

Análise comparativa de diferentes sistemas de cobertura em estrutura de aço

Marco A. S. Bessa¹, Filipe P. Battisti², Matheus N. Reis³

¹Dept. de Engenharia Civil, Centro Universitário de Brasília
QS 1 Lote 1/17 Rua 214,72025-120, Brasília-DF, Brasil
marco.bessa@ceub.edu.br

²Dept. de Engenharia Civil, Universidade Católica de Brasília
EPCT QS 07 Lote 01 Taguatinga, 71966-700, Brasília-DF, Brasil
filipepb_nt@hotmail.com

³Dept. de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70297-400, Brasília-DF, Brasil
matheusnreis95@gmail.com

Resumo. O uso de estruturas metálicas tem se intensificado no Brasil, pois se apresenta como uma alternativa moderna e prática na construção, mostrando perspectivas de crescimento nesse nicho de mercado. Este estudo tem como objetivo avaliar comparativamente o desempenho de diferentes sistemas estruturais de coberturas de galpões industriais de uso geral, considerando o menor custo e deslocamentos. Os modelos de telhado estudados são inteiramente em estrutura metálica de diferentes topologias, com perfis formados a frio. O cálculo e a análise das estruturas em questão são baseados em normas brasileiras e internacionais de construção em aço, juntamente com o uso de software e planilhas desenvolvidas. Os resultados e as estimativas de custo obtidos em projeto podem ser afetados por algumas variáveis, como a geometria e inclinação adotada para o telhado de treliça. Apesar dessa sensibilidade, a análise das estruturas mostra que a de pórtico de banzos paralelos (PBP) é mais econômica no final do projeto, de modo geral, e a treliça de banzos paralelos inclinados sofre menores deslocamentos.

Palavras-chave: perfil formado a frio, sistemas estruturais, coberturas.

1 Introdução

O mercado de estruturas metálicas tem crescido consideravelmente no Brasil. Com o avanço da tecnologia foi possível desenvolver aços com maior qualidade, tornando assim a construção civil uma de suas maiores consumidoras, acarretando o aumento da concorrência entre projetistas e levando-os a busca da otimização de custos. Edificações de galpões em estrutura metálica são soluções econômicas e versáteis para as mais diversas aplicações, como lojas, ginásios, depósitos, garagens, hangares, fábricas, entre outros. Em meio a esta vantagem, há a possibilidade da projeção de diversas configurações de cobertura metálica, tornando necessário o estudo da viabilidade de suas variações e topologias.

2 Metodologia

Para o desenvolvimento do projeto são utilizados *softwares* de análise estrutural e dimensionamento: SAP2000 V15, CFS 8 e Visual ventos 2.0.2.0.

O SAP2000 é um programa de elementos finitos, com interface gráfica tridimensional, utilizado neste estudo para realizar a modelação, geração dos esforços solicitantes e dimensionamento de pilares e treliças dos galpões metálicos. Executa cálculos de acordo com o AISI S100 [1], edição da especificação norte-americana para projetos

de aço formados a frio de elementos estruturais, pelo LRFD (Estados Limites).

O CFS é uma ferramenta de uso geral de dimensionamento de perfis formado a frio, também com o método da norma norte-americana. Neste estudo este *software* é utilizado para dimensionamento das terças.

Visual ventos é um programa desenvolvido na UFP, Universidade de Passo Fundo, que tem por objetivo a determinação das forças devido ao vento em edifícios de planta retangular e cobertura de duas águas, de acordo com as prescrições da NBR 6123 [2].

O dimensionamento dos elementos estruturais segue as etapas de: cálculo da velocidade do vento, cálculo das ações do vento a 0° e 90°, cálculo dos coeficientes de pressão interna, pré-dimensionamento das peças estruturais, determinação dos esforços, dimensionamento com atualização da modelagem buscando menor peso, e análise de deslocamentos.

Para os cálculos do Estado Limite Último, conforme AISI S100 [1] são utilizadas as principais combinações, mostradas nas eq. (1), (2) e (3):

$$0.9D + 1.3 W, \quad (1)$$

$$1.2D + 1.4 Lr + 0.5L, \quad (2)$$

$$1.2D + 1.3 W + 0.5 L + 0.5 Lr, \quad (3)$$

em que D representa as cargas permanentes, W as forças de vento, L as cargas variáveis, de manutenção por exemplo, e Lr as demais cargas específicas de cobertura, segundo a norma americana.

Para análise dos deslocamentos são consideradas as combinações de ações, conforme ASCE 7-10 [3], das eq. (4), (5) e (6):

$$D + W, \quad (4)$$

$$D + 0.75 L + 0.75 Lr, \quad (5)$$

$$D + 0.75 W + 0.75 L + 0.75 Lr. \quad (6)$$

Como ações permanentes nas coberturas são consideradas 100 N/m² devido a telhas, 20 N/m² de acessórios, como elementos de contraventamentos, travamentos, chumbadores e chapas de base de pilar, e 120 N/m² de ações permanentes. Em relação a cargas variáveis tem-se 50 N/m² de instalações, 20 N/m² de reserva técnica, 70 N/m² de ações decorrentes do uso e 150 N/m² considerando manutenção na cobertura.

Para ações de vento são consideradas velocidade básica V_0 de 35 m/s, considerando os galpões localizados em Brasília/DF, fator de rugosidade S_2 de 0.92, considerando categoria III e Classe B, pois a dimensão em planta é de 23 m x 36 m, e fator estatístico S_3 de 1.0, enquadrado no grupo 2, relacionado a edificações para comércio e indústrias com alto fator de ocupação. A Velocidade característica resultante é de 32.34 m/s e pressão dinâmica correspondente de 640 N/m².

3 Topologias e modelagens

Neste estudo são postas três topologias em análise: treliças de banzos paralelos inclinados (TBP), pórtico com treliças de banzos paralelos inclinados (PBP) e treliça tipo fink (TTF). Em todos os casos são considerados vão livre máximo de 23 m, comprimento total dos galpões de 36 m com pórticos planos separados por 6 m, pé-direito livre de 6.61 m, altura total de 10.66 m, terças com perfis C enrijecidos e elementos de aço USI-SAC 300. As disposições dos elementos das topologias adotadas neste estudo foram definidas conforme padrões mais utilizados e observados nas regiões brasileiras.

A estrutura TBP, Fig. 1 com unidades em centímetros, é composta por pilares em perfil laminado tipo box, com treliça composta por banzos paralelos em perfil laminado tipo cartola, montantes e diagonais por perfil U, mãos francesas e terças por perfis U enrijecido. Os pilares da estrutura, na Fig.2, são engastados na base, e a ligação do pilar com a treliça é flexível. Os elementos que compõem a treliça as diagonais e os montantes são rotulados nas suas extremidades.

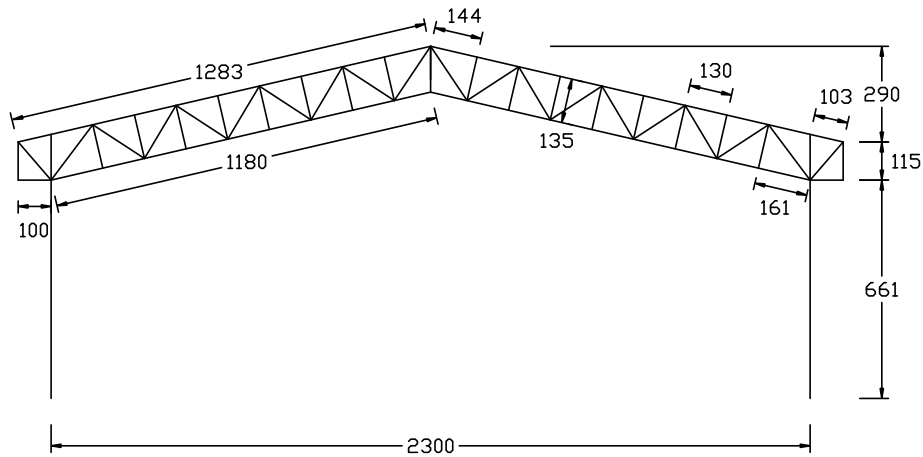


Figura 1. Treliça de bantos paralelos inclinados (TBP), em centímetros

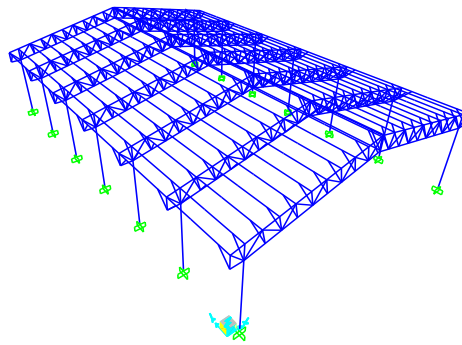


Figura 2. Modelagem numérica da treliça de bantos paralelos inclinados (TBP)

Na Figura 3 há o modelo de pórtico com treliça de bantos paralelos e pilar treliçado. O pilar é composto por perfis box e U simples, os bantos da treliça são compostos por perfil U simples, diagonais U enrijecido, montantes U simples, mão francesa e terças por perfis U enrijecido. Os pilares da estrutura, Fig. 4 são rotulados na base, e a ligação do pilar com a treliça é flexível. Os elementos que compõem a treliça as diagonais e os montantes são rotulados nas suas extremidades.

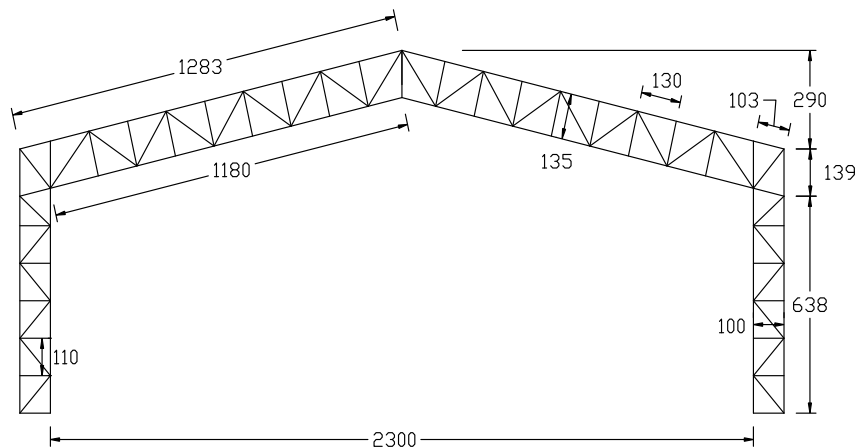


Figura 3. Pórtico com treliça de bantos paralelos inclinados (PBP), em centímetros

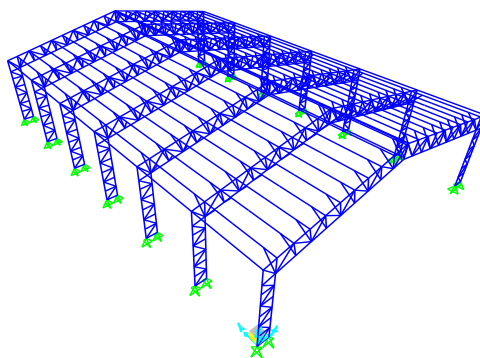


Figura 4. Modelagem numérica pórtico com treliça de banzos paralelos inclinados (PBP)

Na Figura 5 apresenta-se o modelo de treliça tipo fink, a qual possui somente os banzos superiores inclinados, dando o aspecto de um trapézio. Na Figura 6, os pilares são engastados na base, há ligações flexíveis entre a treliça e o pilar e as extremidades das diagonais e dos montantes rotuladas, sendo os pilares compostos por perfil box, banzos por perfil cartola, diagonais e montantes por perfil U simples, terças e mão francesa por perfil U enrijecido.

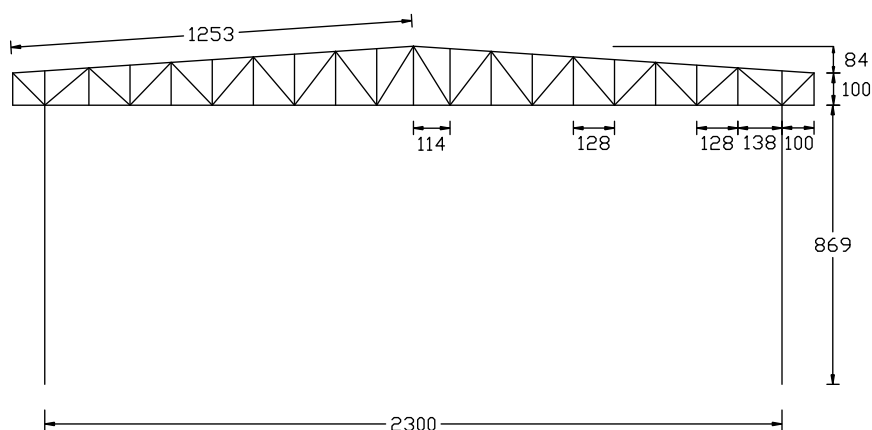


Figura 5. Treliça tipo fink (TTF), em centímetros

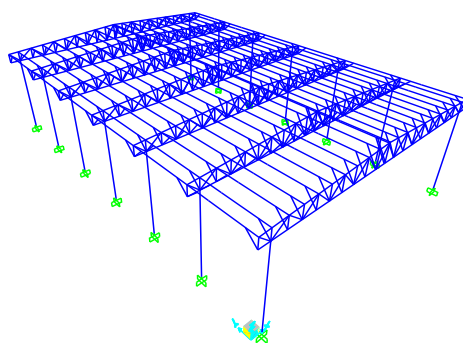


Figura 6. Modelagem numérica Treliça tipo fink (TTF)

4 Resultados e discussão

São apresentados resultados, separados por tipo de elemento estrutural, relacionados ao consumo mínimo de aço necessário para atender aos critérios de desempenho das topologias TBP, treliça de banzo paralelo, PBP, pórtico de banzo paralelo, e TTF, treliça tipo fink. A taxa de consumo de aço é normalmente tomada como critério inicial para comparações de modelos de coberturas e galpões, justificando, assim, sua utilização para a análise comparativa, além do consumo total final e da verificação dos principais deslocamentos.

A Figura 7 mostra os pesos totais dos elementos de banzos e montantes. Para ambos os gráficos se verifica que a estrutura PBP apresentou o menor consumo de aço. Considerando os valores para banzos superior e inferior, há uma diferença de 1.36 toneladas se comparada com a TBP. A estrutura PBP apresenta aproximadamente 35% de material a menos que as demais, em relação aos banzos.

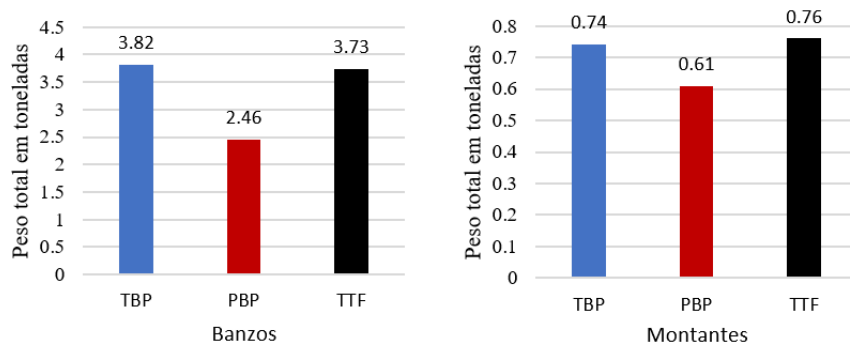


Figura 7. Pesos totais em toneladas de banzos e montantes das treliças

A Figura 8 apresenta os pesos totais das diagonais e das terças. Em termos das diagonais, percebe-se que a estrutura PBP apresenta o menor consumo de aço. O dimensionamento das diagonais demonstra uma variação média de consumo de apenas 4%. O cálculo das terças resultou em perfis iguais, apesar das diferenças de inclinação das coberturas, não havendo, então, diferença no quantitativo de aço.

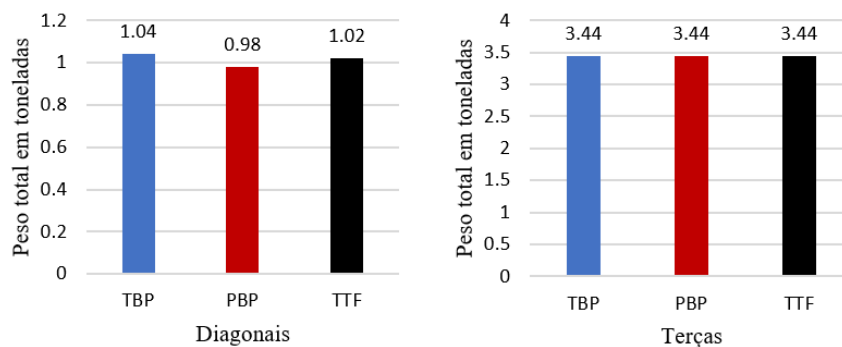


Figura 8. Pesos totais em toneladas de diagonais e terças das treliças

A Figura 9 retrata os pesos totais das mãos francesas e de pilares. As verificações das mãos francesas das topologias TBP, PBP e TTF resultam num mesmo tipo perfil. Porém, a TTF resulta em um peso maior em até 4%, pois não possui banzos paralelos, fazendo com que as mãos francesas tenham maior comprimento. Como a topologia PBP é composta por pilares treliçados interligados por diagonais e montantes, e a TTF apresenta banzo inferior reto, necessitando de pilares mais altos e mais robustos para atender a altura mínima de projeto, possuem maior peso. A TBP demonstra boa economia nos pilares, com aproximadamente 22% a menos de material.

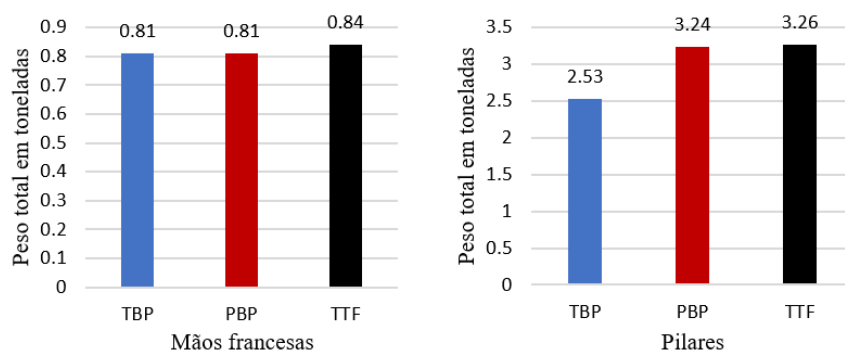


Figura 9. Pesos totais em toneladas de mãos francesas e pilares

A Figura 10 mostra os pesos totais de acessórios, podendo ser considerados iguais, levando-se em conta que a diferença de quantitativo de aço é de apenas 3%. A topologia PBP demonstra-se a mais pesada nesta verificação.

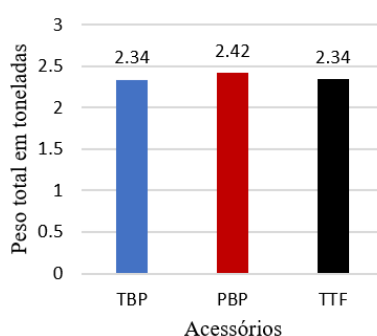


Figura 10. Pesos totais em toneladas dos acessórios

A Tabela 1 apresenta o peso total para cada topologia, considerando a composição de todos os tipos de elementos. A estrutura PBP demonstra-se a melhor em termos de custos por necessitar de menos materiais, com redução de 757 Kg, isto é, de 5.15% em relação a TBP e de redução de 1439 Kg, 9.34%, em relação a TTF.

Tabela 1. Peso total de cada topologia com todos os elementos

Topologia	Peso total (Kg)
PBP	13954
TBP	14711
TTF	15393

Os deslocamentos foram analisados de acordo com critérios das normas ASCE 7-10 [3] e NBR 8800 [4], utilizando-se $L/250$ para deslocamentos verticais das cumeeiras, sendo L o vão livre, e $H/300$ para deslocamentos horizontais no topo de pilares, em que H é a altura dos pilares. Os deslocamentos encontrados são apresentados na Tabela 2.

O limite de deslocamento vertical é de 9.2 cm, considerando vãos de 23 m. Como as alturas de pilares variam, para a TBP o limite de deslocamento lateral é de 2.2 cm, o da PBP é de 2.12 cm e para TTF é de 2.87 cm. Percebe-se pelos resultados na Tabela 2 que nenhum deslocamento ultrapassou limites normativos.

Tabela 2. Deslocamentos verticais das cumeeiras e horizontais dos pilares

Topologia	Cumeeira (cm)	Pilares (cm)
PBP	0.074	1.53
TBP	0.012	0.49
TTF	0.944	1.02

5 Conclusões

As análises indicam que para o vão de 23 metros e pórticos a cada 6 metros, a cobertura composta pela treliça de pórticos de banzos paralelos (PBP) apresenta taxa de consumo de aço inferior às demais topologias. Comparando-se o consumo com a segunda estrutura mais leve, a treliça de banzo paralelo (TBP), a economia é de apenas 5.15%, e comparando com a mais pesada, estrutura com treliça tipo fink (TTF), percebe-se redução mais considerável de 9.34%.

A diferença na relação final de materiais da PBP é devida, principalmente, à sua disposição mais eficiente de banzos e montantes. A TBP é a segunda mais econômica devido ao menor consumo em pilares, que são de menor altura em relação a TTF.

A configuração dos elementos estruturais da TBP resulta tanto em menores deslocamentos verticais quanto horizontais. A TTF é a topologia mais flexível verticalmente, enquanto a PBP é a que mais se desloca horizontalmente. Apesar disso, todas resultam em deslocamentos dentro das prescrições normativas.

Treliças com mesma topologia e diferentes disposições de diagonais e montantes, por exemplo, poderiam gerar variações nos resultados, porém, poucas, pois as dimensões e disposições dos elementos adotadas para este estudo são as mais recorrentes e representam bem casos que seriam considerados produtos de um bom dimensionamento em projeto. Apresentam ótima distribuição de esforços de modo geral, levando em conta as características de cada topologia. Sendo assim, não haveria alterações das interpretações gerais encontradas neste estudo a respeito das topologias, caso outras disposições recorrentes de diagonais e montantes fossem adotadas.

Authorship statement. The authors hereby confirm that they are the sole liable persons responsible for the authorship of this work, and that all material that has been herein included as part of the present paper is either the property (and authorship) of the authors, or has the permission of the owners to be included here.

Referências

- [1] American Iron and Steel Intitute, AISI S100 – Method for Cold-formed Steel Structural Members. Massachusetts, United States, 2012.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6123: Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- [3] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Reston, Virginia, United States, 2010.
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.