

Estruturas vagonadas em aço: concepção, dimensionamento e aplicações

RESUMO

Este trabalho descreve, de maneira prática, procedimentos de concepção, dimensionamento e aplicações de estruturas vagonadas em aço através da sumarização de sua história, de uma classificação tipológica/estrutural, de um método de pré-dimensionamento, de instruções para escolha de parâmetros de concepção, de uma metodologia de análise e dimensionamento baseada nas NBR 14762/2010 e de uma aplicação em uma cobertura vagonada executada na cidade de João Pessoa - PB. Conclui-se que além da necessidade de desenvolvimento de estruturas vagonadas, especialmente de estruturas vagonadas apresentadas são coerentes com as normas citadas resultando em importante ferramenta para um maior conhecimento do funcionamento e aplicações deste sistema estrutural.

INTRODUÇÃO

Estruturas vagonadas são sistemas estruturais constituídos por barras e tirantes dispostos de maneira a reduzir esforços e deformações associados à flexão em elementos principais. O termo “vagonada” deriva diretamente de sua grande aplicação como apoio de vagões de trem (Rebello, 2007).

A figura 1 mostra o tipo mais comum de estrutura vagonada: a viga de alma cheia suportada por cabos. A ausência de diagonais diferencia a estrutura vagonada da treliça no contexto deste trabalho, exceto no caso particular de apenas um montante.

Os princípios básicos das estruturas vagonadas vêm



Figura 1: Esquema de uma viga vagonada

sendo utilizados na construção civil desde o final do século XVIII com a execução das primeiras pontes e viadutos em ferro fundido na Europa. As primeiras pontes a utilizarem estes princípios são as lentulares, formadas por grandes treliças em formato próximo ao elipsoidal com barras suportadas por tirantes através de diagonais e montantes.

O advento do uso de estruturas vagonadas na arquitetura data do final do século XX, especialmente a partir da chamada arquitetura high-tech. Um dos exemplos mais conhecidos de uso do conceito de estruturas vagonadas, embora com trechos treliçados, são as estímulas do Museu do Louvre em Paris, construídas em 1989 e projetadas pelo arquiteto Ieoh Ming Pei com a colaboração do engenheiro Peter Rice (Brown, 2001). Outro exemplo do final do século XX é a estrutura das fachadas bioclimáticas na City for Science and Industry em Paris, construídas em 1981 e projetadas pelo arquiteto Adrien Fainsilber também com a colaboração do engenheiro Peter Rice (figura 2).

As estruturas vagonadas são bastante utilizadas na arquitetura contemporânea devido o seu potencial de leveza visual e

viabilidade econômica. As aplicações são numerosas e diversificadas, podendo ser utilizadas em pontes, fachadas, coberturas, pisos e até em pilares (Charleson, 2005).

O vagonamento pode ser concebido e executado virtualmente em qualquer material estrutural, mas o aço é um dos materiais mais adequados por sua maior flexibilidade e maior adequabilidade aos esforços envolvidos, especialmente nos tirantes. Uma análise mais aprofundada na história dos materiais e das estruturas mostra que o desenvolvimento do ferro e depois do aço e sua utilização na engenharia e arquitetura está intrinsecamente ligado ao desenvolvimento e disseminação do uso das estruturas vagonadas.

Apesar das inúmeras aplicações, há poucos estudos sobre a concepção e o dimensionamento deste tipo de sistema estrutural no Brasil, especialmente baseados nas novas normas NBR 8800/2008 e NBR 14762/2010 que tratam, respectivamente, da análise e dimensionamento de perfis laminados e formados a frio em aço.

CONCEPÇÃO

Para conceber uma estrutura é necessário, primariamente, definir todos os seus parâmetros geométricos desde o seu posicionamento espacial até o seu pré-dimensionamento, além de sua viabilidade construtiva através da escolha de materiais. A concepção de estruturas vagonadas é baseada na escolha de vários parâmetros como as dimensões de seus elementos (pré-dimensionamento), tipo de seção transversal, tipo de material estrutural, tipo de elemento principal, número de montantes, direção do elemento principal e direção e sentido do montante.

As estruturas vagonadas podem ser pré-dimensionadas através de fórmulas empíricas ou de gráficos. O gráfico da figura 3 pode ser utilizado, onde a altura (h) da viga vagonada em aço é dada, a partir do vão livre em metros, pela curva superior para grandes cargas e pela curva inferior para pequenas cargas.

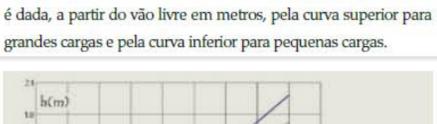


Figura 3: Pré-dimensionamento de vigas vagonadas em aço (fonte: Rebello, 2007)

O dimensionamento de estruturas vagonadas é realizado à tração, compressão e flexo-compressão. Os esforços podem ser obtidos através de uma análise por elementos finitos usando as hipóteses de análise mencionadas anteriormente.

Dimensionamento à tração

Conforme a NBR 8800/2008 (item 5.2), o dimensionamento de barras de seção sólida (retangular ou circular) é dado por:

$$N_{c,td} \leq N_{e,td}$$

onde:
 $N_{c,td}$ = força axial de tração solicitante de cálculo
 $N_{e,td}$ = força axial resistente de cálculo

A força axial de tração resistente de cálculo é o menor dos valores obtidos de acordo com as expressões abaixo:

- a) Escoamento da seção bruta:

$$N_{e,td} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{af}}$$
- b) Ruptura da seção líquida:

$$N_{e,td} = \frac{A_n f_u}{\gamma_{af}}$$

onde:
 A_g é a área bruta da seção transversal da barra; A_n é a área líquida efetiva da seção transversal da barra; f_y é a resistência ao escoamento do aço; f_u é a resistência à ruptura do aço e γ_{af} e γ_{af} são dados na tabela 3 da NBR8800.

Dimensionamento à compressão

Para perfis retangulares formados a frio (duplo U e duplo U enrijecido com solda de costura contínua):

De acordo com o item C.3 da NBR 14762, o valor característico da força axial de compressão resistente $N_{c,Rd}$ deve ser tomado como o menor valor calculado para flambagem global, local e distorcional, $N_{c,Rd}$, $N_{c,Rd,loc}$, $N_{c,Rd,dist}$, respectivamente. A força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,td}$ é dada por:

$$N_{c,td} = \frac{N_{c,Rd}}{\gamma}$$

onde: $\gamma = 1,20$

A flambagem global da barra por flexão, torção ou flexo-torção é calculada por:

$$\text{Para } \lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow N_{c,Rd} = (0,658^{\lambda_0^2}) A_f f_y$$

$$\text{Para } \lambda_0 > 1,5 \rightarrow N_{c,Rd} = \left(\frac{0,877}{\lambda_0^2} \right) A_f f_y$$

onde: λ_0 é o comprimento de flambagem global elástica, de acordo com o item 9.8.2.2, calculado por:

$$M_e = C_0(N_e G f)$$

onde:
 G é o módulo de elasticidade transversal, adotado igual a 77000 MPa e J é a constante de torção da seção.

Dimensionamento à flexo-compressão

A flambagem local é calculada por:

$$\text{Para } \lambda_1 \leq 0,776 \rightarrow M_{Rd} = M_{Re}$$

$$\text{Para } \lambda_1 > 0,776 \rightarrow M_{Rd} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_1^{0,8}} \right) \frac{N_{c,Rd}}{\lambda_1^{0,8}}$$

onde: $\lambda_1 = \left(\frac{M_{Re}}{M_I} \right)^{0,5}$

$$M_I = k_1 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{b_w}{t} \right)^2 W_c$$

onde:
 W_c é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra externa comprimida; M_I é o valor característico do momento fletor resistente associado à flambagem local.

Em estruturas vagonadas, a flexão geralmente ocorre simultaneamente à compressão e portanto a partir do item 9.9 da NBR14762 (a favor da segurança em detrimento do item 5.5.1.2 da NBR8800) é estabelecido que as barras devem atender a seguinte expressão de iteração:

$$\frac{N_{s,d}}{N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,d}}{M_{c,Rd}} + \frac{M_{y,d}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0$$

onde:
 $N_{s,d}$ é a força axial solicitante de cálculo à tração ou compressão;
 N_{Rd} é a força axial resistente de cálculo à tração ou compressão;
 $M_{x,d}$ e $M_{y,d}$ são os momentos fletor solicitantes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y da seção transversal e $M_{c,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ são os momentos fletor resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y da seção transversal.

APLICAÇÃO

Cobertura Terrasse Jardim

Esta aplicação na cobertura, análise e dimensionamento de uma cobertura em aço para uma área aproximada de 18.7x13.05 m. A escolha por uma estrutura vagonada em aço reside no fato de existir a necessidade de criação de uma

estrutura de cobertura leve, no sentido econômico e estético, já que o uso é para área de eventos.

A modulação de pilares mais adequada para a cobertura é retangular (figura 4) pois já existe estrutura em concreto armado na construção existente, onde são posicionadas as vigas principais (figura 7). Este fato conduz a um vagonamento unidirecional com apenas um montante em uma direção. Os efeitos de sucção do vento são combatidos através de um tirante auxiliar (figura 5) que resulta em montantes com apenas um sentido, apesar deste artigo focar apenas em cargas gravitacionais. Utilizando a figura 8, chega-se uma altura de viga total de 12,65m.

Opta-se por perfis formados a frio para a viga principal e montante, barras maciças circulares para os tirantes e cobertura em policarbonato alveolar. Os perfis utilizados para as 6 vigas vagonadas (figura 6) são: montantes- 2U75x37,5 ch3mm, tirantes- barra Q3/4" e vigas principais - 2U150x50x30 ch3mm. A viga principal é travada a cada 67cm pelas análises U50x25 ch2,65mm.

As cargas utilizadas para a análise estrutural são: sobrecarga- 0,25 kN/m² (NBR 8800/2008, anexo B.5.1), peso do policarbonato- 0,008 kN/m² (catálogo da Belmetal®), densidade do aço ASTM A36-78,5 kN/m³ ($f_y=250$ MPa e $f_u=400$ MPa). Segundo a NBR8800, para combinações últimas normais, a carga resultante a qual está submetida a estrutura é: $C_0=1,25$ x peso próprio da estrutura + 1,5 x sobrecarga + 1,4 x peso da telha. Para combinações últimas permanentes de serviço a carga resultante a qual está submetida a estrutura é: C_0 =peso próprio da estrutura + 0,6 x sobrecarga + peso da telha.

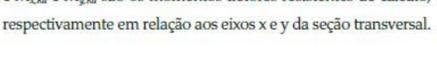


Figura 4: Planta da cobertura Terrasse Jardim com indicação do local de aplicação da carga nocional (Fonte: arquivo Projectação)

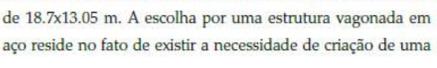


Figura 5: Corte na cobertura Terrasse Jardim (Fonte: arquivo Projectação)



Figura 6: Perspectiva esquemática da cobertura Terrasse Jardim (Fonte: arquivo Projectação)



Figura 7: Estrutura da cobertura Terrasse Jardim em execução (Fonte: arquivo Projectação)

A partir dos parâmetros geométricos e de cálculo definidos anteriormente e da análise tridimensional de 2ª ordem em elementos finitos, os resultados para os elementos comprimidos, tracionados, flexionados e flexo-comprimidos são dados nas tabelas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. A flexão no montante é induzida através da definição de uma excentricidade geomé-

RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS COMPRIMIDOS

ELEMENTOS	$N_{c,td}$ (kN, global)	$N_{c,td}$ (kN, local)	$N_{c,td}$ (kN)	N_s (kN)
Montante	143.01	143.01	119.18	18.34
Viga principal	427.04	427.04	344.78	64.33

RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS TRACIONADOS

ELEMENTO	$N_{t,td}$ (kN, bruta)	$N_{t,td}$ (kN, líquida)	$N_{t,td}$ (kN, bruta)	$N_{t,td}$ (kN, líquida)	N_t (kN)
Tirante	68.00	108.8	61.81	80.6	56.82

RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS FLEXIONADOS

ELEMENTOS	$M_{e,td}$ (kNm, lateral com torção)	$M_{e,td}$ (kNm, local)	$M_{e,td}$ (kNm)	M_s (kNm)
Montante	2.1	2.1	1.9	0.56
Viga principal	18.59	18.59	17.6	13.84

RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS FLEXO-COMPRIMIDOS

ELEMENTOS	$N_{s,d}$ (kN)	$N_{c,td}$ (kN)	$M_{e,td}$ (kNm)	$M_{s,d}$ (kNm)	$M_{y,d}$ (kNm)	Iteração
Montante	18.34	119.18	0.56	1.9	0.21	1.9
Viga principal	74.33	344.78	13.84	17.6	0.1	12.0

Segundo a NBR8800 Anexo C (tabela C3), o deslocamento máximo de uma viga em aço submetida a cargas gravitacionais é $L/250$. Para o vão de 12,65 metros, o deslocamento vertical máximo é de 0,05m. Para os casos estudados os deslocamentos verticais a partir da combinação C_0 e da análise de 2ª ordem são: caso A – 0.040 m e caso B – 0.044m.