAÇÕES

A metodologia de trabalho do presente artigo consiste em comparar os resultados obtidos por análises bidimensionais e tridimensionais de uma mesma estrutura. Para tanto, a tipologia de estrutura escolhida foi a de uma edificação em aço, devido a sua grande aplicação prática.

2.1. Características da obra

Utilização: Depósito

Local: Passo Fundo/RS

Imediações: Terreno plano

Inclinação da cobertura: 15°

As dimensões básicas da estrutura são exibidas na Figura 1.

2.2. Sistema estrutural

Para a composição do sistema estrutural do galpão, foram feitas as seguintes considerações:

- Sistema estrutural em pórticos transversais, com colunas e vigas de cobertura em perfis de alma cheia, e com afastamento de 6.000mm entre o eixo dos pórticos.
- Ligação entre os pórticos transversais feitas através da utilização de vigas de travamento em perfis de alma cheia, sendo dispostas nos nós de ligação entre as vigas de cobertura (cumeeira do galpão) e entre as vigas de cobertura e as colunas.
- Contenções laterais em “X” entre os pórticos extremos do galpão. Tais contenções serão consideradas como trabalhando apenas a tração.
- Colunas de fechamento em perfis de alma cheia nas fachadas do galpão. Para a fachada frontal, a disposição das colunas de fechamento é ajustada para permitir a locação de um portão de 7m x 4,5m.
- As colunas de fechamento apoiam-se nas bases e nas vigas de cobertura dos oitões.
- Consideração de bases rígidas nos pórticos e bases flexíveis nas colunas de fechamento.

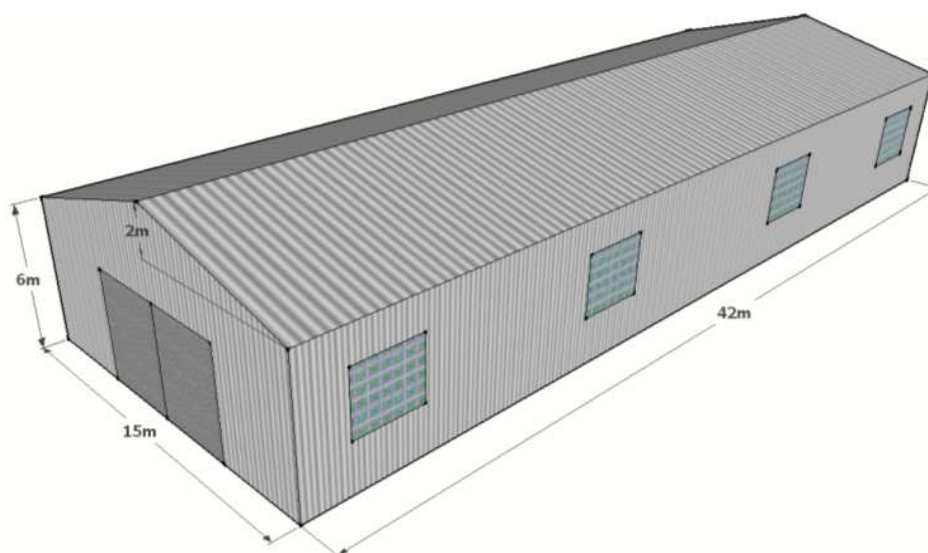


Figura 1: Dimensões básicas do galpão

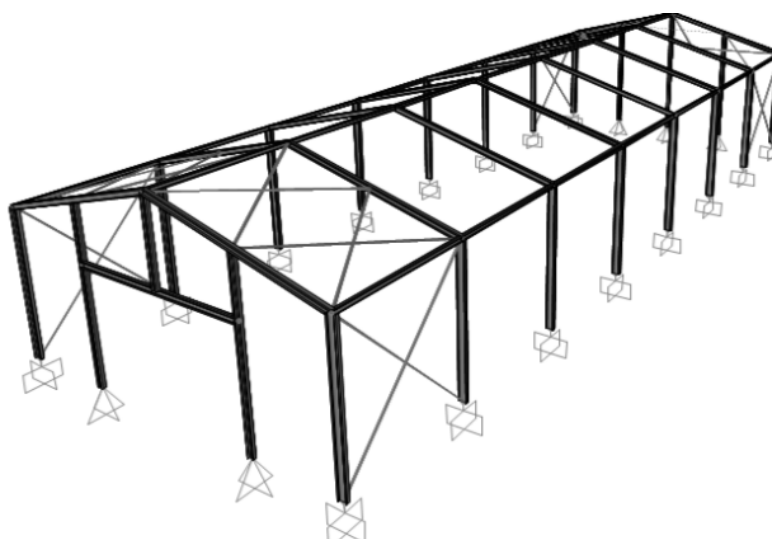


Figura 2: Idealização da estrutura do galpão

2.3. Carregamentos Atuantes

Para a análise da presente estrutura, são considerados os seguintes carregamentos:

- Peso-próprio da estrutura de aço ($F_{G1,k}$): Valor considerado diretamente pelo software utilizado para a análise e dimensionamento da estrutura (SAP v.15)
- Carga permanente ($F_{G2,k}$): Carregamento que envolve o peso de terças, telhas, tirantes, e demais elementos que permanecem fixos a edificação. Valor estimado em $0,20 \text{ kN/m}^2$.
- Carga acidental de cobertura ($F_{Q1,k}$): Valor utilizado para levar em conta sobreposições que possam danificar a cobertura (deposição de minerais, cascas, poeira, etc.). Valor adotado de $0,25 \text{ kN/m}^2$, conforme indicação da ABNT NBR 8800:2008.
- Forças devidas ao vento a 0° ($F_{Q2,k}$): Valor calculado com o uso do software Visual Ventos, 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 de categoria IV e cpi's de $+0,2$ e $-0,3$. O resultado da ação do vento a 0° foi sucção na cobertura

- Forças devidas ao vento a 90° ($F_{Q3,k}$): 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

2.4. Combinações utilizadas

Conforme já citado anteriormente, serão realizados a análise e o “dimensionamento” da estrutura com o uso do software SAP. Tal software utiliza em suas rotinas de cálculo as considerações da norma americana *AISC Steel Construction Manual – Thirteenth edition*. Portanto, é necessário que as combinações de ações sejam feitas de acordo com as indicações da norma supracitada.

Tal norma, em sua Part 2, faz referência ao uso das combinações indicadas pela seção 2.3 da norma *ASCE/SEI 7-10*, destacando algumas combinações básicas para o dimensionamento da estrutura (deve ser citado aqui que as combinações utilizadas são referente ao uso do método LRFD para a verificação dos elementos).

Tendo isto por base, obteve-se as seguintes combinações para o “dimensionamento” dos elementos:

- 1) $1,4 (F_{G1,k} + F_{G2,k})$
- 2) $1,2 (F_{G1,k} + F_{G2,k}) + 1,6(F_{Q1,k})$
- 3) $0,9 (F_{G1,k} + F_{G2,k}) + 1,0(F_{Q2,k})$
- 4) $0,9 (F_{G1,k} + F_{G2,k}) + 1,0(F_{Q3,k})$

Para a verificação das deformações e deslocamentos da estrutura foram adotadas as seguintes combinações:

- 1) $(F_{G1,k} + F_{G2,k}) + 0,5(F_{Q1,k})$
- 2) $(F_{G1,k} + F_{G2,k}) + 0,7(F_{Q2,k})$
- 3) $(F_{G1,k} + F_{G2,k}) + 0,7(F_{Q3,k})$

2.5. Critérios de deslocamento

Para a referida estrutura, são adotados os seguintes critérios de deslocamento:

- Para vigas de cobertura: $\delta = L/250 = 15000mm/250 = 60mm$
- Deslocamento lateral do galpão: $\delta = H/300 = 6000mm/300 = 20mm$
- Deslocamento lateral para as colunas de fechamento: $\delta = H/300 = 7500mm/300 = 25mm$

3. ANÁLISES E DIMENSIONAMENTOS

3.1. Análise e dimensionamento do modelo 2D

Para a realização do dimensionamento da referida estrutura utilizando-se apenas análises bidimensionais será necessário a execução de 3 análises, sendo executada uma para cada um dos seguintes grupos:

- Dimensionamento dos pórticos transversais
- Dimensionamento das contenções laterais em X e vigas de compressão
- Dimensionamento das colunas de fechamento

3.1.1. Dimensionamento dos pórticos transversais

Para o dimensionamento dos pórticos transversais foram considerados os seguintes carregamentos atuantes:

- Peso próprio: Contabilizado pelo software
- Carga permanente: aplicada nas vigas de cobertura e nas colunas laterais, em sentido gravitacional, com o valor de : $F_{G2,k} = 0,20 \frac{kN}{m^2 \cdot 6m} = 1,2 \frac{kN}{m}$
- Carga acidental de cobertura: aplicada nas vigas de cobertura, em sentido gravitacional, com o valor de: $F_{Q1,k} = 0,25 \frac{kN}{m^2 \cdot 6m} = 1,5 \frac{kN}{m}$
- Forças devidas ao vento a 0°: Aplicadas conforme indicação da Figura. 3
- Forças devidas ao vento a 90°: Aplicadas conforme indicação da Figura. 4

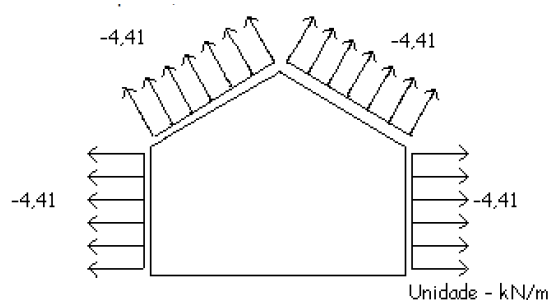


Figura 3: Forças devidas ao vento 0°. Fonte: Relatório do software Visual Ventos

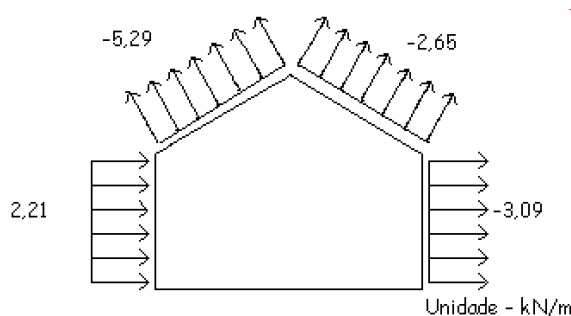


Figura 4: Forças devidas ao vento 90°. Fonte: Relatório do software Visual Ventos

Após as análises e verificações, chegou-se as seções e relações de solicitação/resistência indicadas na Figura 5. Deve ser notado que apesar das baixas relações de solicitação/resistência apresentadas nesta figura as seções foram escolhidas para que a esbeltez dos elementos fosse mantida abaixo de 200.

Com relação aos deslocamentos, obteve-se o valor de -44 mm para o deslocamento do nó central da cobertura e 12 mm para os deslocamentos laterais das colunas, o que garante um comportamento adequado em serviço da estrutura.

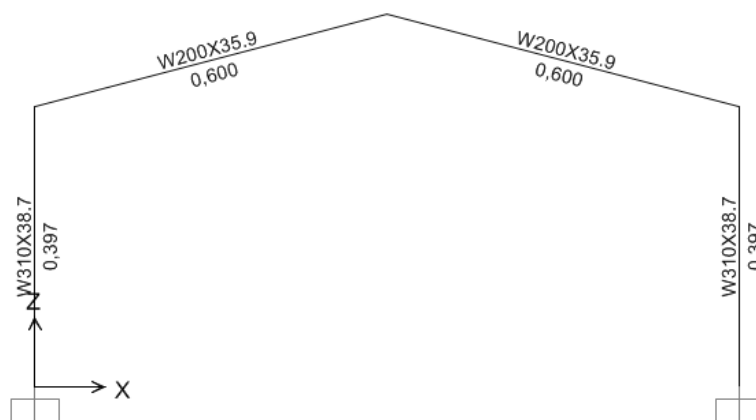


Figura 5: Resultados para o dimensionamento dos pórticos transversais

3.1.2. Dimensionamento das contenções laterais em “X” e vigas de compressão

Para o dimensionamento das contenções laterais em “X” e vigas de compressão foram considerados os seguintes carregamento atuantes:

- Peso próprio: Contabilizado pelo software
- Forças devidas ao vento a 0° e 90°: carga uniformemente distribuída nas colunas dos oitões, devido a largura de influência de 3,75m, e carga pontual aplicada no nó superior, com o valor da soma das reações aplicadas pelas colunas de fechamento nas vigas de cobertura.
- Após as análise e verificações, chegou-se as seções de 2L 2”x3/16” para as contenções em “X” (menor seção com dupla cantoneira que o SAP possui) e W150x22,5 para as vigas de compressão (em função da esbeltez limitada a 200). As relações de solicitação/resistência são apresentadas na Figura 6.

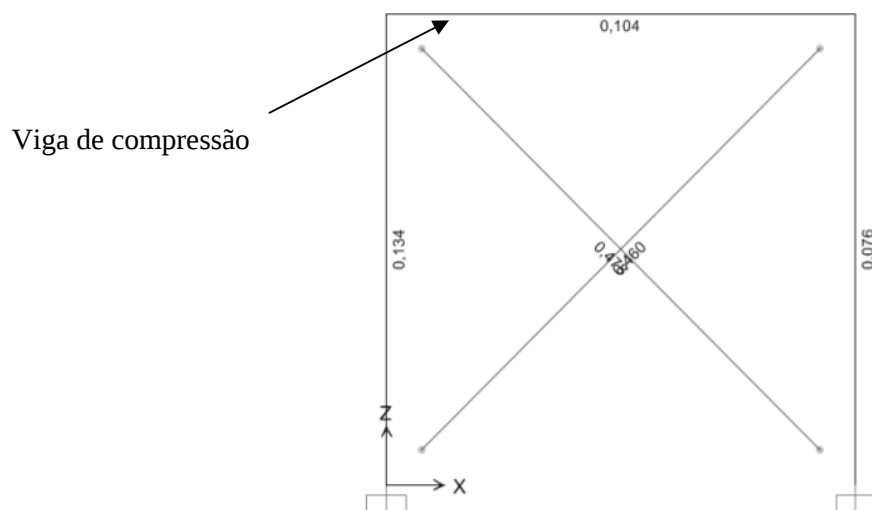


Figura 6: Resultados para o dimensionamento das vigas de compressão e contenções laterais em “X”

3.1.3. Dimensionamento das colunas de fechamento

Para o dimensionamento das colunas de fechamento, foi feita a simplificação de se dimensionar apenas uma coluna de comprimento de 7,5m (média das colunas de 7m e 8m). Além disto, foram considerados os seguintes carregamentos:

Peso próprio: Contabilizado pelo software

Carga permanente: aplicada nas vigas de cobertura e nas colunas laterais, em sentido

gravitacional, com o valor de : $F_{GZ,k} = 0,20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 6\text{m} = 1,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Forças devidas ao vento a 0° e 90°: carga uniformemente distribuída nas colunas, devido a largura de influência de 3,75m.

Como resultado, é apresentada na Figura 7 a relação de solicitação para tais elementos. Também para as colunas de fechamento, como para os demais casos anteriores, o fator determinante na escolha da seção do perfil foi a obtenção de uma esbeltez abaixo de 200.



Figura 7: Resultado do dimensionamento das colunas de fechamento

Com relação ao valor máximo de deslocamento, este ficou em cerca de 13 mm para a metade da altura da coluna, o que comprova a validade da seção utilizada.

3.2. Análise e dimensionamento do modelo 3D

O modelo tridimensional da estrutura (que é apresentada na Figura 8) foi desenvolvido com o objetivo de englobar todos os elementos apresentados anteriormente, possibilitando assim em apenas um arquivo realizar-se a análise e o dimensionamento de toda estrutura.

As ações presentes no modelo são todas aquelas definidas no item 2.3, sendo aplicadas em cada um dos elementos de acordo com sua respectiva largura de influência. Um fato importante de ser notado aqui é de que, para tal modelo, foi considerado a ação do vento em todas as fachadas tanto para as direções 0° como 90°.

As seções utilizadas neste modelo são aquelas resultantes do dimensionamento da estrutura em 2D. Apresenta-se na Figura 9 o resultado obtido para as relações solicitação/resistência dos elementos.

No que relaciona-se ao desempenho em serviço da estrutura, temos que os valores obtidos para o deslocamento vertical da cobertura (-48 mm), deslocamento lateral das colunas (13mm) e deslocamento lateral máximo das colunas de fechamento (18mm) estão abaixo dos valores limites, o que valida as seções utilizadas.

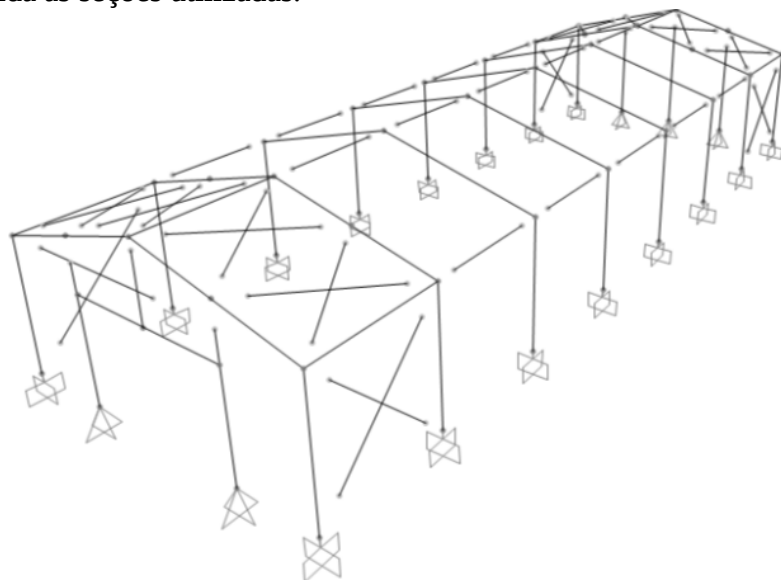


Figura 8: Modelo unifilar tridimensional da estrutura

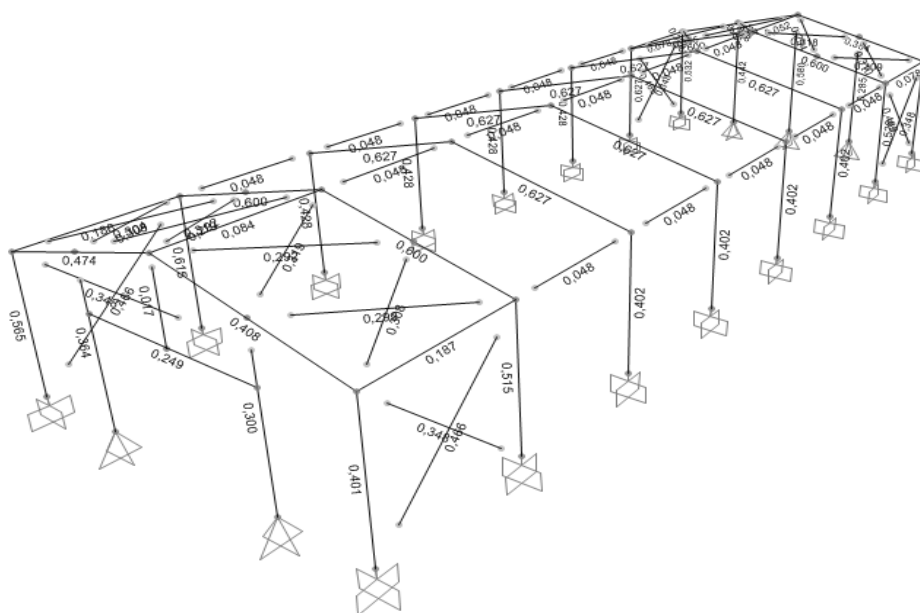


Figura 9: Resultados para o dimensionamento da estrutura

3.3. Comparação do resultado das análises

Após a realização das análises é conveniente fazer a comparação direta dos resultados dos elementos do modelo 3D que apresentaram as mesmas características de análise do modelo 2D. Isto é verificado apenas para os pórticos centrais do galpão do modelo 3D com o pórtico analisado em 2D. Apresenta-se abaixo os resultados obtidos por tais modelos:

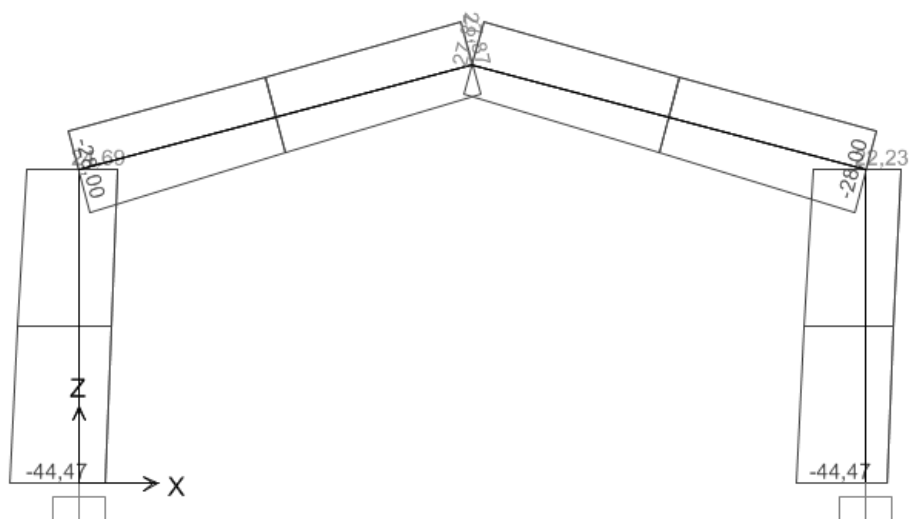


Figura 10: Diagrama de esforços axiais para o modelo em 2D

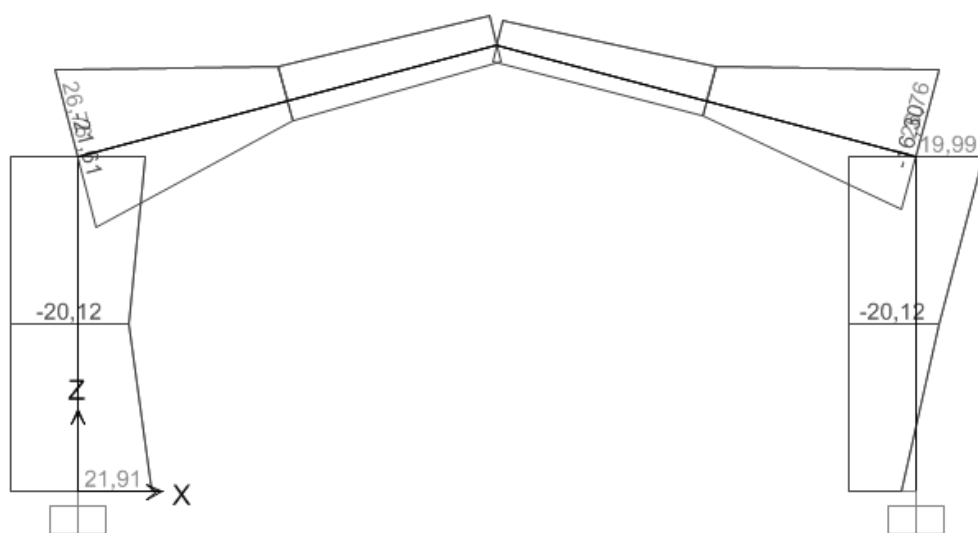


Figura 11: Diagrama de esforços cortantes para o modelo em 2D

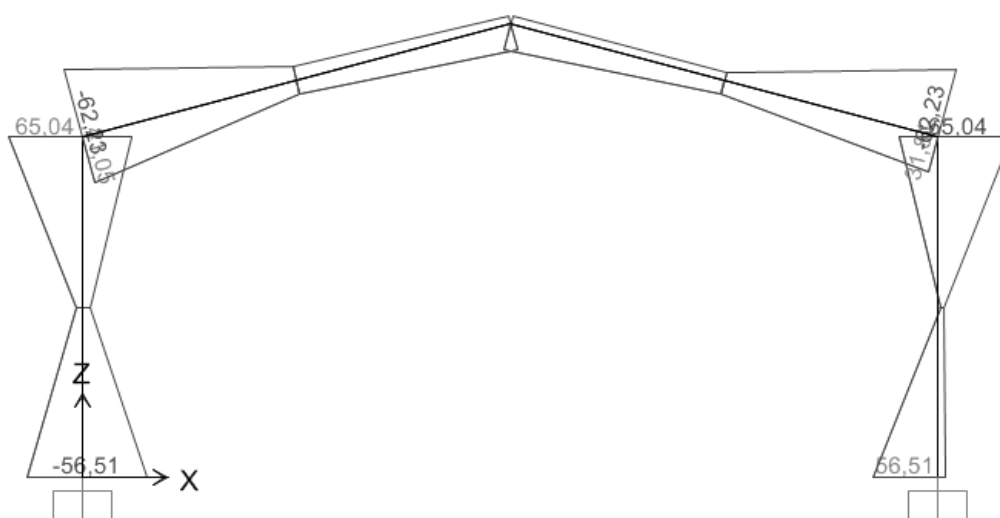


Figura 12: Diagrama de momentos fletores para o modelo em 2D

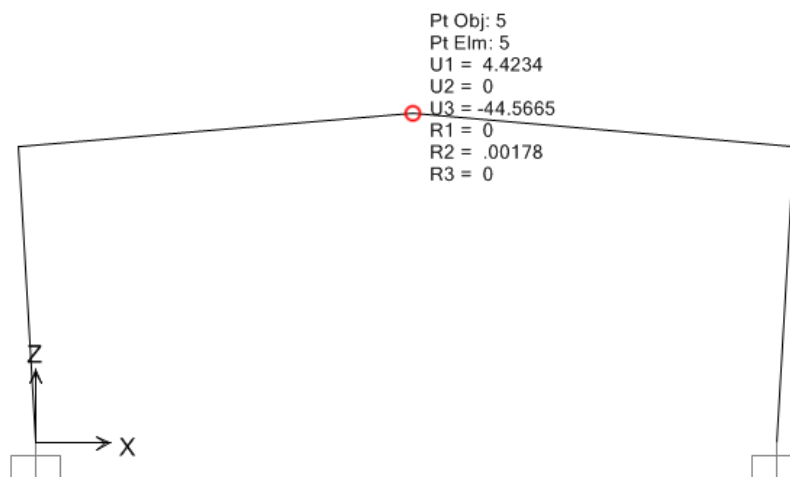


Figura 13: Deslocamentos para o nó central da viga de cobertura para o modelo em 2D

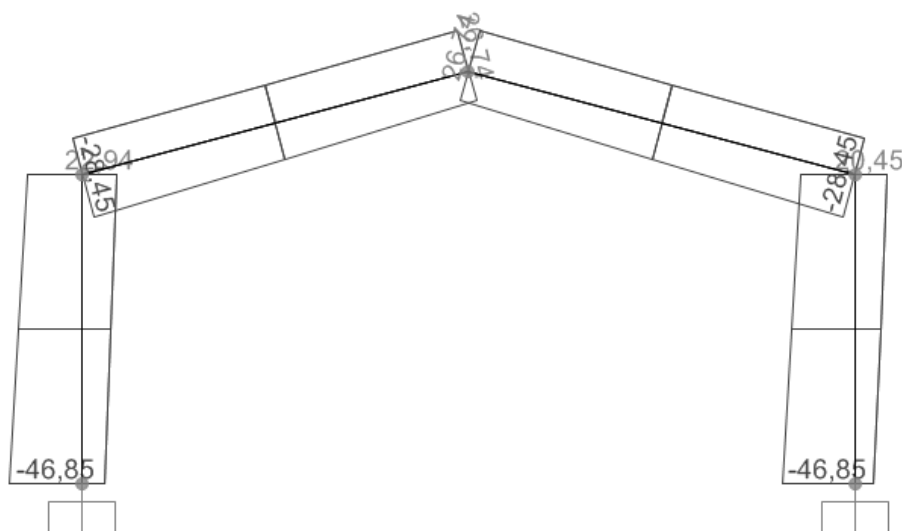


Figura 14: Diagrama de esforços axiais para o pórtico central do modelo em 3D

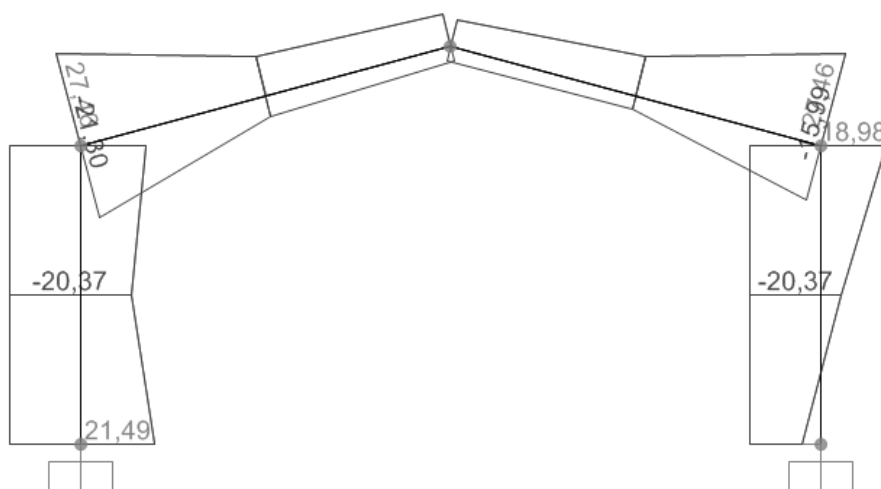


Figura 15: Diagrama de esforços cortantes para o pórtico central do modelo em 3D

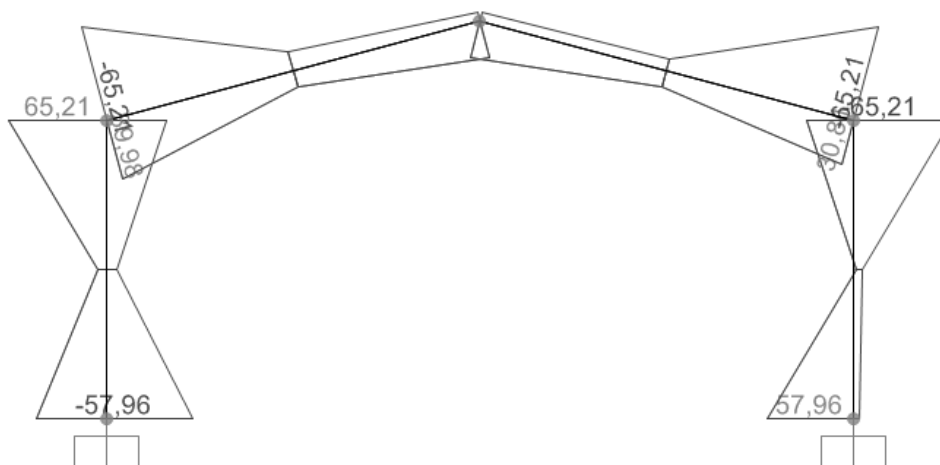


Figura 16: Diagrama de momentos fletores para o pórtico central do modelo em 3D

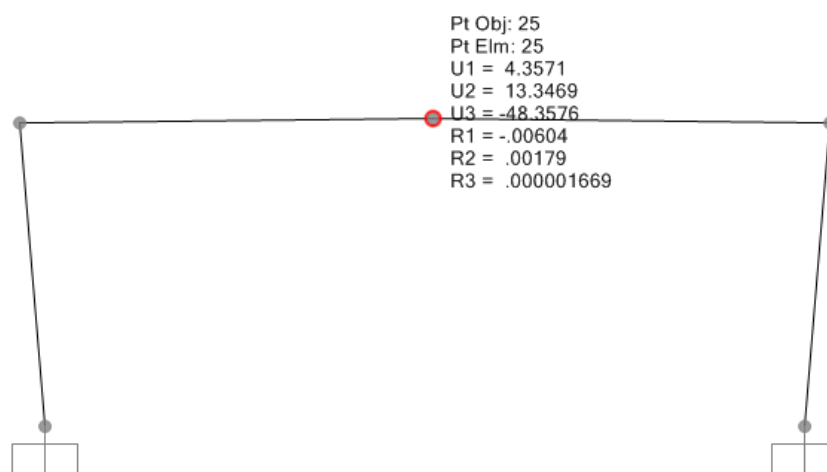


Figura 17: Deslocamentos para o nó central da viga de cobertura do pórtico central do modelo em 3D

4. CONCLUSÕES

Após a realização das análises e comparação dos resultados expostos, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- Caso a análise em 2D represente de forma fiel as condições de trabalho da estrutura, seus resultados serão completamente compatíveis com os resultados da análise em 3D. Isto pode ser comprovado comparando os esforços e deslocamentos apresentados nas figuras de 10 a 17.
- No caso da estrutura analisada e dimensionada pelo modelo em 3D, teve-se que os pórticos mais solicitados foram o segundo e o sétimo. Isto se deve pelos acréscimos das solicitações gerados pela atuação das contenções laterais em “X” nas colunas de tais pórticos, que é levado em conta apenas neste tipo de análise.
- As contenções em “X” foram os elementos que apresentaram a maior diferença nas relações de solicitação/resistência entre ambas análises. Porém, é conhecido que a simplificação feita de dimensionar apenas uma contenção está longe de representar de forma fiel o comportamento do conjunto de contenções, devendo-se portanto ter atenção especial quando do dimensionamento destes elementos (caso utilize-se análises bidimensionais, aconselha-se deixar a relação de solicitação destes elementos abaixo de 0,5):

- Um fator notado durante o dimensionamento da estrutura é a importância da consideração da esbeltez máxima abaixo de 200 para os elementos comprimidos; tendo-se em vista que para a maioria dos elementos da estrutura a escolha da seção utilizada deu-se por este critério.
- Percebe-se que caso o engenheiro deseje dimensionar a estrutura a partir de análises em 2D, na verificação dos elementos aconselha-se que a relação máxima de solicitação obtida fique abaixo de 0,85, para que a parcela de resistência “excedente” possa absorver esforços que não tenham sido contabilizados por este tipo de análise.
- Estudos experimentais e análise com modelos estruturais não simétricos mostram a incapacidade de representação dos verdadeiros esforços atuantes, por tanto, recomenda-se usar análises tridimensionais para o desenvolvimento de projetos de estruturas de aço.

5. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6123:1988 – Projeto Forças devidas ao vento em edificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1988.

ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2008.

AISC Fourteenth Edition – Steel Construction Manual. American Institute of Steel Construction, United States of America, 2010.

ASCE/SEI 7-10. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, United States of America, 2010.

MAHENDRAN, M; MOOR, C. Three-Dimensional Modeling of Steel Portal Frame Buildings. *Journal of Structural Engineering*, v. 125, n. 8, p. 870-878, ago. 1999.
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:8\(870\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:8(870))