

OTIMIZAÇÃO DE TRELIÇAS DE COBERTURA UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Flávio Teixeira de Souza (Professor, D.Sc., IFMG Campus Ouro Preto);
flavio.souza@ifmg.edu.br

Sheila Bárbara Ferreira da Silva (Engenheira Civil, M. Sc., UFOP)
Geraldo Donizetti de Paula (Professor, D.Sc., UFOP)

Resumo: O objetivo de um projeto estrutural é a obtenção de edificações seguras, estáveis e econômicas e, o emprego de algoritmos de otimização possibilita atingir a estes objetivos de forma otimizada, reduzindo o custo e aumentando a eficiência da estrutura. Estes algoritmos de otimização podem ser utilizados associados a métodos de análise, como o Método dos Elementos Finitos, que potencializam sua aplicação. Este trabalho utiliza esta técnica para a avaliação de treliças de cobertura alterando-se os vãos, distanciamento entre elas, suas tipologias e as seções transversais utilizadas, considerando-se a taxa de consumo de aço como parâmetro. Observou-se que a adoção da treliça de banzos paralelos leva a maior consumo de aço, e que a escolha da seção transversal do perfil estrutural não altera este parâmetro, podendo nortear-se por razões construtivas.

Palavras chave: Método dos Elementos Finitos. Otimização Estrutural. Treliças.

ROOF TRUSSES OPTIMIZATION USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Abstract: Structural design is carried out to assure buildings that are safe, stable and economic, and optimization methods may be used to achieve these targets in an optimized form, reducing the costs and improving structural efficiency. These optimization methods are used with numerical methods as the Finite Element Method. This work uses this technique to evaluate roof trusses, considering modification is spans, spacing between trusses, truss typology and transversal sections, searching for minimizing the structure weight. It was

observed that trusses with parallel chords have higher steel consumption, and that transversal section don't affect this parameter and can be choose for constructive reasons.

Keywords: Finite Element Method. Structural Optimization. Trusses.

1. INTRODUÇÃO

Estratégias de análise e dimensionamento têm sido utilizados com o objetivo de reduzir custos e simplificar os cálculos, garantindo a estabilidade e a economia das estruturas. O Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizado como base para realização desse trabalho, constitui uma dessas importantes ferramentas (CHEN E KIM, 1997; CHAN E CHUI, 2000). Este método baseia-se na divisão do sistema contínuo em um número finito de elementos discretos, e os deslocamentos, esforços e tensões são obtidos a partir de funções de interpolação convenientemente adotadas.

O desenvolvimento destas ferramentas e a popularização dos computadores permitiu ainda o desenvolvimento e a disseminação das técnicas de otimização, que transformam o ciclo de projeto manual em um processo interativo computadorizado (KOU MOUSIS E GEORGIU, 1994; RAJAN, 1995; CORTÊS, 2002; MARINHO, 2004; KRIPKA ET AL, 2013; OLIVEIRA E FALCÓN, 2013; COSTA E MELO, 2016; MELLAERT ET AL, 2017). Tratam-se de técnicas que se prestam à minimização de uma única função (a função objetivo) sujeita a restrições. Ressalta-se que, mesmo com a disponibilidade de recursos computacionais, os processos de otimização são, em geral, bastante complexos, o que explica a sua pouca utilização nas práticas correntes de projeto.

Alguns programas comerciais trazem módulos de otimização. Entre eles está o ANSYS (ANSYS, 2010). Nesse trabalho, esse programa foi utilizado para avaliar o desempenho de soluções usualmente utilizadas para a cobertura de galpões industriais, buscando a minimização do peso de aço empregado nas treliças, considerando o Método de Otimização de Primeira Ordem. Este método utiliza a informação da derivada durante as análises, considerando a correlação entre o gradiente das variáveis dependentes e as variáveis de projeto. Isto faz com que tenha elevado custo computacional.

Este trabalho justifica-se pelo fato de que a análise e o dimensionamento destas treliças são geralmente realizados buscando uma boa correlação custo/benefício, sem, no

entanto, utilizar os recursos de otimização disponíveis, levando, muitas vezes, a escolhas inadequadas neste sentido.

Assim sendo, o objetivo deste trabalho é indicar, considerando resultados obtidos por meio da otimização estrutural, diretrizes que norteiem a escolha da tipologia das treliças e das seções transversais a ser utilizadas, abrangendo uma variedade considerável de vãos de cobertura e também de espaçamento entre as treliças.

2. METODOLOGIA

2.1. Critérios de parametrização das treliças

Foi realizada uma série de 90 análises de treliças de cobertura usuais em galpões, abrangendo diversas características que influenciam sua resposta estrutural. Desta forma, foram adotadas três tipologias e modificados o vão livre da treliça, a distância entre as mesmas e o tipo de perfil formado a frio empregado em sua construção. A variação destes parâmetros teve o objetivo de mensurar suas influências na taxa de aço da estrutura.

Dentre as diversas tipologias usuais para treliças, foram adotadas neste trabalho as de banzo paralelos, as trapezoidais e as triangulares, que são largamente adotadas. A Tabela 1 apresenta cada tipologia, sua simbologia e as dimensões do vão para cada uma delas. Pode-se observar nesta tabela que as dimensões da treliça são tomadas em função de seu vão, sendo a proporção fixa durante a análise.

Para cada tipologia e para cada vão, foram consideradas três distâncias usuais em projetos de galpões entre treliças de cobertura: 6 metros, 7,5 metros e 9 metros. Além disto, foi analisada a utilização de perfis formados a frio de seção U e de seção U enrijecido, também os tipos mais usuais na prática. A Tabela 2 apresenta um resumo dos modelos analisados, considerando-se a seguinte nomenclatura:

XXX _YY_Z, onde:

XXX – tipologia estrutural;

YY – vão da treliça (m);

Z – distância entre as treliças no galpão (m).

Tabela 1 - Tipologias estruturais das treliças.

Geometria	Tipo	Simbologia	L (m)
	Banzos Paralelos	PAR	16 20 24 28 32
	Trapezoidal	TRA	16 20 24 28 32
	Triangular	TRI	16 20 24 28 32

Tabela 2. Modelos estruturais analisados.

Banzos Paralelos	Trapezoidal	Triangular
PAR_16_6	TRA_16_6	TRI_16_6
PAR_20_6	TRA_20_6	TRI_20_6
PAR_24_6	TRA_24_6	TRI_24_6
PAR_28_6	TRA_28_6	TRI_28_6
PAR_32_6	TRA_32_6	TRI_32_6
PAR_16_7,5	TRA_16_7,5	TRI_16_7,5
PAR_20_7,5	TRA_20_7,5	TRI_20_7,5
PAR_24_7,5	TRA_24_7,5	TRI_24_7,5
PAR_28_7,5	TRA_28_7,5	TRI_28_7,5
PAR_32_7,5	TRA_32_7,5	TRI_32_7,5
PAR_16_9	TRA_16_9	TRI_16_9
PAR_20_9	TRA_20_9	TRI_20_9
PAR_24_9	TRA_24_9	TRI_24_9
PAR_28_9	TRA_28_9	TRI_28_9
PAR_32_9	TRA_32_9	TRI_32_9

2.2. Carregamentos adotados

As ações atuantes nos modelos foram determinadas de acordo com as recomendações do item 4.7 da norma NBR 8800 (ABNT, 2008), ações causadas pelo uso e ocupação da edificação no dimensionamento de estruturas de aço. São elas: ações permanentes (peso próprio) e ações variáveis (sobrecarga de cobertura e ação do vento).

Para galpões industriais leves, as ações permanentes correspondem ao peso próprio dos elementos que compõem a estrutura e dos materiais ligados a ela. Como ações permanentes foram considerados o peso próprio das treliças e o peso dos demais elementos, telhas, terças e elementos secundários de cobertura.

As ações variáveis são representadas pela sobrecarga de cobertura (Q) e pela ação do vento (V), ambas muito relevantes no dimensionamento da estrutura. Conforme recomendação do Anexo B da norma NBR 8800 (ABNT, 2008), adotou-se, para todos os modelos, uma sobrecarga mínima de 0,25 kN/m². A Tabela 3 apresenta as cargas permanentes e as sobrecargas aplicadas ao modelo. Ressalta-se que na determinação do peso próprio da estrutura considerou-se inicialmente o peso da maior seção comercial disponível no mercado para cada uma das hipóteses consideradas.

Tabela 3. Ações permanentes e variáveis aplicadas ao modelo estrutural.

	Perfil U 300x100x8	Perfil U _e 300x100x25x4,75	Sobrecarga de Cobertura (Q)
	Área: 37,62 cm ²	Área: 24,64 cm ²	0,25 (kN/m ²)
L (m)	Ações Permanentes (kN/m)		SC (kN/m)
6	-0,95	-0,85	-1,5
7,5	-1,11	-1,02	-1,875
9	-1,28	-1,18	-2,25

Na determinação dos carregamentos de vento, foram seguidas as recomendações da norma NBR 6123 (ABNT, 1988), considerando edifício de planta retangular com cobertura em duas águas. Considerou-se a velocidade básica do vento (V_0) igual a 35 m/s, terreno plano ou fracamente acidentado, com poucos quebra-ventos. Consideraram-se ainda, edificações com alto fator de ocupação, e foi utilizado o programa Visual Ventos (Pravia e Chiarello, 2003) nos cálculos. A Tabela 4 resume os carregamentos aplicados às treliças devido ao vento.

Verifica-se que as solicitações do vento transversal ($V=90^\circ$) levaram as piores condições de carregamento. As combinações de ações permanentes e variáveis para os estados limites últimos foram determinadas conforme prescrição da norma NBR 14762 (ABNT, 2010). Ressalta-se que as cargas são concentradas nos nós posto que se tratam de treliças.

Tabela 4. Cargas de vento para as coberturas estudadas.

		Largura Transversal (m)	V= 0°		V= 90°		
			q ₁ (kN/m)	q ₂ (kN/m)	q ₃ (kN/m)	q ₄ (kN/m)	q ₅ (kN/m)
L = 60m	Distância entre pórticos: 6m	16	-2,64	2,31	-3,79	-1,32	-1,65
		20	-2,67	2,84	-3,83	-1,34	-1,67
		24	-2,70	2,37	-3,88	-1,35	-1,69
		28	-2,73	2,39	-3,92	-1,37	-1,71
		32	-2,76	2,42	-3,96	-1,38	-1,47
L = 60m	Distância entre pórticos: 7,5m	16	-3,30	2,89	-4,74	-1,65	-2,06
		20	-3,34	2,92	-4,79	-1,67	-2,09
		24	-3,38	2,96	-4,85	-1,69	-2,11
		28	-3,42	2,99	-4,90	-1,71	-2,13
		32	-3,45	3,02	-4,95	-1,73	-1,83
L = 63m	Distância entre pórticos: 9m	16	-3,96	3,47	-5,68	-1,98	-2,48
		20	-4,01	3,51	-5,75	-2,00	-2,51
		24	-4,05	3,55	-5,82	-2,03	-2,53
		28	-4,10	3,59	-5,88	-2,05	-2,56
		32	-4,14	3,62	-5,94	-2,07	-2,10

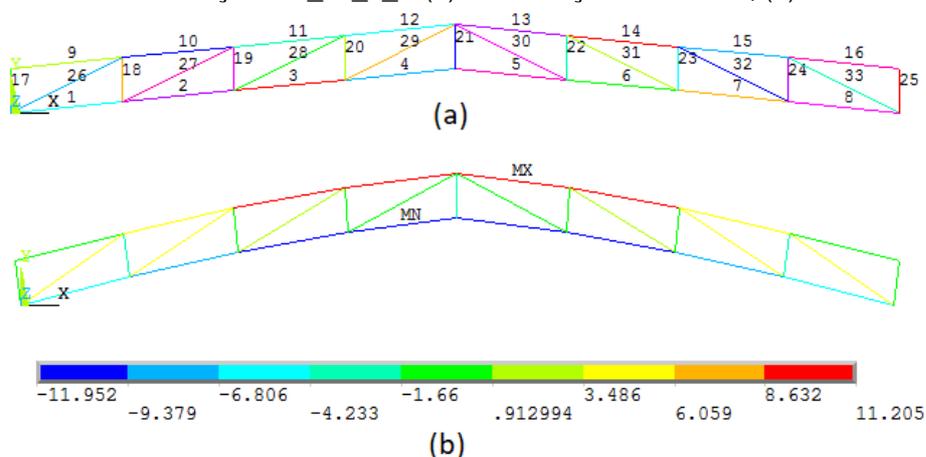
2.3. Metodologia de otimização

O processo de otimização das treliças foi realizado no *software* ANSYS (ANSYS, 2010), no módulo próprio para esta função. Inicialmente, deve-se resolver a estrutura em estudo, a fim de se avaliar o comportamento estrutural da mesma. Foram definidos os seguintes parâmetros:

- Função objetivo: o volume final da estrutura;
- Variáveis de projeto: áreas das seções transversais dos banzos (A_1), montantes (A_2) e diagonais (A_3);
- Variáveis de estado: tensões axiais em cada um dos elementos.

A Figura 1 apresenta as tensões normais obtidas nas barras de uma treliça após a análise estática da mesma para o carregamento proposto. Pode-se identificar a ocorrência de maiores valores de tensão nas barras 11 a 14. Percebe-se, mesmo assim, que esses valores são relativamente baixos, o que pode ser explicado pela utilização, como ponto de partida do processo de otimização, da maior seção comercial disponível para o perfil estudado. O objetivo do processo de otimização é exatamente a redução da área da seção transversal do perfil (variável de projeto), aproximando as tensões axiais nas barras (variável de estado) dos valores de escoamento do aço, obtendo-se assim a estrutura ótima em termos de segurança e economia.

Figura 1. Resultados da treliça PAR_16_6_U (a) Identificação das barras; (b) Tensões axiais (MPa).



Para a obtenção de valores adequados no processo de otimização, é necessária a fixação de um intervalo de busca para a variável de projeto. Observou-se, no desenvolvimento do modelo, grande sensibilidade do mesmo em relação ao intervalo preestabelecido, ou seja, a adoção de intervalos adequados para cada elemento da treliça é fundamental para acelerar a convergência do modelo. Desta forma, foram testadas hipóteses buscando melhores resultados para cada um dos modelos analisados. A Tabela 5 apresenta os intervalos adotados para o modelo PAR_16_6. Observa-se que são adotados limites maiores para a área dos banzos da treliça (A_1), uma vez que esses são os elementos mais solicitados na estrutura. Para as demais variáveis de projeto, A_2 (montantes) e A_3

(diagonais), são adotados valores menores. Pode-se observar ainda nessa tabela, as aproximações que levaram a menores valores da função objetivo, o volume da estrutura.

Para a definição dos intervalos de busca para as variáveis de estado, utiliza-se a seguinte técnica: para cada modelo analisado, as tensões axiais nas barras (SAXL) são identificadas, a fim de se determinar as maiores solicitações para os três elementos propostos: banzos, montantes e diagonais.

Tabela 5. Intervalos de busca das variáveis de projeto.

Modelo PAR_16_6					
Tipos de Perfil	Área Inicial (cm²)	A₁, A₂, A₃[*] (cm²)		Volume (cm³)	
		Mínimo	Máximo		
Perfil U	37,62	0,0,0	38, 30, 30		178,8
			30, 22, 22		96,95
			22, 14, 14		95,34
			14, 7, 7		133,45
			7,3.5,3.5		-
Perfil U _e	24,64	0,0,0	25, 20, 20		95,27
			20, 15, 15		94,92
			15, 10, 10		94,19
			10, 5, 5		108,56
			5,2.5,2.5		-
Banzos (A ₁), Montantes (A ₂) e Diagonais (A ₃)					

Na Figura 1, que apresenta os resultados para o modelo BP-16-6-Perfil U, podem-se observar as seguintes solicitações axiais:

- Elemento 01 – Banzos - identificadas as barras 4 e 5 com o valor de -11,95 MPa como sendo as de maior solicitação em módulo;
- Elemento 02 – Montantes - identificada a barra 21 com o valor de -2,75 MPa como sendo a de maior solicitação em módulo;
- Elemento 03 – Diagonais - identificadas as barras 26 e 33 com o valor de 5,82 MPa como sendo as de maior solicitação em módulo.

Uma vez definidas as barras mais solicitadas para cada um dos elementos, foram definidos intervalos que abrangessem o valor observado, sendo limitados pela resistência de

cálculo ao escoamento do aço (f_{yd}). A Tabela 6 apresenta os valores adotados para a treliça PAR_16_6.

Os procedimentos apresentados foram estendidos a todos os 90 modelos analisados.

Tabela 6. Intervalos de busca das variáveis de estado.

Modelo PAR-16-6				
Tipos de Perfil	Tensão correspondente aos diferentes elementos		Variáveis de Estado	
			Tensão Axial (SAXL) MPa	
			Mínimo	Máximo
Perfil U	SAXL 1	4	-227	-18,24
	SAXL 2	21	-227	-2,75
	SAXL 3	26	5,82	227
Perfil U _e	SAXL 1	4	-227	-18,64
	SAXL 2	21	-227	-4,2
	SAXL 3	26	9,07	227

2.4. Determinação da taxa de consumo de aço

As áreas das seções obtidas no processo de otimização são, em geral, diferentes das áreas dos perfis disponíveis comercialmente. Neste trabalho procurou-se, visando a aplicabilidade das análises, aproximar o resultado teórico de valores práticos, uma vez que pretende-se a formulação de diretrizes para a concepção de treliças de cobertura. Para isso, inicialmente, consideraram-se os valores teóricos obtidos, como apresentado na Tabela 7, para a treliça de banzos paralelos, espaçamento de 6 m e todos os vãos propostos.

A partir dos resultados das áreas finais, a tabela de perfis comerciais foi consultada para a adoção de um perfil com área igual ou imediatamente superior à obtida no processo de otimização. Em seguida, outros dados foram obtidos com o objetivo de se verificar a taxa de aço para cada modelo, conforme apresentado na

Tipologia	Elementos	Barras mais solicitadas	Área inicial (cm²)	Volume inicial (cm³)	Intervalo das variáveis de projeto DV's (cm²)	Intervalo das variáveis de estado SV's (MPa)	Áreas Finais (cm²)	Tensões finais (MPa)	Volum e final (cm³)
PAR_16_6	1	4	37,62	2153,68	0 22	-227 -18	2,07	-213	95,34
	2	21			0 14	-227 -2,8	1,22	-122	
	3	26			0 14	5,82 227	1,11	213	

PAR_20_6	1	5	37,62	2803,57	0	30	-227	-5,2	2,64	-215	145,99
	2	26			0	22	-227	-3,4	1,22	-104	
	3	32			0	22	6,34	227	1,12	213	
PAR_24_6	1	6	37,62	3503,74	0	30	-227	-19	3,22	-216	210,49
	2	31			0	22	-227	-4,1	1,26	-121	
	3	38			0	22	6,89	227	1,21	214	
PAR_28_6	1	7	37,62	4256,21	0	30	-227	-22	3,78	-218	291,01
	2	36			0	22	-227	-4,8	1,28	-139	
	3	44			0	22	7,44	227	1,43	194	
PAR_32_6	1	8	37,62	5062,55	0	22	-227	-26	4,44	-216	380,91
	2	41			0	14	-227	-5,5	1,26	-162	
	3	50			0	14	227	8	1,4	214	

Tabela 8 para a treliça de banzos paralelos, onde tem-se:

- Peso: comprimento do elemento multiplicado pela massa do perfil;
- Área de influência: vão livre multiplicado pelo espaçamento entre as treliças;
- Taxa de aço: peso dividido pela área de influência.

Ressalta-se que esta análise foi realizada para as três tipologias avaliadas, abrangendo os 90 modelos simulados.

Tabela 7. Resultados da treliça com banzos paralelos e espaçamento de 6 m.

Tipologia	Elementos	Barras mais solicitadas	Área inicial (cm ²)	Volume inicial (cm ³)	Intervalo das variáveis de projeto DV's (cm ²)	Intervalo das variáveis de estado SV's (MPa)	Áreas Finais (cm ²)	Tensões finais (MPa)	Volum e final (cm ³)		
PAR_16_6	1	4	37,62	2153,68	0	22	-227	-18	2,07	-213	95,34
	2	21			0	14	-227	-2,8	1,22	-122	
	3	26			0	14	5,82	227	1,11	213	
PAR_20_6	1	5	37,62	2803,57	0	30	-227	-5,2	2,64	-215	145,99
	2	26			0	22	-227	-3,4	1,22	-104	
	3	32			0	22	6,34	227	1,12	213	
PAR_24_6	1	6	37,62	3503,74	0	30	-227	-19	3,22	-216	210,49
	2	31			0	22	-227	-4,1	1,26	-121	
	3	38			0	22	6,89	227	1,21	214	
PAR_28_6	1	7	37,62	4256,21	0	30	-227	-22	3,78	-218	291,01
	2	36			0	22	-227	-4,8	1,28	-139	
	3	44			0	22	7,44	227	1,43	194	
PAR_32_6	1	8	37,62	5062,55	0	22	-227	-26	4,44	-216	380,91
	2	41			0	14	-227	-5,5	1,26	-162	
	3	50			0	14	227	8	1,4	214	

Tabela 8. Taxas de aço considerando as seções comerciais.

Tipologia	Áreas Finais (cm ²)	Perfil U mais adequado	Dados do Perfil escolhido		Compr. do elemento (m)	Peso (kg)	Área de Influência (m)	Taxa de aço (kg/m ²)	Σ Taxa de aço (kg/m ²)
			Área (cm ²)	Massa (kg/m)					
PAR_16_6	2,07	75x40x1,2	2,25	1,77	32,08	56,78	96	0,591	0,825
	1,22	50x25x1,50	1,43	1,12	7,2	8,06		0,084	
	1,11	50x25x1,20	1,15	0,9	16	14,4		0,15	
PAR_20_6	2,64	50x25x3	2,7	2,12	40,02	84,84	120	0,707	0,939
	1,22	50x25x1,50	1,43	1,12	8,8	9,86		0,082	
	1,12	50x25x1,20	1,15	0,9	20	18		0,15	
PAR_24_6	3,22	75x40x2,25	3,32	2,61	48,12	125,6	144	0,872	1,14
	1,26	50x25x1,50	1,43	1,12	10,4	11,65		0,081	
	1,21	50x25x1,50	1,43	1,12	24	26,88		0,187	
PAR_28_6	3,78	75x40x2,65	3,88	3,04	56,14	170,7	168	1,016	1,283
	1,28	50x25x1,50	1,43	1,12	12	13,44		0,08	
	1,43	50x25x1,50	1,43	1,12	28	31,36		0,187	
PAR_32_6	4,44	100x40x2,65	4,54	3,56	64,16	228,4	192	1,19	1,514
	1,26	50x25x1,50	1,43	1,12	13,6	15,23		0,079	
	1,45	50x25x2	1,87	1,47	32	47,04		0,245	

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As taxas de consumo de aço foram obtidas para cada modelo estudado, utilizando-se o procedimento descrito no item 2.4. Foram variadas as tipologias de treliças, seus vãos e espaçamentos entre elas, e, os diversos resultados obtidos nas simulações, foram comparados com a finalidade de avaliar a viabilidade de cada tipologia estudada, considerando-se perfis comerciais de área da seção transversal mais próxima das áreas ideais fornecidas pelo processo de otimização.

3.1. Taxas de consumo de aço considerando-se perfis de seção U.

A Figura 2 apresenta as taxas de consumo de aço utilizando-se perfis formados a frio de seção U. Observa-se que, conforme esperado, o aumento do vão da treliça leva a crescentes taxas de consumo de aço.

Pode-se observar também, que as treliças de banzos paralelos (PAR) levaram a maiores taxas de consumo de aço para todos os vãos e espaçamentos considerados no processo de otimização do que as demais tipologias. Esta tipologia leva a taxas acima de 1

kg de aço/m² para vãos acima de 20 m, o que pode ser representativo em galpões, que são construções de grande área.

Observa-se que as tipologias que apresentam melhor desempenho no que se refere ao menor consumo de aço, inferiores a 1 kg/m², são treliças triangulares (TRI) e as treliças trapezoidais (TRA). Para o vão livre de 16 metros destacam-se as treliças trapezoidais espaçadas em 7,5 metros; para o vão livre de 20 metros, o destaque é a tipologia triangular, espaçada de 9 metros; em seguida, na largura de 24 metros, o melhor desempenho é também da treliça triangular, porém espaçada de 7,5 metros; para os vãos de 28 e 32 metros tem-se resultados muito próximos entre a treliça triangular espaçada de 9 metros e a treliça trapezoidal espaçada de 6 em 6 metros.

3.2. Taxas de consumo de aço considerando-se perfis de seção U enrijecido.

A Figura 3 apresenta as taxas de consumo de aço utilizando-se perfis formados a frio de seção U enrijecido. Assim como na análise anterior, o aumento do vão da treliça leva a crescentes taxas de consumo de aço. Outra similaridade com as análises da seção U é o fato de que a tipologia de banzos paralelos leva a taxas de consumo de aço maiores que as demais tipologias (acima de 1 kg/m² para vãos acima de 20 m). Para as treliças triangulares (TRI) e trapezoidais (TRA), observa-se uma proximidade entre os valores obtidos, com taxas em geral abaixo de 1 kg de aço/m². Ressalta-se o bom desempenho da tipologia TT para o vão livre de 20 metros, para todos os espaçamentos propostos. Destacam-se os desempenhos semelhantes dos modelos triangulares (TRI) espaçados entre 7,5 e 9 metros para os vãos livres de 16, 20 e 24 metros, o que permite uma escolha aleatória sem prejuízos. Para os vãos livres de 16 e 28 metros o melhor desempenho é da tipologia trapezoidal (TRA) no espaçamento de 9 e 7,5 metros, respectivamente. Para os intervalos de 20, 24 e 32 metros recomenda-se a utilização da tipologia triangular (TRI), com destaque para os espaçamentos de 7,5 e 9 metros.

Figura 2. Taxas de consumo de aço para seção U.

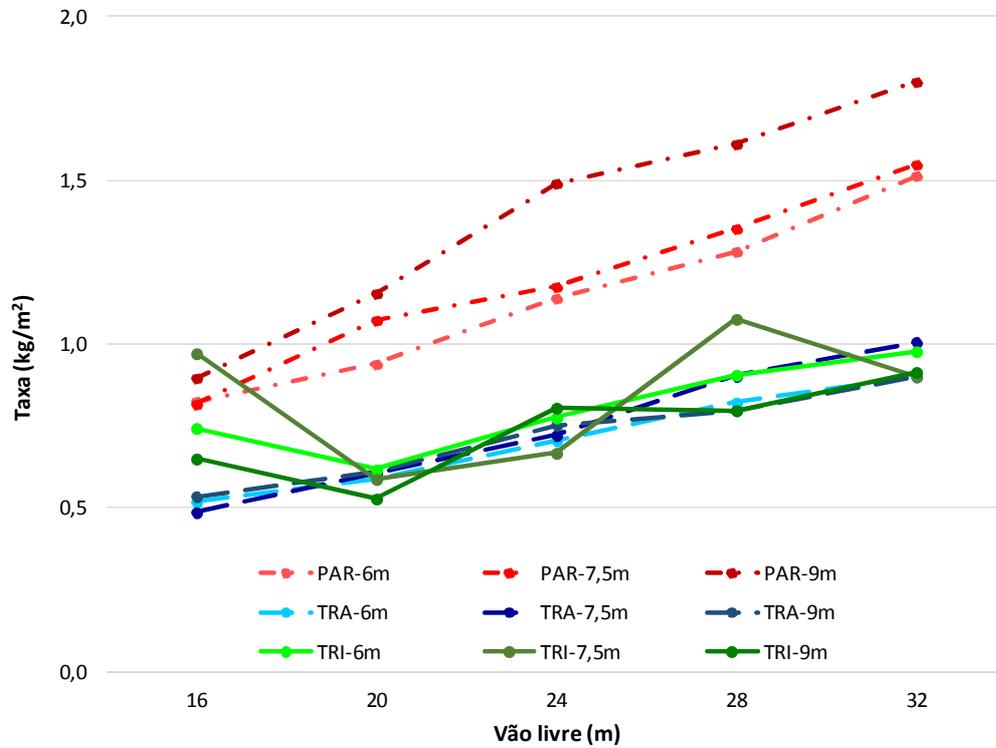
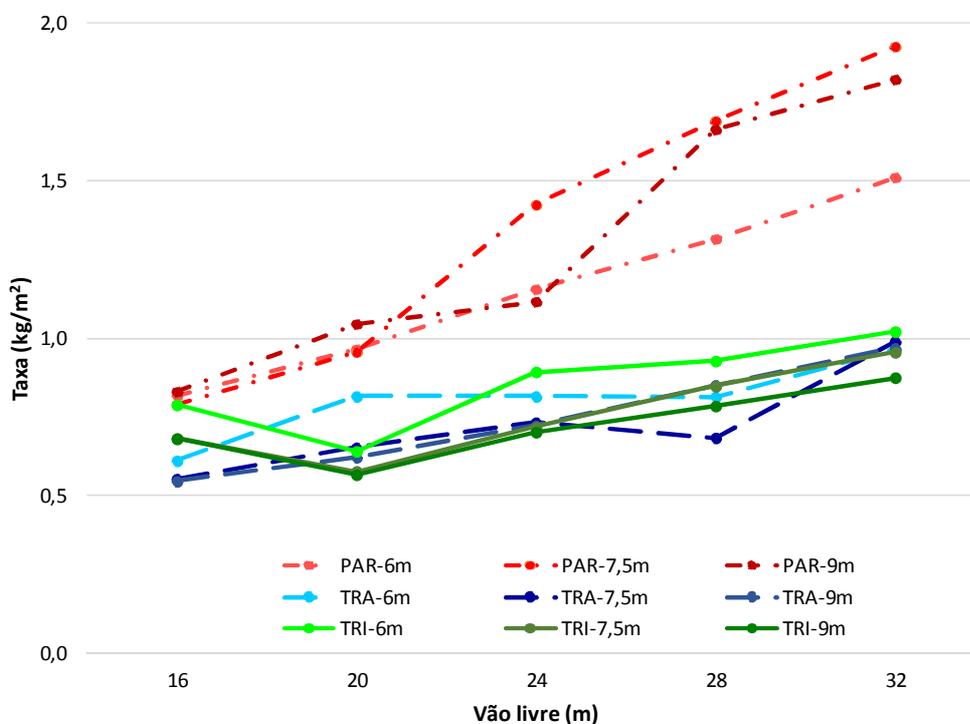


Figura 3. Taxas de consumo de aço para seção U enrijecido.



3.3. Comparação dos resultados.

A Tabela 9 apresenta a comparação das taxas de consumo obtidas para os modelos adotados. Nesta tabela são destacadas, para cada situação, a menor taxa de consumo obtida.

Em geral, a tabela demonstra que a utilização dos perfis comerciais U e U enrijecidos levam a resultados bastante similares, não ocorrendo clara vantagem na utilização de um deles se for considerado o consumo de aço. A Tabela 10 apresenta as seções vantajosas para cada uma das tipologias estudadas.

De modo geral, pode-se concluir que a taxa de consumo de aço não é o fator preponderante para a adoção da seção U ou U enrijecido, podendo assim essa escolha ser direcionada por aspectos construtivos, tais como a facilidade de execução das ligações e a facilidade de manutenção da estrutura.

Tabela 9. Taxas de consumo de aço para os modelos analisados (kg/m²).

L = 6	Tipologias	Perfis	Vão Livre (m)					
			16	20	24	28	32	

L = 7,5 m	PAR	U	0,825	0,939	1,14	1,283	1,514	
		U _e	0,818	0,965	1,155	1,315	1,511	
	TRA	U	0,518	0,59	0,706	0,821	0,901	
		U _e	0,61	0,815	0,815	0,814	0,964	
	TRI	U	0,744	0,618	0,776	0,906	0,978	
		U _e	0,788	0,64	0,893	0,927	1,021	
	L = 9 m	PAR	U	0,817	1,073	1,175	1,352	1,548
			U _e	0,789	0,956	1,424	1,691	1,927
		TRA	U	0,487	0,607	0,722	0,903	1,006
			U _e	0,552	0,652	0,732	0,683	0,99
		TRI	U	0,972	0,588	0,668	1,077	0,901
			U _e	0,682	0,577	0,717	0,847	0,955

Tabela 10. Seção com menor taxa de consumo de aço.

Tipologias	L (m)	Vão Livre (m)				
		16	20	24	28	32
PAR	6	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U	Perfil U	Perfil U _e
	7,5	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U	Perfil U
	9	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U
TRA	6	Perfil U	Perfil U	Perfil U	Perfil U _e	Perfil U
	7,5	Perfil U	Perfil U	Perfil U	Perfil U _e	Perfil U _e
	9	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U
TRI	6	Perfil U				
	7,5	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U	Perfil U _e	Perfil U
	9	Perfil U	Perfil U	Perfil U _e	Perfil U _e	Perfil U _e

Conforme observado anteriormente, as treliças triangulares (TRI) e trapezoidais (TRA) são aquelas que levam a menores taxas de consumo de aço. Assim, a Tabela 11 apresenta uma indicação da melhor opção entre essas duas tipologias para os vãos e espaçamentos entre treliças avaliados neste trabalho. Observa-se que para o menor espaçamento (6 m), a treliça trapezoidal é mais vantajosa para todos os vãos analisados; para o espaçamento intermediário (7,5m) as tipologias são equivalentes e para o maior espaçamento (9 m) a treliça triangular é vantajosa para todos os vãos, exceto o menor deles.

Tabela 11. Tipologias mais viáveis de treliças.

L (m)	Tipologias	Vão Livre (m)				
		16	20	24	28	32
6	TRA	X	X	X	X	X
	TRI					
7,5	TRA	X			X	
	TRI		X	X		X
9	TRA	X				
	TRI		X	X	X	X

4. CONCLUSÕES

Este trabalho utilizou o Método de Otimização de Primeira Ordem, disponível no programa comercial ANSYS, para fazer a avaliação de tipologias usuais de treliças de cobertura, considerando uma diversidade de vãos e espaçamentos entre as treliças, com o objetivo de definir diretrizes para a concepção do projeto de galpões industriais.

Foram comparadas as treliças de banzos paralelos, trapezoidais e triangulares. Observou-se que a treliça de banzos paralelos exige, em geral, maiores taxas de consumo de aço do que as trapezoidais e triangulares, que podem levar a uma considerável economia na estrutura. Observa-se ainda que a utilização de seções U ou U enrijecido não leva a grandes alterações no peso de aço, podendo essa escolha ser norteadada por razões construtivas.

Observa-se, portanto, que a utilização dos métodos de otimização pode ser uma importante ferramenta na concepção de sistemas estruturais como as treliças de cobertura, uma vez que os resultados obtidos são referências para a escolha de sua geometria e seções transversais com o objetivo de minimizar o peso da estrutura e, conseqüentemente, seu custo, sem prescindir da segurança estrutural.

REFERÊNCIAS

- ANSYS. **Users Manual for revision 11. Swanson Analysis Systems Inc. Inc.**, Houston, PA, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123: Forças Devidas ao Vento em Edificações**. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800: Projeto de Estruturas de Aço e de Estrutura Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14762:Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio**. Rio de Janeiro, 2010.

CHAN, S.L.; CHUI, P. P. T. **Non-Linear Static and Cyclic Analysis of Steel Frames with Semi-rigid Connections**, Elsevier, Oxford, 2000.

CHEN, W. F.; KIM, S-E. **LRFD Steel Design using Advanced Analysis**. CRC Press, Inc., Florida, USA, 1997.

CORTES, C. F. M. **Otimização de treliças planas**. 2002. 158. Dissertação de Mestrado-Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

COSTA, L. A. A. da; MELO C. D. R. Otimização de treliças metálicas utilizando a ferramenta solver do *microsoft* Excel. **CILAMCE,XXXVII Iberian Latin American Congress on Computation Methods in Engineering**, 2016, Brasília. p. 1-5.

KOUMOUSIS, V. K.; GEORGIU, P. G. Genetic algorithms in discrete optimization of steel truss roofs. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 8, n. 3, p. 309-325, July. 1994.

KRIPKA, M.; PRAVIA, Z. M. C.; DIAS, M. M.; MEDEIROS, G. F. de. Minimização de peso de treliças de alumínio para otimização simultânea da seção transversal dos elementos e da geometria; análise numérica e validação experimental. **REEC- Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v.7, n. 2, p. 19-26. 2013.

MARINHO, I. J. P. **Otimização de estruturas via Ansys**. 2004. Sistema Maxwell. Cap. 04. Tese de Doutorado, PUC RIO, 2004.

MELLAERT, R. V.; MELA, K.; TIAINE, T.; HEINISUO, M.; LOMBAERT, G.; SCHEVENELS, M. Discrete sizing optimization of trussed steel portal frames according to Eurocode 3. **EUROSTEEL Copenhagen**, Denmark, p. 3990-3999, September 13 -15. 2017.

OLIVEIRA, S. R. C. de.; FALCÓN, G. A. S. Otimização geométrica de treliças planas utilizadas em coberturas metálicas. **Vértices**, Campos dos Goytacazes/ RJ, v.15, n. 2, p. 101-115, maio/ago. 2013.

PRAVIA, Z. M. C.; CHIARELLO, J. A. Programa Visual Ventos: Determinação de forças devidas ao vento em edificações de base retangular e cobertura a duas águas segundo a NBR 6123. **COBENGE – XXXI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, 2003, Rio de Janeiro. p. 1-9.

RAJAN, S. D. Sizing, shape, and topology design optimization of trusses using genetic algorithm. **Journal of structural engineering**, v.121, n. 10, p. 1480-1487, October. 1995.