

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS EM AÇO PARA EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS COM PONTE ROLANTE

OPTIMIZATION OF STRUCTURAL STEEL SYSTEMS FOR INDUSTRIAL BUILDINGS WITH TRAVELLING CRANE

Jéssica Luciene Ferreira¹ Geraldo Donizetti de Paula² Flávio Teixeira de Souza³ 

Resumo: Em edifícios industriais, é comum a movimentação de elevadas cargas em amplos espaços. Para isto, é comum o emprego de pontes rolantes que, apesar de facilitar o trabalho nessas instalações, torna mais oneroso o projeto dessas estruturas. Com o objetivo de otimizar sistemas estruturais em aço para edifícios industriais de médio porte com ponte rolante, foram considerados neste trabalho 36 modelos, com vãos livres iguais a 20, 24 e 28 metros, distâncias entre pórticos de 6,0 e 7,5 metros, cobertura composta por treliças de banzos paralelos e triangulares e carga da ponte rolante iguais a 100 kN, 250 kN e 500 kN, submetidos a ações permanentes e variáveis. O método empregado no estudo foi o Método dos Elementos Finitos. Inicialmente foi realizado um pré-dimensionamento dos modelos através do software SAP 2000 e, posteriormente, o pórtico mais solicitado foi otimizado utilizando o método de otimização disponível no software ANSYS Workbench. Como parâmetros de otimização foram consideradas as áreas de seção dos perfis e os deslocamentos no topo dos pilares, obtendo-se o peso total de aço da estrutura com a melhor resposta de análise. Como resultado, observou-se uma redução média de 23,76% no peso total de aço após a otimização, indicando que os modelos com cobertura composta por treliça de banzos paralelos (BP) apresentaram menores pesos de aço em todas as etapas. Diante dos resultados obtidos, pode-se afirmar que a padronização da seção dos perfis resulta na economia estrutural e facilita a execução do projeto.

Palavras-chave: Edifício industrial em aço. Ponte rolante. Otimização. Método dos Elementos Finitos.

Abstract: In industrial Buildings it is common the movement of high loads through larger spaces, using travelling cranes, that make the work easier, but demands more expensive structures to support it. The main objective of this work is to optimize structural steel systems for medium-sized industrial buildings with travelling crane. Were considered in this work 36 models were considered and they were combined with free spans of 20, 24 and 28 meters, while the distances between frames were 6,0 and 7,5 meters, the roof was composed of parallel and triangulated flange trusses and the travelling crane load equal to 100 kN, 250 kN and 500 kN, subjected to permanent and variable actions. The method used in the study was the Finite

¹ Engenheira Civil, M.Sc., Universidade Federal de Ouro Preto, ferreirajessicajlf@gmail.com.

² Professor, D.Sc., Universidade Federal de Ouro Preto, geraldo.paula@ufop.edu.br.

³ Professor, D.Sc., IFMG – Campus Ouro Preto, flavio.souza@ifmg.edu.br.

Elements Method. Initially, a pre-dimensioning of the models was performed through the SAP 2000 software and afterwards the most requested frame was optimized using the optimization method available in the ANSYS Workbench software. The optimization parameters considered were the section areas of the profiles and the top displacements of the columns, obtaining the total steel weight of the structure with the best analysis response. As a result, it was observed an average reduction of 23,76% in the total steel weight after the optimization, indicating that the models with parallel flange truss (BP) show lower in the total weight of steel in all stages. Given the results obtained, it can be claimed that the standardization of the section of the profiles results in structural economics and it helps during the design execution.

Keywords: Steel Industrial Buildings. Travelling Crane. Optimization. Finite Elements Method.

1 INTRODUÇÃO

Os edifícios industriais são estruturas de grande área construída, em geral com apenas um pavimento. Na maioria das vezes são compostos por estruturas de aço, pois possuem grandes vãos livres, devido à presença de grandes equipamentos e à necessidade de movimentação de cargas que, muitas vezes, pode ser feita por meio de equipamentos especialmente instalados, como as pontes rolantes (BELLEI, 2006).

As pontes rolantes são equipamentos de movimentação de cargas compostos por uma viga elevada sobre um vão livre, capaz de se mover sobre trilhos. Permite a movimentação das cargas nas três direções (longitudinal, transversal e vertical), e sua capacidade de carga varia entre 0,5 e 300 toneladas. Sua utilização permite a redução de custos, aumento da capacidade produtiva, aumento da segurança e melhora geral nas condições de trabalho da equipe (PASSOS, 2011).

Uma preocupação quando se empregam pontes rolantes é com a estrutura que deve suportá-la. Segundo Dymond (2005), além da correta identificação dos esforços que as pontes impõem às estruturas, é fundamental a escolha de um sistema estrutural adequado e a execução de detalhes que garantam o seu bom funcionamento. Edifícios industriais com pontes rolantes podem apresentar estruturas mais complexas que galpões simples devido às diferenças no comportamento estrutural. Enquanto em galpões simples o vento é a principal carga variável, quando houver a ponte rolante ela assumirá este papel (PINHO, 2005). Dessa forma, a busca por soluções seguras e econômicas é um fator importante para os edifícios industriais em aço com pontes rolantes.

Neste contexto, as ferramentas de otimização estrutural podem ser importantes no auxílio ao desenvolvimento de projetos seguros e econômicos. A otimização pode alterar a área da seção transversal, remover barras e nós, ou seja, pode reduzir a complexidade do projeto sem comprometer o bom funcionamento da estrutura (MADAH, AMIR, 2017; TORII, LOPEZ E MIGUEL, 2016). No entanto, a execução dos algoritmos de otimização exige

manipulações matemáticas complexas, o que, por muito tempo, inibiu o desenvolvimento da técnica.

A popularização dos computadores e dos métodos numéricos de análise estrutural expandiu a pesquisa dos métodos de otimização e de seu emprego nas mais diversas áreas, entre elas a engenharia estrutural (KAFTKA E GURDAL, 1992). Assim, atualmente é bastante usual o emprego do Método dos Elementos Finitos na otimização estrutural, com o objetivo de obter a máxima resistência com o mínimo consumo de material nas estruturas analisadas (XUE-PING; LIAN-YU; ZHENG-ZHONG, 2017).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é a otimização, via Método dos Elementos Finitos através do software ANSYS (ANSYS,2011), de sistemas estruturais em aço para edifícios industriais de médio porte com pontes rolantes, com a variação dos vãos, das distâncias entre os pórticos, das cargas das pontes rolantes e das tipologias das treliças de cobertura, para avaliar a viabilidade técnica e econômica das diversas configurações analisadas.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Geometria dos Modelos

Foram analisados 36 modelos de edifícios industriais em aço de médio porte com ponte rolante. A Tabela 1 apresenta as características adotadas para os modelos estudados.

Para realizar uma melhor análise da influência da ponte rolante no edifício industrial, a escolha das tipologias das coberturas adotadas foi baseada no estudo de Silva (2018) e Souza, Silva e Paula (2019), que observaram que as treliças triangulares (TT) e as treliças de banzos paralelos (BP) apresentam o menor e o maior consumo de aço, respectivamente. Outro ponto importante a se destacar é que os valores adotados para a distância entre o pilar do pórtico e o pilar de suporte da ponte rolante são as mínimas distâncias necessárias para o emprego de dois perfis I posicionados paralelamente, sem que as

mesas de ambos se tangenciem e possibilitando a utilização de uma treliça de ligação entre eles.

Tabela 1 - Características dos modelos

Fundação: vinculação engastada
Cobertura: treliças de banzos paralelos (BP) e treliças triangulares (TT)
Vãos transversais: 20, 24 e 28 m
Distância entre pórticos: 6 e 7,5 m
Comprimento do edifício: 60 m
Contraventamento longitudinal: em forma de "X" nos pórticos extremos e centrais
Espaçamento horizontal entre as terças: 2 m
Espaçamento vertical entre as vigas de tapamento: 2 m
Altura da base da coluna até o topo do trilho da ponte rolante: 6 m
Distância entre o pilar do pórtico e o pilar de suporte da ponte rolante: 0,5 m para os vãos livres de 20 e 24 m; 0,7 m para o vão livre de 28 m
Capacidade da ponte rolante: 100 kN, 250 kN e 500 kN (FEBA, 2019)

Fonte: Os autores (2021).

Com base nas características estabelecidas, a simbologia adotada para nomear os modelos estudados é a seguinte:

XX-YY-Z-WWW, sendo:

XX – tipologia estrutural da cobertura;

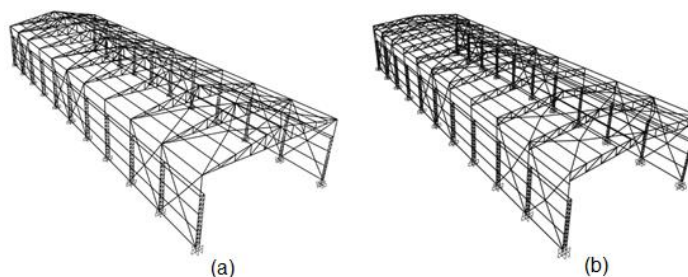
YY – vão da treliça em m;

Z – distância entre os pórticos em m;

WWW – carga da ponte rolante em kN.

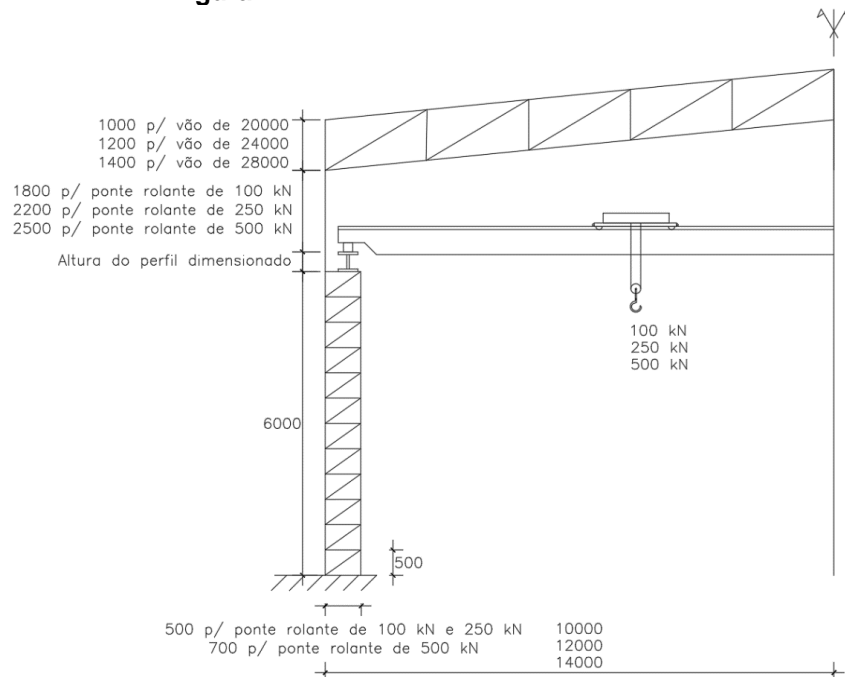
Na Figura 2 apresentam-se os modelos em 3D e na Figura 1 apresentam-se as geometrias dos modelos. Na Tabela 2, apresentam-se as dimensões dos modelos estudados.

Figura 1 - Modelos em 3D: (a) Treliça Triangular;(b) Treliça de Banzos Paralelos.

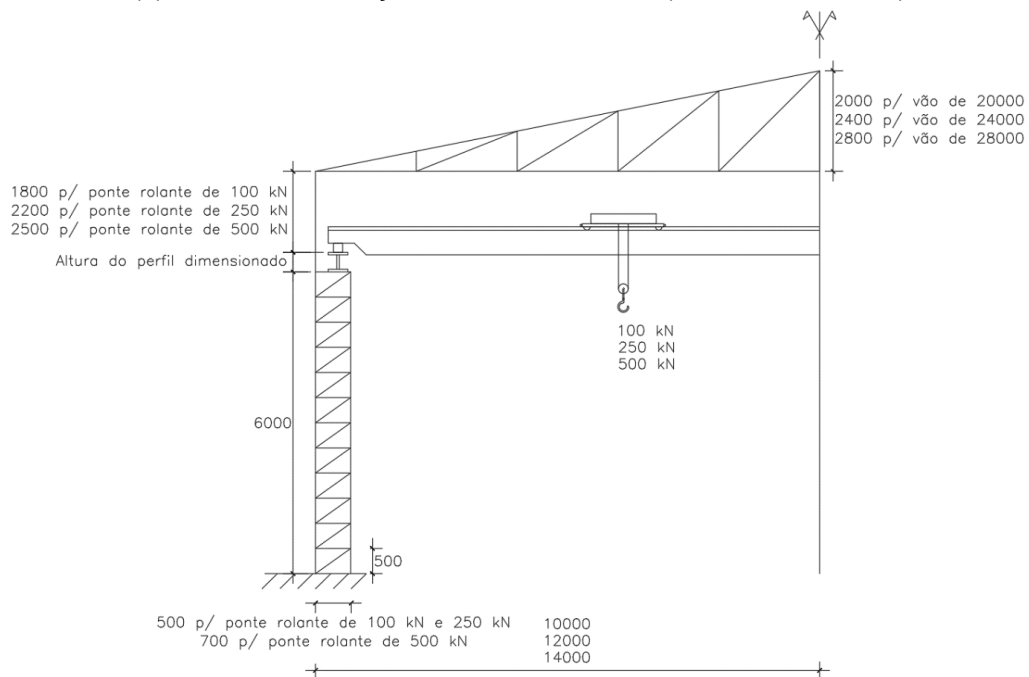


Fonte: Os autores (2021).

Figura 2 - Dimensões dos modelos em mm.



(a) Edifício com Treliça de Banzos Paralelos (dimensões em mm).



(b) Edifício com Treliça Triangular (dimensões em mm).

Fonte: Os autores (2021)

Tabela 2 - Modelos e características dos modelos estudados.

Modelo	Vão (m)	Distância entre Pórticos (m)	Comprimento Total (m)	Tipo de Cobertura	Carga da Ponte Rolante (kN)
TT-20-6-100	20	6	60	TT	100
BP-20-6-100				BP	
TT-20-6-250				TT	250
BP-20-6-250				BP	
TT-20-6-500				TT	500
BP-20-6-500				BP	
TT-20-7,5-100		7,5	60	TT	100
BP-20-7,5-100				BP	
TT-20-7,5-250				TT	250
BP-20-7,5-250				BP	
TT-20-7,5-500				TT	500
BP-20-7,5-500				BP	
TT-24-6-100	24	6	60	TT	100
BP-24-6-100				BP	
TT-24-6-250				TT	250
BP-24-6-250				BP	
TT-24-6-500				TT	500
BP-24-6-500				BP	
TT-24-7,5-100		7,5	60	TT	100
BP-24-7,5-100				BP	
TT-24-7,5-250				TT	250
BP-24-7,5-250				BP	
TT-24-7,5-500				TT	500
BP-24-7,5-500				BP	
TT-28-6-100	28	6	60	TT	100
BP-28-6-100				BP	
TT-28-6-250				TT	250
BP-28-6-250				BP	
TT-28-6-500				TT	500
BP-28-6-500				BP	
TT-28-7,5-100		7,5	60	TT	100
BP-28-7,5-100				BP	
TT-28-7,5-250				TT	250
BP-28-7,5-250				BP	
TT-28-7,5-500				TT	500
BP-28-7,5-500				BP	

Fonte: Os autores (2021).

2.2 Ações Atuantes no Edifício Industrial

As ações ou cargas atuantes são todas as forças que influenciam na estabilidade da estrutura (ABNT, 2008). Essas ações são classificadas em três categorias: ações permanentes, ações variáveis e ações excepcionais (ABNT, 2003).

As ações permanentes atuantes na estrutura do edifício industrial são as cargas do peso próprio da estrutura, dos materiais de acabamento e fechamento. Neste trabalho, as ações referentes ao peso próprio da estrutura em aço foram aplicadas automaticamente no momento que foram estipulados os perfis na análise de dimensionamento no *software* SAP 2000. Apenas o peso próprio da telha foi lançado manualmente, considerando a telha de aço ondulada ou trapezoidal de 0,5 mm de espessura, e aplicado linearmente sobre as terças e vigas laterais.

As ações variáveis ocorrem devido ao uso e ocupação da construção ou por algum evento da natureza (vento, chuva, evento sísmico, etc.) (ABNT, 2008). Neste trabalho foram consideradas como ações variáveis a sobrecarga de cobertura, as cargas de vento e as cargas relativas à ponte rolante. O anexo B da norma NBR 8800 (ABNT, 2008) estabelece o valor de 0,25 kN/m² para sobrecarga da cobertura. E a norma NBR 6120 (ABNT, 2019) recomenda a aplicação do valor de 1 kN em todo elemento isolado de cobertura na posição mais desfavorável.

2.2.1 Ações do Vento

As ações do vento foram obtidas através do programa computacional VISUALVENTOS versão 2.0 (PRAVIA; CHIARELLO, 2003). Seu dimensionamento segue as diretrizes da norma NBR 6123 (ABNT, 1988). Ele é capaz de determinar as ações do vento em construções de planta retangular e telhado composto de duas águas. Foram consideradas as seguintes características para o cálculo: Velocidade básica do vento igual a 35 m/s; Topografia do terreno igual a 1,0; Características dos obstáculos vizinhos à edificação, rugosidade do terreno igual a Categoria IV e Classe C; Tipo de uso e segurança igual a 0,95, considerando o Grupo 3.

2.2.2 Cargas da Ponte Rolante

O cálculo das ações atuantes na ponte rolante foi baseado no Anexo C da norma NBR 6120 (ABNT, 2019). A Tabela 3 apresenta os valores dos cálculos realizados para as pontes rolantes com carga de 100 kN, 250 kN e 500 kN, considerando os vãos livres e distância entre os pórticos em estudo.

Tabela 3 - Resultados das forças para as pontes rolantes estudadas.

Vão (m)	Cl (kN)	F _{Adot} (m)	V _t (m)	C _{máx/Roda} (kN)	L _p (m)	pp _{Ponte} (kN)	C _{Pilar} (kN)	R _v (kN)	F _{ht} (kN)	R _{ht} (kN)	F _l (kN)	R _{F_l} (kN)
20	100	0,5	3,5	80	6	53,5	136,0	170,0	15,4	26,1	16,0	4,0
					7,5		141,5	176,9				
	250	0,5	4	183	6	133,8	292,8	366,0	38,4	65,2	36,6	9,2
					7,5		309,7	387,1				
	500	0,7	4,2	344	6	264,5	536,6	670,8	76,5	130,0	68,8	17,2
					7,5		571,6	714,5				
24	100	0,5	4,5	95	6	59,5	142,5	178,1	16,0	26,1	19,0	4,8
					7,5		153,5	191,8				
	250	0,5	4,5	216	6	148,8	324,0	405,0	39,9	65,2	43,2	10,8
					7,5		348,9	436,2				
	500	0,7	4,8	380	6	294,5	547,2	684,0	79,5	130,0	76,0	19,0
					7,5		596,3	745,4				
28	100	0,5	4,5	95	6	65,5	142,5	178,1	16,6	26,1	19,0	4,8
					7,5		153,5	191,8				
	250	0,5	4,5	216	6	163,8	324,0	405,0	41,4	65,2	43,2	10,8
					7,5		348,9	436,2				
	500	0,7	4,8	380	6	324,5	547,2	684,0	82,5	130,0	76,0	19,0
					7,5		596,3	745,4				

Fonte: Os autores (2021).

2.3 Pré-dimensionamento via SAP 2000

O *software* SAP 2000 é capaz de realizar, de forma integrada, a modelagem, a análise e o dimensionamento das mais variadas estruturas de engenharia, inclusive das pontes rolantes (COMPUTERS E STRUCTURES, 2019).

Para um dimensionamento mais preciso, foram adotados modelos tridimensionais, atentando-se às posições dos perfis, suas inclinações e apoios. Os elementos treliçados, as terças, as vigas laterais e os contraventamentos foram dimensionados com perfil U. Para os pilares, vigas de rolamento e consoles foram adotados perfis I. Todos os perfis adotados podem ser encontrados em catálogo de fabricante nacional.

Após aplicadas todas as cargas e inseridas as combinações das ações, iniciaram-se as análises das solicitações empregadas e definição dos perfis adequados. As dimensões dos perfis foram adotadas de forma homogênea para cada grupo de elementos; por exemplo, todas as terças de um modelo apresentam a mesma seção visando facilitar a extração das características geométricas das seções escolhidas utilizadas nas próximas etapas do estudo. Com base no pré-dimensionamento desenvolvido no SAP 2000, realizou-se o processo de otimização dos modelos através do software ANSYS.

2.4 Otimização via ANSYS

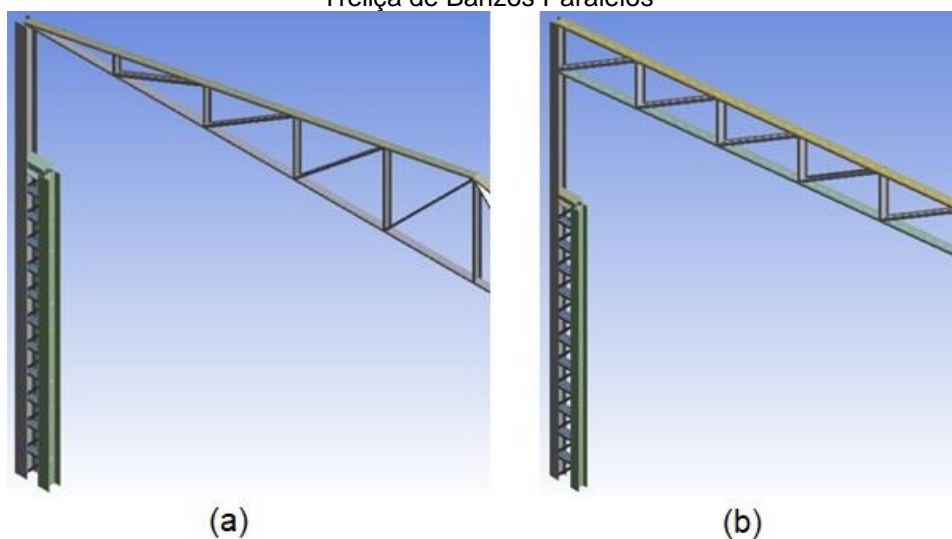
O ANSYS pode ser descrito como um *software* que utiliza o Método dos Elementos Finitos para resolver diversas classes de problemas, como estruturas de engenharia civil, naval, aeronáutica, mecânica, entre outras (ANSYS, 2011).

Com o intuito de facilitar o processamento de dados e diminuir o tempo de resposta da otimização, optou-se por uma análise considerando apenas o pórtico mais solicitado do edifício industrial, ou seja, o pórtico central, e somente uma seção para cada tipo de perfil foi adotada.

Assim, a partir do pré-dimensionamento realizado no SAP 2000, obtiveram-se o perfil e as características geométricas para cada um dos elementos do edifício. Considerando apenas os elementos contidos em um pórtico foram definidos os perfis U e I que apresentaram a maior área de seção para serem adotados nos elementos do pórtico a serem otimizados. Diante dessas informações, realizou-se a modelagem da estrutura, definiram-se as malhas e a aplicaram-se os apoios e restrições.

Na Figura 3 apresentam-se os perfis adotados para cada elemento e as posições empregadas nos pórticos. A Figura 3 (a) e a Figura 3 (b) correspondem, respectivamente, aos modelos com treliça de cobertura do tipo triangular e aos modelos com treliça de cobertura com banzos paralelos.

Figura 3 - Tipos de perfis e suas posições: (a) Pórtico com Treliza Triangular; (b) Pórtico com Treliza de Banzos Paralelos



Fonte: Os autores (2021).

A aplicação das ações no modelo do ANSYS foi feita considerando os resultados das combinações. O valor encontrado foi aplicado nos nós das treliças e dos elementos, respeitando a diferença entre os nós externos e internos na treliça de cobertura. As cargas da ponte rolante não foram consideradas nos cálculos das combinações, sendo lançadas no nó superior do pilar de suporte da ponte.

2.4.1 Definição das Variáveis de Otimização

A função objetivo da otimização é reduzir o peso de aço do pórtico. Para isso foi necessário minimizar a área da seção dos perfis. As variáveis do projeto adotadas foram as dimensões da seção do perfil, ou seja, as dimensões da alma e das mesas. A fim de minimizar a área da seção dos perfis, foi definido que a dimensão máxima admitida seria a determinada no pré-dimensionamento realizada no SAP 2000 e a dimensão mínima adotada seria 60% desse mesmo valor.

Por fim, considerou-se como restrição do problema o deslocamento no topo dos pilares. A tabela C.1 contida no Anexo C da norma NBR 8800 (ABNT, 2008), estabelece os deslocamentos máximos permitidos no topo do pilar do

pórtico, no nível da viga de rolamento em relação à base e a diferença entre o deslocamento máximo no topo do pilar da ponte rolante e no topo do pilar do pórtico.

A Tabela 4 apresenta os valores máximos de deslocamento permitidos considerando as cargas das pontes rolantes em estudo e a altura adotada para os pilares.

Tabela 4 - Deslocamentos máximos.

Características dos Modelos			Pilar Pórtico		Pilar Ponte Rolante		Diferença do Desl. Máx. (mm)	Diferença do Desl. Máx. Permitido NBR 8800 (ABNT, 2008) (mm)			
Cargas	Treliça	Vão Livre (m)	H (m)	Desl. Máx. (mm)	H (m)	Desl. Máx. (mm)					
100 kN	TT	20	8,3	27,67	6	15	12,67	15			
		24									
		28									
	BP	20	9,3	31,00			16,00				
		24	9,5	31,67			16,67				
		28	9,7	32,33			17,33				
250 kN	TT	20	8,7	29,00			6		15	14,00	15
		24									
		28									
	BP	20	9,7	32,33						17,33	
		24	9,9	33,00						18,00	
		28	10,1	33,67						18,67	
500 kN	TT	20	9	30,00	6	15		15,00		15	
		24									
		28									
	BP	20	10	33,33				18,33			
		24	10,2	34,00				19,00			
		28	10,4	34,67				19,67			

Fonte: Os autores (2021).

2.4.2 Resultados da Otimização

O *software ANSYS Workbench* processa as possíveis combinações das variáveis e seleciona 3 candidatos que obtiveram a melhor otimização da área seguindo os limites máximo e mínimo de área, considerando as restrições estabelecidas para o deslocamento.

Para a escolha de qual candidato é o mais adequado, deve-se realizar uma verificação de cada um dos candidatos individualmente. Para isso, foi necessário lançar as novas características geométricas obtidas na interface do ANSYS correspondente ao modelo e verificar se ela suporta as cargas e

apresenta a diferença dos deslocamentos menores ou iguais aos estabelecidos pela norma NBR 8800 (ABNT, 2008). O candidato que obteve os melhores resultados foi escolhido.

2.4.3 Definição dos Perfis Comerciais

Antes de definir os perfis comerciais adequados, foi realizada a análise da esbeltez de todos os perfis listados em um catálogo de fabricante nacional, seguindo os critérios estabelecidos na Tabela F.1 do anexo F da norma NBR 8800 (ABNT, 2008). Após a análise, apenas os perfis comerciais não esbeltos foram selecionados e verificados.

A definição dos perfis comerciais mais indicados após a otimização foi obtida comparando a área dos perfis do candidato escolhido na otimização e a área dos perfis comerciais. O perfil comercial escolhido contém a área da seção superior mais próxima da área da seção otimizada.

Após a escolha, verificou-se se os perfis escolhidos atendem às restrições e suportam as solicitações atuantes nos modelos.

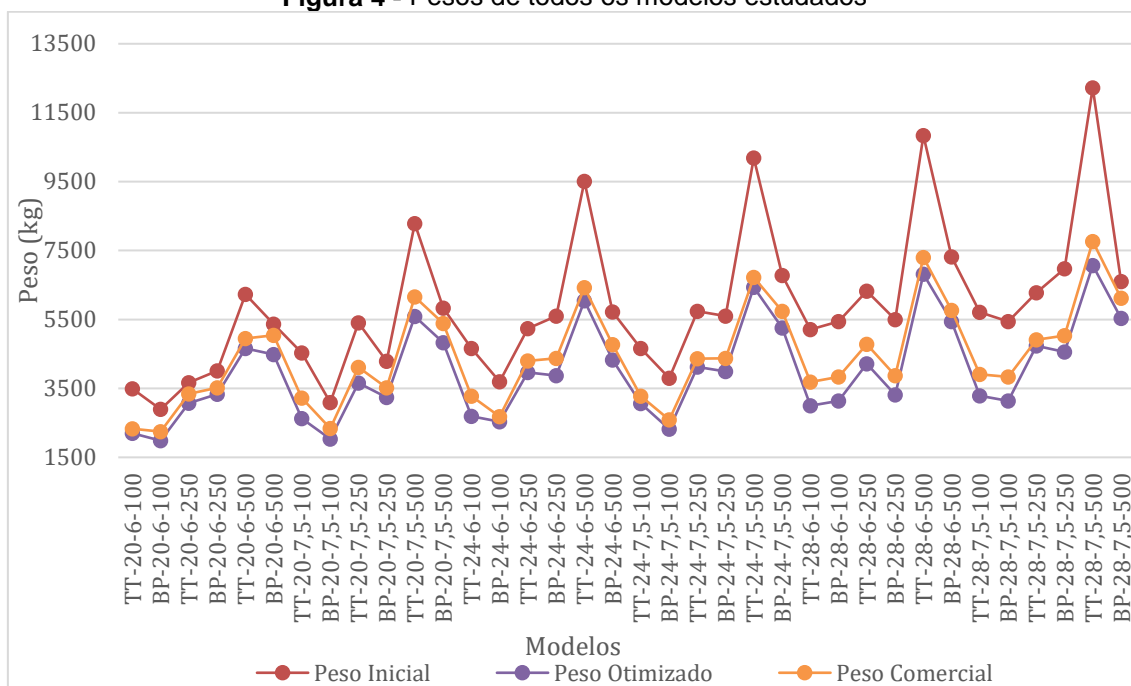
2.5 Resultados e Discussões

2.5.1. Peso de aço

Na Figura 4 apresentam-se os pesos de aço de todos os modelos após o processo de otimização. Verifica-se que o maior peso de aço obtido é referente ao pórtico do modelo TT-28-7,5-500. Pode-se afirmar que os modelos com carga de ponte rolante igual a 500 kN são mais suscetíveis ao aumento dos demais parâmetros, principalmente quando dotados de treliça triangular.

Apenas 4 modelos compostos pela treliça de banzos paralelos obtiveram o peso maior que o seu modelo semelhante dotado de treliça triangular, são eles BP-20-6-250, BP-24-6-250, BP-28-6-100 e BP-28-7,5-250.

Figura 4 - Pesos de todos os modelos estudados

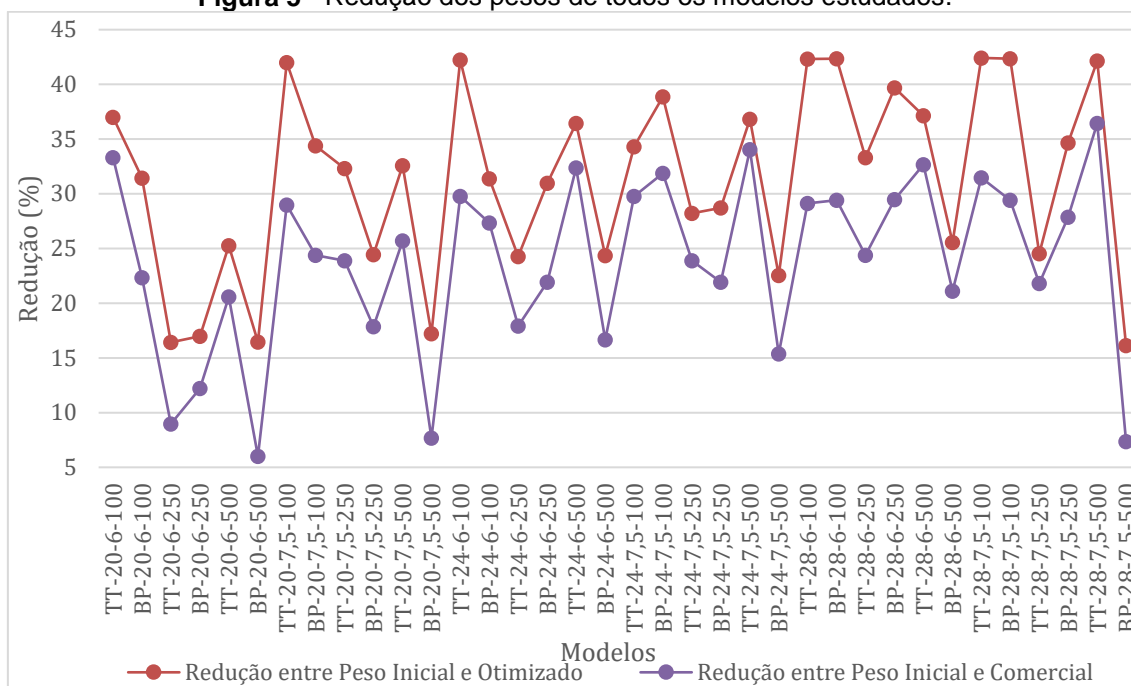


Fonte: Os autores (2021).

Na Figura 5, apresentam-se a redução dos pesos de aço de todos os modelos. Através de sua análise, pode-se verificar que o modelo que apresentou a maior redução de peso após a otimização foi o TT-28-7,5-100, com 42,42% de redução. De forma geral, os modelos compostos de carga de ponte rolante igual a 100 kN apresentam maiores reduções de peso após a otimização. A redução média de todos os modelos foi de 31,34%.

Considerando-se a redução de peso de aço obtida depois da otimização e da escolha do perfil comercial compatível, temos uma média de 23,76% na redução dos pesos dos modelos, onde o modelo com a menor redução obteve uma diminuição de 6,01% (BP-20-6-500), e o modelo com a maior redução obteve 36,44% (TT-28-7,5-500).

Figura 5 - Redução dos pesos de todos os modelos estudados.



Fonte: Os autores (2021).

A Tabela 5 apresenta o peso total de aço dos pórticos de todos os modelos em cada etapa do estudo. Baseando-se nela, é possível comparar os resultados considerando a carga da ponte rolante e as características geométricas dos modelos.

Pode-se destacar, na Tabela 5, que para carga de ponte rolante igual a 100 kN e treliça de cobertura triangular, o peso de aço para os modelos com vão livre de 24 metros são iguais, independentemente da distância entre os pórticos. Para os modelos com carga de ponte rolante igual a 250 kN, temos que os modelos TT-28-6-250 e BP-28-6-250 apresentam pesos muito próximos, indicado que para esses modelos o tipo de treliça de cobertura adotada não influencia significativamente no peso de aço.

Os modelos TT-24-6-100 e TT-24-7,5-100, BP-28-6-100 e BP-28-7,5-100, BP-20-6-250 e BP-20-7,5-250, TT-24-6-250 e TT-24-7,5-250, BP-24-6-250 e BP-24-7,5-250 apresentam os mesmos valores de peso comercial, ou seja, após escolhidos os perfis comerciais adequados, a distância entre os pórticos não influencia no peso de aço do pórtico.

Tabela 5 - Peso do pórtico de todos os modelos estudados.

Modelos		Peso do Pórtico (kg)		
Ponte Rolante	Nomenclatura	Inicial	Otimizado	Comercial
100 kN	TT-20-6-100	3493,09	2200,55	2329,22
	BP-20-6-100	2893,79	1983,78	2247,31
	TT-20-7,5-100	4535,20	2630,54	3220,55
	BP-20-7,5-100	3092,49	2028,98	2338,22
	TT-24-6-100	4662,98	2694,01	3275,61
	BP-24-6-100	3693,91	2534,41	2684,07
	TT-24-7,5-100	4662,98	3062,97	3275,61
	BP-24-7,5-100	4412,86	2568,89	2884,78
	TT-28-6-100	5205,91	3002,17	3689,45
	BP-28-6-100	5437,56	3134,38	3838,69
	TT-28-7,5-100	5708,45	3287,08	3912,57
	BP-28-7,5-100	5437,56	3134,38	3838,69
250 kN	TT-20-6-250	3671,69	3069,09	3342,95
	BP-20-6-250	4009,91	3329,46	3520,31
	TT-20-7,5-250	5407,28	3659,63	4115,90
	BP-20-7,5-250	4285,71	3238,02	3520,31
	TT-24-6-250	5236,58	3965,44	4368,26
	BP-24-6-250	5603,77	3868,25	4375,48
	TT-24-7,5-250	5738,36	4120,02	4368,26
	BP-24-7,5-250	5603,77	3995,05	4375,48
	TT-28-6-250	6324,35	4217,09	4782,10
	BP-28-6-250	6266,18	4091,60	4722,54
	TT-28-7,5-250	6281,29	4740,34	4911,37
	BP-28-7,5-250	6970,75	4556,01	5028,64
500 kN	TT-20-6-500	6233,14	4658,25	4949,51
	BP-20-6-500	5369,10	4485,11	5046,33
	TT-20-7,5-500	8287,18	5587,10	6156,54
	BP-20-7,5-500	5830,48	4826,00	5383,67
	TT-24-6-500	9508,01	6042,54	6429,77
	BP-24-6-500	5722,00	4327,98	4769,00
	TT-24-7,5-500	10186,75	6434,98	6719,43
	BP-24-7,5-500	6781,40	5252,77	5738,07
	TT-28-6-500	10837,77	6813,33	7298,25
	BP-28-6-500	7314,55	5444,64	5770,69
	TT-28-7,5-500	12219,88	7071,49	7767,18
	BP-28-7,5-500	6601,31	5536,36	6116,11

Fonte: Os autores (2021).

Considerando a ponte rolante com carga igual a 500 kN, temos que, para os modelos com vão livre de 28 metros, a treliça de cobertura com banzos

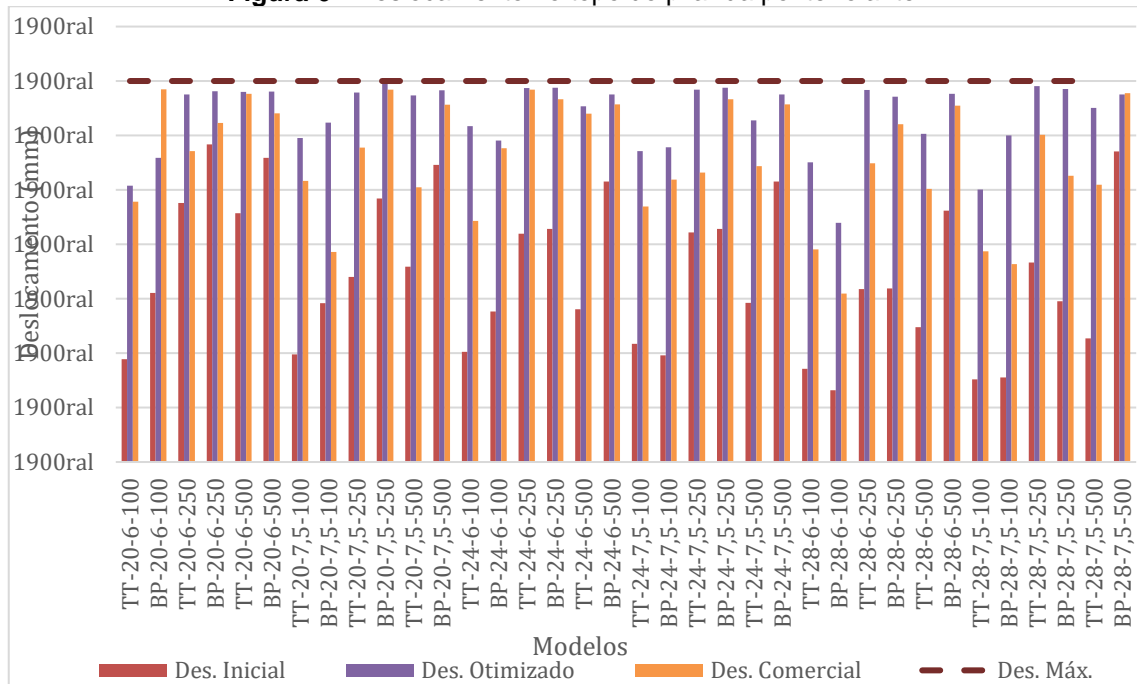
paralelos apresenta o menor peso de aço em ambas as distâncias entre pórticos estudadas.

2.5.2. Deslocamentos

A Figura 6 apresenta os valores obtidos para o deslocamento no topo do pilar da ponte rolante. Na Figura 7 é possível visualizar a diferença entre o deslocamento no topo do pilar da ponte rolante e o deslocamento no topo do pilar do pórtico.

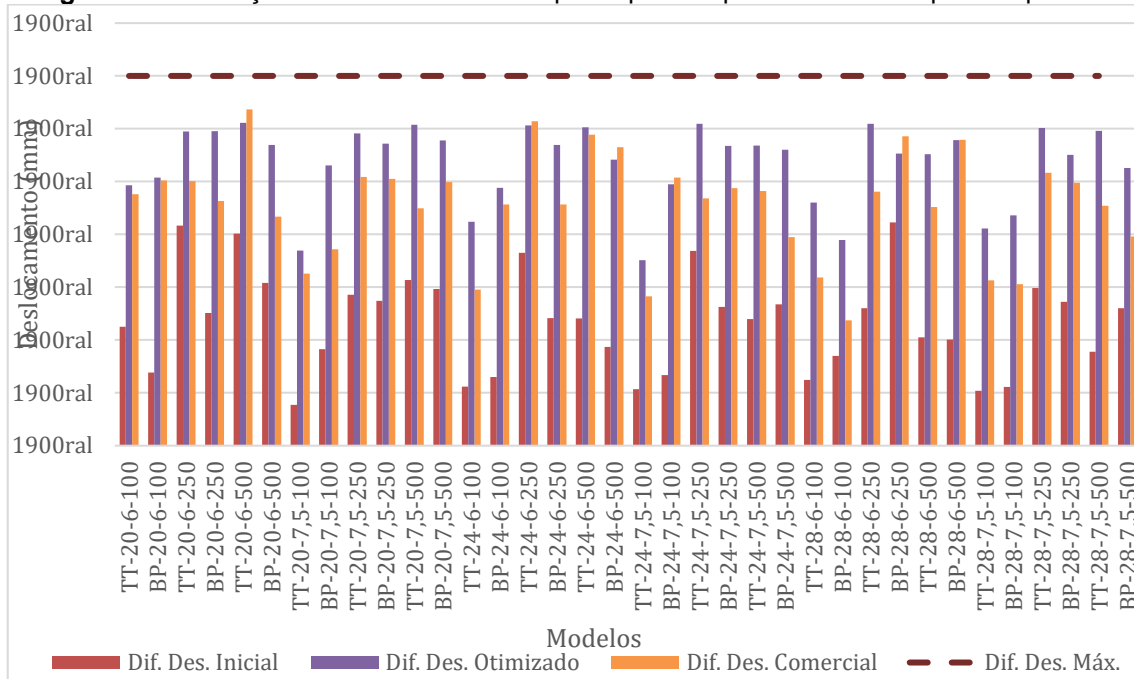
Considerando a análise dos deslocamentos dos pórticos estudados, pode-se observar, Figura 6 e Figura 7, que todos os modelos obtiveram resultados conforme os limites permitidos pela norma NBR 8800 (2008).

Figura 6 - Deslocamento no topo do pilar da ponte rolante.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 7 - Diferença do deslocamento no topo do pilar da ponte rolante e o pilar do pórtico.



Fonte: Os autores (2021).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Utilizando o Método dos Elementos Finitos através dos *softwares* SAP2000 e ANSYS *Workbench*, foram dimensionados e otimizados 36 modelos de edifícios industriais com ponte rolante, variando a carga içada da ponte rolante, os vãos livres, os tipos de treliças de coberturas e as distâncias entre pórticos.

De posse dos resultados obtidos, pode-se afirmar que a média de redução do peso de aço depois da otimização e da escolha do perfil comercial adequado para os modelos, foi de 23,76%, o que indica que a padronização da seção dos perfis auxilia significativamente na economia estrutural, além de facilitar na execução do projeto.

Através do estudo foi possível perceber que os modelos com cobertura composta por treliça de banzos paralelos (BP) apresentaram menores pesos de aço em todas as etapas. Assim, concluímos que esse tipo de treliça é o

mais indicado quando se trata de edifícios industriais com ponte rolante, devido à sua maior estabilidade.

Em geral, os modelos compostos por treliça triangular (TT) obtiveram a maior redução no peso do pórtico após a otimização para todas as cargas de ponte rolantes estudadas. Contudo, esses modelos também apresentaram o maior peso total de aço.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Mestrado profissional em Engenharia das Construções (MECON) da Universidade Federal de Ouro Preto e ao Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ouro Preto pelo suporte a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANSYS. **ANSYS Workbench Help**. Release 14.0. SAS IP, Inc. Canonsburg, Pensilvânia, 2011.

ABNT. NBR 8681: **Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003. 22 p.

ABNT. NBR 6120: **Carga para cálculo de estruturas de edificações**. 2ª edição. Rio de Janeiro, 2019. 60 p.

ABNT. NBR 6123: **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 66 p.

ABNT. NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008. 237 p.

BELLEI, I. H. **Edifícios Industriais em Aço - Projeto e Cálculo**. 5.ed. São Paulo: PINI, 2006

COMPUTERS AND STRUCTURES, INC., **SAP2000 20, Structural Analysis Program**, 2019.

DYMOND, J. S.; **Reliability based codification for the design of overhead travelling crane support structures**. Dissertação de Doctor of Philosophy em Engenharia na Universidade de Stellenbosch. África do Sul. 2005.

FEBA INDÚSTRIA MECÂNICA LTDA. **Catálogo**. Disponível em: <<http://www.feba.com.br/imagens/produto0102.gif>>. Acesso em 16 de outubro de 2019.

HAFTKA, R. T., & GÜRDAL, Z. **Elements of structural optimization**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1992.

MADAH, H.; AMIR, O. **Truss optimization with buckling considerations using geometrically nonlinear beam modeling**. ELSEVIER. Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental, Technion - Instituto de Tecnologia de Israel, Israel. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.07.023>>. Acesso em: 18 de jun. de 2020.

PASSOS, L. C. dos. **Pontes rolantes, guindastes giratórios e acessórios de movimentação de cargas**. Make Engenharia Assessoria e Desenvolvimento. Brasil. 2011.

PINHO, F. O. **Galpões em Pórticos de Aço**. Construção Metálica, n.70. p. 21-27, Mai-Jun, 2005.

PRAVIA, Z. M. C.; CHIARELLO, J. A. **O Programa Visualventos: Determinação de Forças Devidas ao Vento em Edificações de Base Retangular e Cobertura a Duas Águas Segundo a NBR6123**. Passo Fundo, RS. COBENGE, 2003.

SILVA, S. B. F. **Otimização de sistemas estruturais para galpões utilizando método dos elementos finitos**. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2018.

SOUZA, F. T.; SILVA, S. B. F.; PAULA, G. D. **Otimização de treliças de cobertura utilizando o método dos elementos finitos**. 92 f. Revista Técnico-Científica do Crea-PR, ISSN 2358-5420. 18ª edição Paraná, 2019.

TORII, A. LOPEZ, R. H. MIGUEL, L. F. F. **Design complexity control in truss optimization**. Struct Multidisc Optim 54, 289–299 (2016). Disponível em: <<https://doi-org.ez28.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00158-016-1403-8>>. Acesso em: 18 de Junho de 2020.

XUE-PING, L.; LIAN-YU, Z.; ZHENG-ZHONG, L. **Topological Optimizations of Continuum Structure Based on ANSYS**. MATEC Web of Conferences 95, 07020 (2017). DOI: 10.1051/mateconf/20179507020. Tianjin, China. Disponível em: <https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/09/mateconf_icmme2017_07020.pdf>. Acesso em 03 de dezembro de 2020.

Enviado em: 18 jan. 2022.

Aceito em: 19 dez. 2022.

Editor responsável: Àgatha Borges Teixeira