

Comportamento de estruturas tubulares metálicas em função da inclinação dos planos de cobertura e dos tirantes

Dogmar Antonio de Souza Junior⁽¹⁾, Francisco Antonio Romero Gesualdo⁽²⁾

Trabalho recebido em 8/2/2008 e aprovado para publicação em 29/5/2009.

Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico global de estruturas tubulares metálicas espaciais compostas por duas águas e formadas por barras entrelaçadas, empregando o método dos algoritmos genéticos. Todas as avaliações foram feitas a partir do programa computacional OTR (Otimização de estruturas Reticuladas) desenvolvido especificamente para a otimização e dimensionamento de estruturas reticuladas. A função objetivo definida para realização das análises é o consumo de tubos dos planos de cobertura. Em cada geração, o programa OTR gera a malha geométrica da estrutura, o carregamento e, determina os deslocamentos e esforços nas barras para o indivíduo melhor adaptado ao problema. Em seguida, é feito o dimensionamento segundo os critérios da ABNT NBR 8800:1986. Caso o indivíduo não atenda estes critérios, ele é descartado da população. Dessa maneira, pode-se obter conclusões importantes acerca do comportamento mecânico global da estrutura a partir dos resultados obtidos na minimização do consumo de tubos. Neste trabalho, são apresentados os resultados obtidos para duas estruturas com diferentes vãos de cobertura em função do ângulo de inclinação dos planos de cobertura e do diâmetro dos tirantes que ligam os pilares de apoio.

Palavras-chave: Otimização. Estruturas tubulares metálicas. Algoritmo genético.

⁽¹⁾ Professor Doutor, Faculdade de Engenharia Civil - UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121, Bairro Santa Mônica, Uberlândia, MG, 38400-902, 55 34 3239-4135. E-mail: souza.dogmar@gmail.com

⁽²⁾ Professor Doutor, Faculdade de Engenharia Civil - UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121, Bairro Santa Mônica, Uberlândia, MG, 38400-902, 55 34 3239-4135. E-mail: gesualdo@ufu.br

1 Introdução

Em se tratando de estruturas metálicas, uma alternativa construtiva que está ganhando espaço no mercado são as estruturas tubulares. Elas são formadas por perfis de seção transversal fechada oca, o que representa uma vantagem estrutural em relação aos perfis metálicos tradicionais. Devido à sua geometria, o uso de perfis tubulares na construção de estruturas metálicas traz diversas vantagens. Apresentam grande resistência à torção e ótima resistência à flexão. Os tubos redondos apresentam a mesma segurança à flambagem em todas as direções. No caso de pilares, a possibilidade de enchimento com concreto aumenta a resistência mecânica e evita flambagem local. A ausência de entranhas, quinas e pontos de obstrução diminuem a resistência a correntes de vento e evitam acúmulo de água.

Especialmente a utilização de tubos circulares, produz interessante efeito arquitetônico, pois a seção transversal circular não tem quinas expostas e não tem pontos agudos. Sua forma é harmônica e tem menor área de exposição. A inexistência de quinas favorece a proteção à corrosão, pois evita o acúmulo de sujeira e umidade, sendo altamente recomendada para ambientes onde a limpeza é importante, tais como indústrias de alimentos e farmacêuticas (Packer and Henderson 1997).

Os perfis tubulares ainda são usados na construção de veículos rodoviários e ferroviários, como chassis e carroçarias de caminhões, ônibus, reboques, vagões de trem, caminhões-tanque, vagões de bonde, plataformas de assistência móveis, instalações de lavagem mecânica, plataformas hidráulicas, chassis de locomotivas, instalações offshore (Menezes and Galgoul 2002) e na indústria naval, torres de perfuração (Carvalho, Pinho and Battista 2002), heliportos em plataformas, torres de radares para navios e de linhas de transmissão (Gabrielli and Neves 2004). Além de outras aplicações também são utilizados como travessas e dispositivos para aparelhos e maquinarias agrícolas, na construção ou movimentação de cargas como estruturas de guias. Como se percebe, os perfis tubulares admitem o seu emprego como elemento estrutural em diversas aplicações.

No Brasil, a construção metálica, neste início de século, se apresenta com arranjos estruturais arrojados e sofisticados, utilizada nos mais diversos ambientes, abrangendo desde a moradia popular até aeroportos, shoppings, hospitais e edifícios comerciais diversos, ainda que os números sejam relativamente pequenos.

No sentido de promover a industrialização e automação dos processos construtivos utilizando perfis metálicos, a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (FEC – UNICAMP) em convênio com a empresa Vallourec & Mannesmann do Brasil desenvolveu, de acordo com a ABNT NBR 8800:1986, um programa computacional denominado “AutoMETAL – V e M do Brasil – UNICAMP”. Este programa tem ajudado a disseminar a tecnologia do uso de estruturas de aço constituídas de perfis tubulares, automatizando todo o processo de um projeto de treliças planas (Requena et al. 2001; Souza, Branco e Requena 2004).

Pulilo Filho, Aguiar e Arcaro (2002) desenvolveram outro programa computacional, para projetar treliças espaciais metálicas.

As exigências do mercado são cada vez maiores por sistemas construtivos industrializados cujas soluções técnicas sejam adequadas ao rápido crescimento computacional disponível, visando a substituição da improvisação pela tecnologia, a ampliação das opções construtivas com o uso de aços de maior resistência, a diminuição do desperdício e do custo de produção. Sendo assim, torna-se relevante o estudo de novos sistemas construtivos que permitam aumentar os níveis de competitividade de qualidade e custo.

2 Tipo de estrutura analisada

O modelo estrutural espacial com barras cruzadas é formado por uma malha reticulada entrelaçada nos dois planos da cobertura, como mostra a Figura 1.

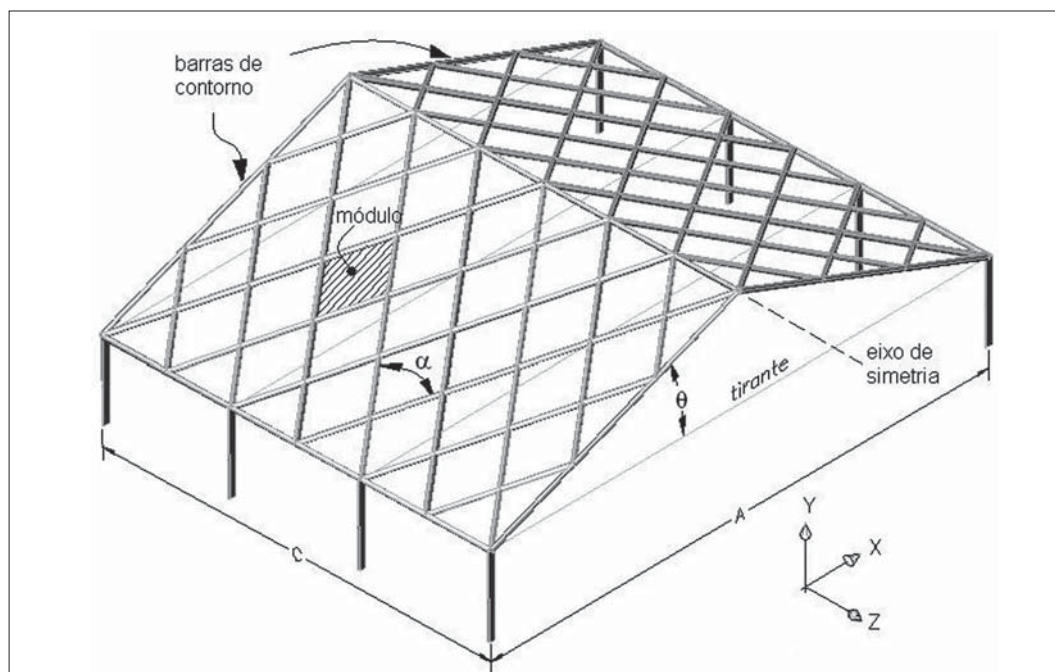


Figura 1 – Estrutura espacial tubular metálica com barras cruzadas para cobertura

A configuração geométrica das barras favorece uma melhor distribuição dos esforços entre elas. Considerando, as características geométricas dos perfis tubulares metálicos, esta homogeneização das barras parece ser um fator bastante interessante. Outro fato importante é a possibilidade de fixação dos elementos de cobertura diretamente sobre esta malha geométrica, reduzindo o custo da estrutura.

Definidas as dimensões da cobertura existem diversas possibilidades de combinação das variáveis (quantidade de módulos nas direções x e z, ângulo de inclinação da cobertura (θ), seção transversal do perfil tubular) para formar o reticulado, implicando em diferentes valores para o consumo de tubos.

Selecionar os parâmetros adequados que minimizem o consumo de tubos da estrutura é uma tarefa difícil, porém muito importante para um mercado cada vez mais exigente. A solução deste problema será obtida utilizando-se a metodologia dos algoritmos genéticos implementada no programa computacional OTR (Souza Jr 2005). Este programa foi desenvolvido especificamente para minimização do consumo de tubos e dimensionamento de estruturas espaciais tubulares metálicas seguindo os critérios da norma ABNT NBR 8800:1986.

3 Influência do ângulo de inclinação de cobertura no comportamento mecânico da estrutura

A geometria de uma estrutura é definida por alguns parâmetros, que podem influenciar negativa ou positivamente no seu comportamento mecânico. Logo, torna-se importante conhecer detalhadamente a influência destes parâmetros para utilizar o modelo estrutural na sua máxima capacidade resistente e consequentemente, obtendo economia de material.

Neste trabalho, serão apresentados os resultados obtidos sobre a influência do ângulo de inclinação da cobertura e dos tirantes no comportamento mecânico global de estruturas tubulares metálicas espaciais com barras cruzadas. Para isto, minimizou-se o consumo de tubos por meio do programa computacional OTR. Admite-se que a minimização do consumo de tubos está diretamente ligada ao comportamento mecânico global da estrutura, pois a mesma é dimensionada iterativamente durante a execução do programa. Os resultados apresentados a seguir, referem-se a dois modelos cujas dimensões dos vãos de cobertura são, modelo 1 ($12 \times 15\text{m}$) e modelo 2 ($15 \times 25\text{m}$).

A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros geométricos e as propriedades mecânicas dos materiais fornecidos para o OTR.

Tabela 1 – Parâmetros geométricos e propriedades mecânicas dos materiais

Comprimento máximo da barra padrão	200 cm
Ângulo mínimo de inclinação	1°
Ângulo máximo de inclinação	30°
Número máximo de módulos – direção x	10
Número máximo de módulos – direção z	14
Módulo de elasticidade do tubo (E)	21000 kN/cm ²
Módulo de elasticidade transversal do tubo (G)	8076 kN/cm ²
Limite de escoamento do tubo (f_y)	32 kN/cm ²
Seção transversal do pilar de apoio	30×30 cm
Módulo de elasticidade do concreto	3500 kN/cm ²

Os valores mínimos para a quantidade de módulos nas direções x e z são determinados internamente no programa OTR em função do comprimento máximo da barra padrão, através das Equações (1) e (2):

$$m_{\min} = \text{trunc} \frac{A}{2.L_{\max}} \quad (1)$$

$$n_{\min} = \text{trunc} \frac{C}{2.L_{\max}} \quad (2)$$

Durante a otimização, para cada indivíduo são associados quatro valores, um para cada variável do problema. A quarta variável representa o perfil tubular adotado para a estrutura, cujas propriedades geométricas estão arquivadas num banco de dados. Isto torna possível determinar em cada geração o peso próprio das barras e acrescentá-lo às outras ações apresentadas na Tabela 2. Este procedimento é realizado a cada geração para o indivíduo melhor adaptado ao problema, ou seja, com o menor consumo de tubos. Conforme indica a norma ABNT NBR 8800:1986 o carregamento da estrutura é realizado em duas etapas: para o estado limite de serviço e para o estado limite último. Em cada caso são feitas as verificações pertinentes.

Tabela 2 – Valores usados para definir o carregamento da estrutura

Peso próprio das telhas	0,25 kN/m ²
Sobrecarga	0,25 N/m ²
Altura da edificação	5,00 m
Velocidade básica do vento	35 m/s
Fator S_1	1,00
Fator S_2	1,00
Fator S_3	1,00
Ângulo de incidência do vento	0°/90°
Quatro faces permeáveis	-

Em conformidade com a ABNT NBR 6123:1988, o valor adotado para o Fator S_1 corresponde a situação de Terreno plano ou pouco acidentado. A Categoria II e a Classe A foi a referência adotada para o Fator S_2 . Para o Fator estatístico S_3 , o valor admitido corresponde ao Grupo 2 da Tabela 3 da ABNT NBR 6123:1988.

Foram utilizados cinco operadores genéticos: seleção (método da roleta), recombinação discreta, mutação uniforme, mutação restrita e elitismo. A Tabela 3 apresenta os valores específicos para a execução do AG. Como critério de parada adotou-se apenas o critério da máxima geração.

Tabela 3 – Valores para os parâmetros do AG

Geração	200
População	50
Taxa de recombinação	0,80
Taxa de mutação	0,05

Conforme a norma ABNT NBR 8800:1986, foram adotadas a Equação (3) para a combinação normal do estado limite último e a Equação (4) para a combinação do estado limite de serviço.

$$F_d = 1,3 \cdot G + 1,4 \cdot Q_1 + 1,4 \cdot 0,6 \cdot Q_2 \quad (3)$$

$$F_d = G + Q_1 + Q_2 \quad (4)$$

onde: G representa as ações permanentes, Q_1 a sobrecarga e Q_2 a ação de vento.

Os resultados obtidos para o deslocamento vertical máximo do estado limite de serviço e o consumo de tubos para o modelo 1 estão apresentados na Tabela 4 e na Figura 2. Para os dois modelos analisados foram admitidas barras ligando os nós de cumeeira e os nós no contorno da estrutura. Não há tirantes ligando os pilares de apoio. O uso do programa computacional OTR não requer equipamento com grande capacidade de memória ou processado de alta velocidade. Para ilustrar, estas análises foram feitas em equipamento com 1,6 GHz e 256 Mb de memória RAM, sem maiores problemas.

Tabela 4 – Resultados obtidos do deslocamento vertical máximo (estado limite de serviço) da estrutura e do consumo de tubos do modelo 1

Ângulo de inclinação	Deslocamento máximo da estrutura (cm)	Consumo de tubos (kg)	Ângulo de inclinação	Deslocamento máximo da estrutura (cm)	Consumo de tubos (kg)
4°	7,71	927	15°	5,17	952
5°	6,75	928	17°	5,15	960
6°	6,20	929	20°	5,16	975
7°	5,86	931	22°	5,17	986
8°	5,64	932	24°	5,20	999
11°	5,31	939	27°	5,23	1013
13°	5,21	945	—	—	—

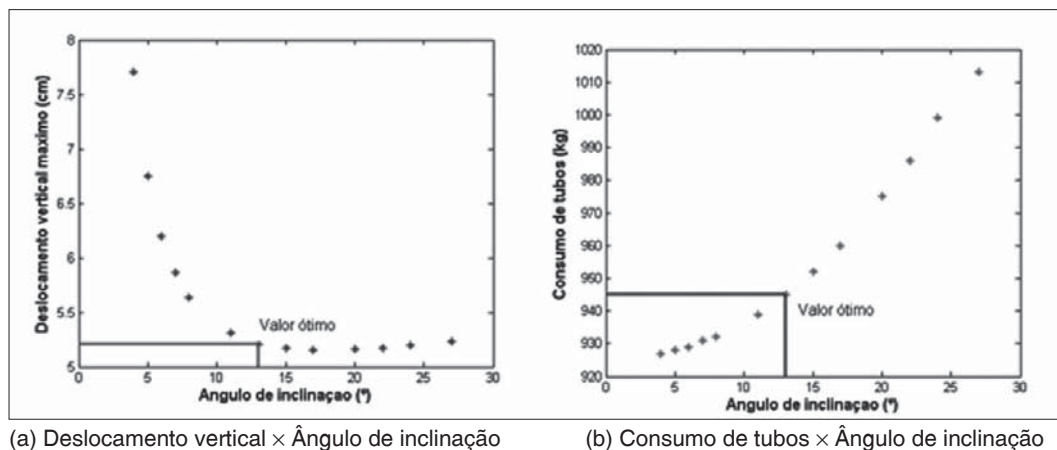
(a) Deslocamento vertical $\times$ Ângulo de inclinação(b) Consumo de tubos $\times$ Ângulo de inclinação

Figura 2 – Resultados obtidos para o deslocamento vertical máximo do modelo 1

Nota-se pela Figura 2a que ilustra o deslocamento vertical máximo da estrutura em função do ângulo de inclinação do plano de cobertura, que o menor deslocamento vertical máximo da estrutura ocorre para a inclinação da cobertura igual a 17° . Analisando juntamente as Figuras 2a e 2b observa-se que a estrutura com menor consumo de tubos e que atende o estado limite de serviço da ABNT NBR 8800:1986 possui ângulo de inclinação de 6° , cujo deslocamento vertical máximo é de 6,20 cm ($< L/180 = 6,67$ cm). Entretanto, este caso não atende os critérios de dimensionamento à flexo-compressão e/ou flexotração do estado limite último. Portanto, a estrutura que atende aos dois estados limites, último e de serviço, e tem o menor consumo de tubos possui ângulo de inclinação igual a 13° . Os parâmetros geométricos otimizados estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros otimizados da estrutura de cobertura do modelo 1

Número de módulos na direção x	4
Número de módulos na direção z	8
Ângulo de inclinação	13°
Comprimento da barra (cm)	182
Diâmetro do tubo (cm)	4,83
Espessura do tubo (cm)	0,28

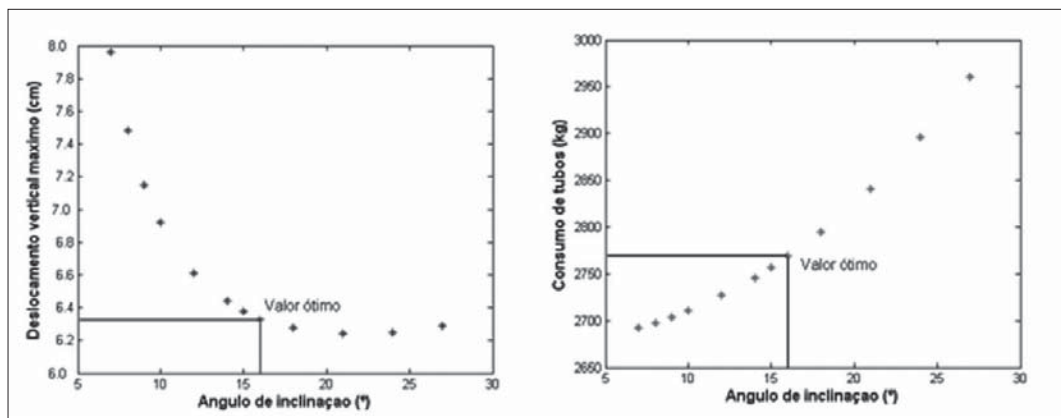
Os resultados obtidos para o modelo 2 são apresentados nas Tabelas 6 e 7, e em seguida, ilustrados na Figura 3. Novamente, o comportamento da função do deslocamento vertical máximo em função do ângulo de inclinação é semelhante ao obtido para o modelo 1. Verifica-se que a estrutura que atende todos os requisitos de dimensionamento da ABNT NBR 8800:1986 e apresenta um menor consumo de tubos tem ângulo de inclinação igual a 16° .

Tabela 6 – Resultados obtidos do deslocamento vertical máximo (estado limite de serviço) da estrutura e do consumo de tubos do modelo 2

Ângulo de inclinação	Deslocamento máximo da estrutura (cm)	Consumo de tubos (kg)	Ângulo de inclinação	Deslocamento máximo da estrutura (cm)	Consumo de tubos (kg)
7°	7,96	2692	15°	6,38	2757
8°	7,48	2698	16°	6,33	2769
9°	7,15	2704	18°	6,28	2795
10°	6,92	2711	21°	6,24	2841
12°	6,61	2727	24°	6,25	2896
14°	6,44	2746	27°	6,29	2961

Tabela 7 – Parâmetros otimizados da estrutura de cobertura do modelo 2

Número de módulos na direção x	6
Número de módulos na direção z	13
Ângulo de inclinação	16°
Comprimento da barra (cm)	160
Diâmetro do tubo (cm)	6,03
Espessura do tubo (cm)	0,32



(a) Deslocamento vertical $\times$ Ângulo de inclinação

(b) Consumo de tubos $\times$ Ângulo de inclinação

Figura 3 – Resultados obtidos para o deslocamento vertical máximo – estado limite de serviço – do modelo 2

4 Influência dos tirantes no comportamento mecânico da estrutura

O uso de tirantes neste tipo de estrutura é bastante interessante, pois diminui os esforços nos pilares de apoio e os deslocamentos nos planos de cobertura, quando não ocorre inversão de esforços devida ao vento. Assim sendo, para avaliar a influência dos tirantes na minimização do consumo de aço da estrutura, os modelos 1 e 2 foram otimizados para tirantes com diâmetro de 3/16" à 1". A escolha desta variação de diâmetros teve o objetivo principal de observar o comportamento do sistema estrutural. Os resultados obtidos na otimização do consumo de tubos para o modelo 1 em função do diâmetro dos tirantes são apresentados na Tabela 8.

Vale ressaltar que o deslocamento vertical máximo apresentado na Tabela 8 refere-se ao estado limite de serviço. Na estrutura otimizada não foram consideradas barras fazendo o contorno da estrutura, nem barras ligando os nós de cumeeira, entretanto, admitiu-se tirantes ligando todos os pilares de apoio.

Tabela 8 – Resultados obtidos para a otimização da estrutura de cobertura do modelo 1 com diferentes valores para o diâmetro do tirante

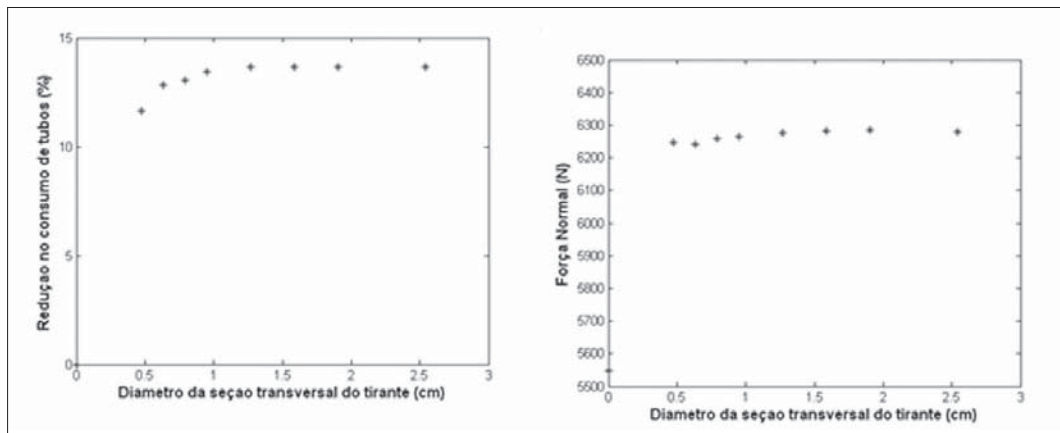
	Diâmetro da seção transversal do tirante (pol)								
	–	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4	1
Número de módulos na direção x	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Número de módulos na direção z	9	8	8	8	8	8	8	8	8
Ângulo de inclinação (°)	22	16	13	12	11	10	10	10	10
Diâmetro do tubo (cm)	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83
Espessura do tubo (cm)	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Comprimento da barra (cm)	185	184	182	181	180	180	180	180	180
Deslocamento vertical máximo (cm)	4,63	5,38	5,46	5,44	5,45	5,41	5,41	5,41	5,41
Consumo de tubos (kg)	834	737	727	725	722	720	720	720	720

Nota-se pela Figura 4a que a taxa de redução no consumo de tubos é mais significativa para diâmetros até 0,63 cm (1/4"). A partir deste ponto, a redução no consumo de tubos tende a estabilizar em torno de 14%. Observa-se pela Figura 4b que o esforço normal máximo atuante nos pilares aumenta com a introdução dos tirantes. Isto ocorre principalmente porque o número otimizado de módulos na direção z diminui de 9 (sem tirante) para 8 (com tirante). Percebe-se ainda, que este aumento tem pouca variação com o diâmetro do tirante.

A redução no consumo de tubos é determinada pela Equação 5.

$$R = \frac{|C_i - C_l|}{C_l} \cdot 100\% \quad (5)$$

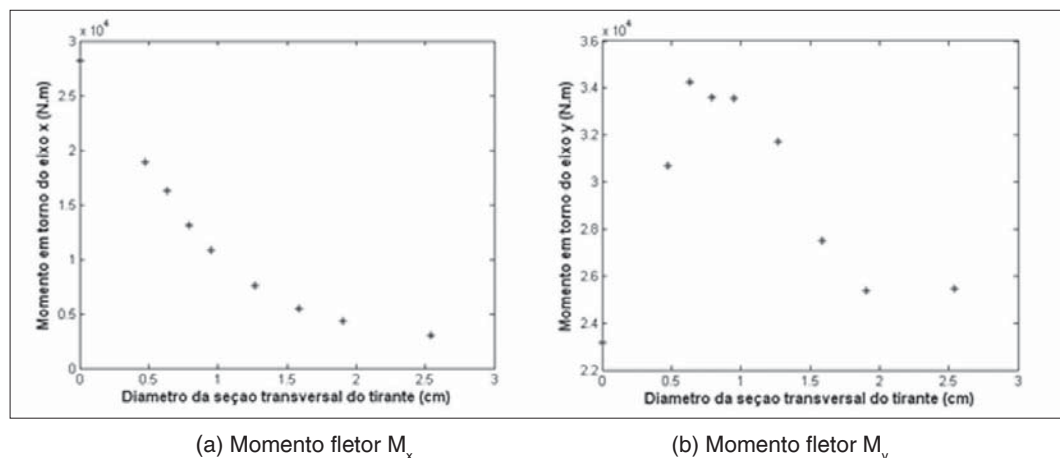
sendo R a redução no consumo de tubos, C_i o consumo de tubos em cada caso e C_l o consumo de tubos para a estrutura sem tirantes.



(a) Redução no consumo de tubos em função do diâmetro do tirante para o modelo 1 (b) Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura do modelo 1

Figura 4 – Resultados obtidos para o consumo de tubos e esforço normal para o modelo 1

A Figura 5 ilustra os resultados obtidos para os momentos fletores M_x e M_y máximos atuantes nos pilares de apoio para a combinação de ações do estado limite último do modelo 1. É importante ressaltar que os eixos locais x e y são eixos paralelos ao plano da seção transversal dos pilares, ou seja, são perpendiculares ao eixo do pilar.



(a) Momento fleter M_x

(b) Momento fleter M_y

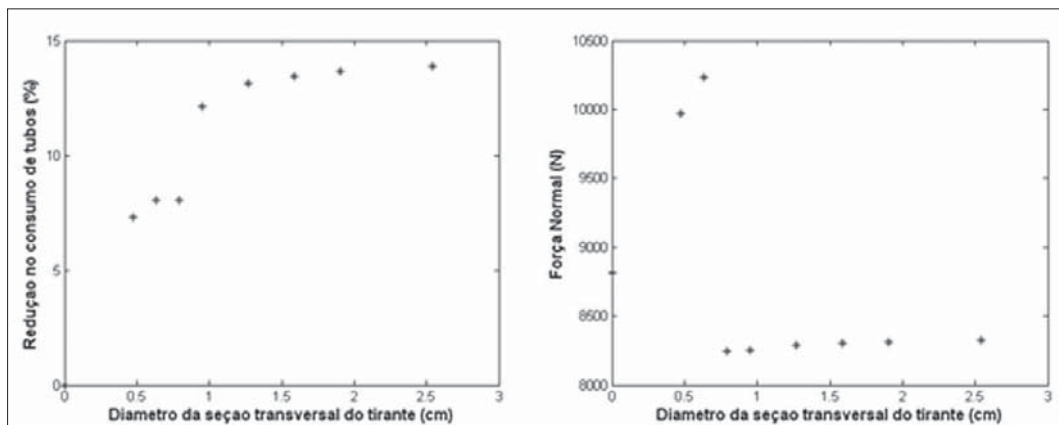
Figura 5 – Resultados obtidos para os momentos fletores máximos no topo dos pilares de apoio do modelo otimizado 1

Nota-se pela Figura 5a, que a curva que melhor representa a variação do momento fletor M_x máximo em função do diâmetro dos tirantes é não linear e decrescente. Para o momento fletor M_y , o esforço aumenta rapidamente para diâmetros até 0,79 cm (tirante 5/16") e depois passa a diminuir. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos da otimização do consumo de tubos do modelo 2 em função do diâmetro dos tirantes que ligam os pilares de apoio. Aqui também, os deslocamentos vertical máximos indicados foram calculados para o estado limite de serviço.

Tabela 9 – Resultados obtidos para a otimização da estrutura de cobertura do modelo 2 com diferentes valores para o diâmetro do tirante

	Diâmetro da seção transversal do tirante (pol)								
	-	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4	1
Número de módulos na direção x	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Número de módulos na direção z	11	10	10	13	13	13	13	13	13
Ângulo de inclinação (°)	19	14	12	22	14	11	10	9	8
Diâmetro do tubo (cm)	7,30	7,30	7,30	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03
Espessura do tubo (cm)	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Comprimento da barra (cm)	179	182	181	170	163	161	160	160	159
Deslocamento vertical máximo (cm)	5,05	6,07	6,25	6,26	6,42	6,53	6,52	6,55	6,56
Consumo de tubos (kg)	2585	2396	2377	2377	2272	2246	2238	2232	2226

A Figura 6a ilustra os resultados obtidos para a redução no consumo de tubos. Nota-se que o uso de tirantes proporciona uma taxa de redução no consumo de tubos mais significativa para diâmetro dos tirantes de até 1,25 cm (1/2"), a partir deste ponto a curva tende a se estabilizar, também em torno de 14% como no modelo 1.



(a) Redução no consumo de tubos em função do diâmetro do tirante

(b) Esforço normal máximo atuante nos pilares de apoio da estrutura de cobertura

Figura 6 – Resultados obtidos para o consumo de tubos e esforço normal para o modelo 2

A Figura 6b mostra os resultados obtidos para o esforço normal máximo no topo dos pilares de apoio. Conclui-se, que o esforço normal máximo sofre influência significativa do número de módulos na direção z (ou número de pilares).

A Figura 7 mostra os esforços máximos de flexão em torno dos eixos x e y, no topo dos pilares de apoio, para a combinação de ações do estado limite último do modelo 2. Percebe-se pela Tabela 9 e Figuras 6b, 7a e 7b que não havendo mudanças no número de pilares (estruturas otimizadas com tirantes de diâmetros iguais ou maiores que 5/16”), o esforço normal máximo e o momento fletor máximo M_y sofrem pouca variação com o aumento no diâmetro dos tirantes. Por outro lado, o momento máximo de flexão M_x , nos pilares de apoio diminui com o aumento no diâmetro dos tirantes.

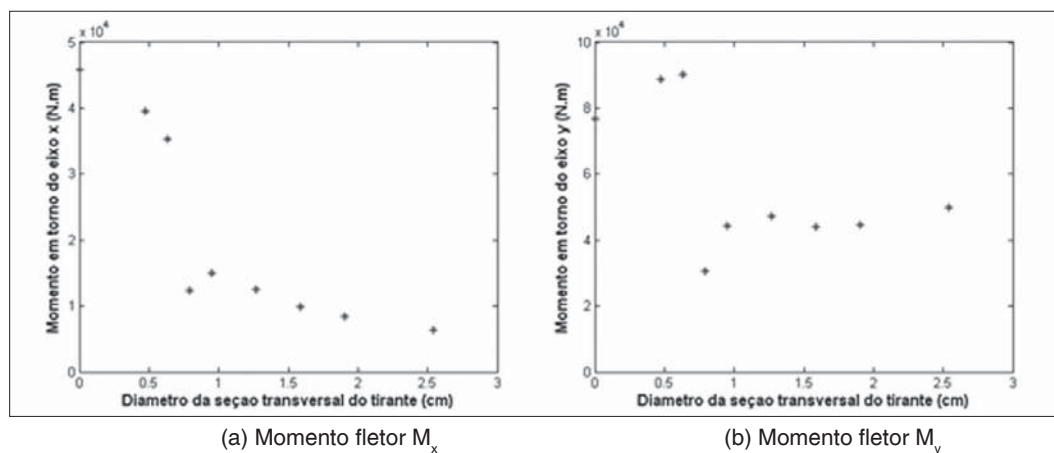


Figura 7 – Resultados obtidos para os momentos fletores máximos no topo dos pilares de apoio do modelo otimizado 2

5 Conclusões

Para os casos analisados, a variação nos esforços máximos nos pilares de apoio é devida, principalmente, ao número de pilares (módulo na direção z) obtidos na otimização. Considerando, fixo o número de pilares, o uso de tirantes provoca variações mais significativas nos esforços de flexão do que no esforço normal máximo nos pilares de apoio. Em relação ao consumo de tubos, ocorre uma redução mais acentuada (em média, 14%) para tirantes até 1/2” de diâmetro. A partir deste ponto a curva de redução tende a estabilizar. A análise do consumo de tubos em função do ângulo de inclinação dos planos de cobertura mostrou que a situação ótima de projeto não é aquela cujo deslocamento vertical máximo da estrutura é o menor possível para uma dada configuração geométrica. Pelo contrário, na situação ótima de projeto, ou seja, menor consumo de tubos, o ângulo de inclinação é menor e a estrutura possui deslocamento vertical máximo maior, entretanto, este deslocamento atende os critérios de dimensionamento

da ABNT NBR 8800:1986. Apesar das limitações apresentadas pelo programa computacional OTR, como por exemplo, o número de combinações de ações, pode-se concluir que o software OTR é capaz de otimizar de forma rápida e robusta para diferentes casos de estruturas planas ou tridimensionais. Este programa computacional encontra-se disponível para os interessados no site <http://www.feciv.ufu.br/docentes/francisco/OTR.zip>.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1986). *NBR 8800: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios*. Rio de Janeiro. ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1988). *NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro. ABNT.
- CARVALHO, E. M. L.; PINHO, A. L. S. e BATTISTA, R. C. (2002). Redução de Tensões em Risers Rígidos de Plataformas TLP. *Anais das XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural*, Brasília, Maio.
- GABRIELLI, T. V. e NEVES, F. A. (2004). Numerical Simulation Of Structural Behavior Of Transmission Line Towers in Tubes. *Proceeding of 25th Anais do XXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, Recife, Novembro.
- MENEZES, A. G. e GALGOUL, N. S. (2002). Análise de Tensões em Anéis – Aplicação a Juntas de Apoio de Plataformas Offshore. *Anais das XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural*, Brasília, Maio.
- PACKER, J. A. and HENDERSON, J. E. (1997). *Hollow Structural Section: Connections e Trusses – a Design Guide*, Toronto: Canadian Institute of Steel Construction, Toronto, Canada.
- PULILO FILHO, A. R.; AGUIAR, L. L. e ARCARO, V. F. (2002). Um sistema computacional para o projeto de treliças espaciais metálicas. *Anais das XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural*, Brasília, Maio.
- REQUENA, J. A. V.; SILVA, N. C.; PASCHOAL, L. G. e ARAÚJO, A. H. M. (2001). Automação do projeto de treliças metálicas planas constituídas de barras tubulares. *Anais do I Congresso Internacional da Construção Metálica*, São Paulo, Julho.
- SOUZA, M. G. Q., BRANCO, R. H. F. e REQUENA, J. A. V. (2004). Automação e Utilização CAD/CAE no Projeto de Estruturas Metálicas Planas, utilizando perfis tubulares. *Proceeding of 25th Anais do XXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, Recife, Novembro.
- SOUZA JR, D. A. e GESUALDO, F. A. R. (2004). Avaliable Study of Genetic Algorithm Aplicable to Otimization of the Spatial Metallic Tubular Structures from segmental-lattice of the Straight Shaft to Cove. *Proceeding of 25th Anais do XXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, Recife, Novembro.
- SOUZA JR, D. A. e GESUALDO, F.A.R. (2005). OTR – Otimização de Estruturas Reticuladas, Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia, Software, versão educativa. SOUZA JR, D. A. (2005). *Otimização pelo Método dos Algoritmos Genéticos e Dimensionamento de Estruturas Tubulares Metálicas Espaciais com Barras Cruzadas para Coberturas*, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Behavior of tubular steel roof in terms of the inclination angle planes and the tie rod diameter

Abstract

The main goal of this paper is to evaluate the global mechanic behavior of spatial tubular steel roofs composed by members interconnected, using the genetic algorithm method. All the tests were performed using the OTR software (OpTimization of Reticulated structures) developed specifically for reticulated structures optimization and project. The aim function defined for analysis performance is the covering plans of consumption tubes. In each step, the OTR software generates the geometric arrangement, loads, deflections and internal forces into the members for the best adapted individual problem. As the next step, the sizing according to ABNT NBR 8800:1986 is performed. In case the individual does not attempt these criteria, it is discarded of the population. In this way, important conclusions are obtained about global structure mechanic behavior from the results of tube consumption minimization. In this paper, are also presented the results obtained for two structures with different spans in function of the inclination angle of covering plans and from the tie rod diameter which connect the top of the columns.

1 Introduction

Hollow section has earned space in its market due geometrical characteristics. Among them one can detached: the great resistance in bending and torsion. Specially, the circular section produces a pleasant architectural effect, beyond have not displayed edges, what is interesting for environments where cleaning is essential. Faced with this, they have been used in a lot of areas of the engineering, from small to big constructions, as airports and malls. The demands of the market has grown up by constructive systems industrialized whose technical solutions are adequate to the quick available computational software, it is the substitution of the improvisation by technology providing the enlargement of the constructive options with the use of bigger resistance steels, the reducing of waste and the production cost. In face of it, becomes itself important the study of new constructive systems that are going to increase quality and cost competitiveness levels. In following are shown the analyses accomplished for structure spatial formed crossed steel members. This system is an option for small and medium covers.

2 Methodology

To perform the analysis, it was used the OTR software (OpTimization of Reticulated structures) developed specifically for reticulated structures optimization and project. The aim function defined to guide the search is the covering plans of tubes consumption. The method used is genetic algorithm. This method follows natural evolution. Initially, it creates a population. After, each individual is available in terms of the aptitude function. With these values, the software selects randomly the individual in a way that the individuals with bigger aptitude function value have bigger chances of passing to the next generation. Besides, it uses genetic operators, recombination and mutation. These operators guarantee the diversity population. In each generation, the individual with bigger aptitude function is selected and the software creates the mesh geometric, imposes the restriction boundary and applies the loads. Following, efforts and displacements are calculated and the project is performed according to Brazilian Code – ABNT NBR 8800:1986. If the individual does not fit the criteria of this code, it is discarded and the second individual is selected. The process is repeated until an individual one attend the criteria.

This work presents two structure results with different dimensions. First, it was analyzed the inclination angle influence in the aim function and structural global mechanic behavior. After that, the tie rod diameter influence was analyzed in the aim function and structure global mechanic behavior.

3 Conclusions

For the study cases, changes in the maximum internal forces in the columns are mainly due the number of columns (module in z direction). If the number of columns is fixed, the use of tie rod produces more significant changes in the bending moment than in the axial force along the columns. Besides, the tubes consumption reductions are more accentuated (medium 14%) for diameters until $\frac{1}{2}$ ". The tubes consumption analysis related to the covering plan angle, showed that project best situation is not the structure with less maximum displacement. In both cases, the best project has a larger displacement, however, this situation attends the Brazilian code NBR 8800 (ABNT 1986) criteria. The results had shown that OTR software is an excellent tool for reticulated structures analysis, and it can be easily adapted to different problems.