

Estudo do Dimensionamento de Enrijecedores Transversais em Almas de Perfis de Longarinas

Raphael Pedrosa Heleno¹

Hermes Carvalho²

Denise Aparecida Barbosa³

Resumo

A utilização de seções transversais com almas esbeltas constitui uma alternativa financeiramente competitiva no projeto de pontes. Uma forma de contornar o problema da instabilidade dos elementos das seções esbeltas é aplicando enrijecedores transversais nestes elementos. A formulação utilizada pelas normas de projeto na determinação do momento de inércia mínimo dos enrijecedores é baseada na solução analítica do problema clássico da placa rotulada em suas extremidades, desconsiderando, dentre outros parâmetros, o efeito da rigidez das mesas nessa formulação. Estudos recentes propõem ajustes que incluem a influência destes outros parâmetros nesta formulação clássica. Este trabalho avalia o momento de inércia mínimo necessário para que os enrijecedores dividam a alma em painéis independentes, calculados por meio da análise de instabilidade elástica, utilizando o pacote computacional ANSYS. O momento de inércia do enrijecedor que garante a rigidez mínima para exercer sua função é obtido variando-se a largura da nervura até que os autovalores correspondentes aos modos simétricos e antissimétrico se igualem. Por meio desta metodologia, determina-se a largura mínima necessária para que os enrijecedores transversais possam ser aplicados em perfis soldados variando-se a altura do perfil, largura da mesa do perfil e espaçamento entre enrijecedores submetendo a viga a cisalhamento. Os resultados são comparados com as formulações da norma americana AASHTO (2014), da norma europeia EN199-1-5 (2010) e a formulação clássica ajustada conforme é proposto em estudos mais recentes.

Palavras-chave: pontes; perfis de alma esbelta; enrijecedores transversais; instabilidade de almas.

Introdução

De acordo com Xie *et al.* (2008), os enrijecedores transversais em vigas tem sido utilizados com sucesso por mais de 100 anos. Barbosa (2016) explica que as placas com esbelteza elevada, que por diversas vezes são utilizadas em vigas de pontes e viadutos, apresentam a instabilidade como um dos pontos mais críticos a serem avaliados. Para contornar esse problema, recorre-se à utilização de enrijecedores transversais e longitudinais para o reforço das placas esbeltas, formando os painéis enrijecidos. Dentre as vantagens dos enrijecedores transversais, cita-se o aumento da capacidade resistente ao cisalhamento, a absorção das forças transversais localizadas e a contribuição para a redução de deformações distorcionais da seção transversal. No contexto de projetos de pontes rodoviárias, as

vigas longarinas apresentam almas esbeltas devido à necessidade de aliar um elevado momento de inércia a um baixo peso da estrutura. Sendo assim, uma solução de projeto muito adotada é a utilização de enrijecedores longitudinais e transversais, sendo que esses últimos são aplicados como forma de reduzir o comprimento dos painéis submetidos a tensões cisalhantes.

Conforme Beg *et al.* (2010), os enrijecedores transversais em placas submetidas a campos de tensões de cisalhamento desempenham duas funções diferentes em situações diferentes. Em regime plástico, a ação do *tension-field* (campo de tração em diagonal), desenvolvido na placa no estado pós-crítico de instabilidade, causa forças axiais adicionais nos enrijecedores transversais intermediários e momentos fletores locais nos enrijecedores transversais de extremidade devido à ancoragem do campo de tração nas extremidades da

¹ RMG Engenharia Ltda. / Engenharia / rph22292@gmail.com

² Universidade Federal de Minas Gerais / Departamento de Engenharia de Estruturas /hermes@dees.ufmg.br

³ RMG Engenharia Ltda. / Engenharia /denbarbosa@yahoo.com.br

viga em placa. No regime elástico os enrijecedores transversais devem garantir que não há movimentos laterais da placa submetida à instabilidade elástica por cisalhamento na posição do enrijecedor. Sendo assim, os enrijecedores transversais adjacentes ao painel devem ter rigidez adequada. Como o objeto de estudo deste trabalho são almas esbeltas cuja tensão de escoamento é consideravelmente superior à tensão crítica de flambagem elástica, os efeitos da plasticidade serão desprezados.

Este trabalho irá abordar o comportamento de enrijecedores transversais intermediários submetidos a cisalhamento, em regime elástico, soldados em apenas um dos lados da alma.

Objetivo

O objetivo desse estudo é ampliar os conhecimentos a respeito das diferentes formulações de normas de projeto de pontes para dimensionamento de enrijecedores transversais de almas esbeltas em perfis I submetidas a cisalhamento, por meio da comparação dos requisitos impostos pelas normas com os modelos numéricos desenvolvidos.

Formulação Clássica para Instabilidade de placas

De acordo com Timoshenko e Gere (1961), existe um valor da razão entre a altura (b) e espessura da alma t_w para o qual não é necessário utilizar enrijecedores, exceto nos pontos de aplicação de cargas concentradas. Nesses casos a parte da alma localizada entre essas cargas pode ser considerada como uma placa retangular a qual está submetida principalmente à ação de tensões cisalhantes, quando próxima aos apoios. Considerando a placa como simplesmente apoiada nas quatro bordas, pode-se determinar a tensão cisalhante crítica de flambagem.

$$\tau_{cr} = k_\tau \sigma_E = \left(5,34 + 4 \frac{b^2}{a^2} \right) \left(\frac{5 \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2}{b^2} \right) \quad (1)$$

sendo, σ_E a tensão de Euler; a é a maior dimensão da placa, que será sempre adotado nesse estudo como o comprimento da alma entre as nervuras verticais; E é o módulo de Elasticidade; ν é o coeficiente de Poisson do material; o coeficiente k_τ está diretamente relacionado com as condições de contorno nas bordas da placa. A adição de restrições de rotação nas bordas da placa provoca aumento nos valores desse coeficiente.

Timoshenko e Gere (1961) determinam um parâmetro γ que representa a razão entre o momento

de inércia do enrijecedor em torno da aresta de contato com a alma I_r e o momento de inércia da própria alma em torno de seu plano médio.

Bleich (1952) explica que a solução do problema de estabilidade de uma placa infinitamente longa e enrijecida verticalmente é uma solução aplicável no dimensionamento da alma de uma viga em suas extremidades, onde as tensões longitudinais são pequenas e podem ser negligenciadas. Para os enrijecedores igualmente espaçados pela distância d , no problema de placa infinitamente longa, definiu-se a rigidez mínima por meio do parâmetro adimensional γ_0 . Quando o parâmetro γ atinge o valor γ_0 , a placa poderá apresentar os modos de instabilidade simétrico e antissimétrico em relação ao plano médio de enrijecedor. O valor de γ_0 nesse tipo de problema está descrito pela equação (2) que é válida para valores de $1 \leq b/d \leq 5$. Para $\gamma < \gamma_0$, o enrijecedor se desloca junto ao do painel não fornecendo rigidez suficiente para se considerar um divisor do painel. Para $\gamma > \gamma_0$, os painéis se deslocam sem que os enrijecedores se desloquem, ou seja, o enrijecedor divide o painel em dois ou mais painéis, dessa forma cumprindo a sua função.

$$\gamma_0 = 4 \cdot \left(7 \left(\frac{b}{d} \right)^2 - 5 \right) \quad (2)$$

sendo, b a altura do perfil; d o espaçamento entre os enrijecedores; o quociente da divisão de d por b é denominado razão de aspecto do painel.

A partir da definição do parâmetro γ , para o enrijecedor trabalhar dividindo o painel, o momento de inércia mínimo do enrijecedor calculado em torno do seu ponto de contato com a alma deve cumprir a condição.

$$I_r \geq 0,0916 \gamma_0 d t_w^3 \quad (3)$$

Formulação do EN 1993-1-5 (2010)

A EN 1993-1-5 (2010), ao verificar a instabilidade elástica, estabelece a seção efetiva de um enrijecedor transversal intermediário como sendo a região que compreende a área transversal do enrijecedor e uma largura de placa equivalente a $15 \varepsilon t$ em cada lado do enrijecedor, como mostrado na Figura 1.

A variável t representa a espessura da placa e a equação (4) apresenta o valor de parâmetro ε calculado em função da tensão de escoamento f_y do material.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235 MPa}{f_y}} \quad (4)$$

Para que os enrijecedores atuem como apoios

rígidos nos painéis da alma, a seção efetiva deve possuir o momento de inércia I_{SE} que satisfaça as seguintes relações

$$\text{Se } d/b < \sqrt{2} \quad I_{SE} \geq 1,5b^3 t_w^3 / d^2 \quad (5)$$

$$\text{Se } d/b \geq \sqrt{2} \quad I_{SE} \geq 0,75bt_w^3 \quad (6)$$

A partir do valor de I_{SE} calcula-se o momento de inércia mínimo para o enrijecedor isolado, I_t, utilizando as propriedades geométricas da seção transversal efetiva.

Formulação da AASHTO (2014)

A norma AASHTO (2014) adota duas formulações diferentes para a determinação do momento de inércia mínimo do enrijecedor, a primeira formulação se aplica para a alma em regime elástico e a segunda formulação se aplica para regime plástico, na qual se considera-se que a alma está submetida ao efeito do campo de tração. Como este estudo se limita ao comportamento elástico de painéis enrijecidos, será apresentada apenas a verificação de aplicação na instabilidade elástica. Nessa verificação da norma o enrijecedor deve apresentar um momento de inércia, calculado em relação à sua aresta de contato com a alma, que atenda à relação estabelecida por

$$I_t \geq I_{tl} = jbt_w^3 \quad (7)$$

onde, o parâmetro j é dado pela Equação (8); a variável b' corresponde ao menor valor de largura do painel, assim b' deve assumir o menor valor entre os parâmetros geométricos b e d.

$$j = \frac{2,5}{(d/b)^2} - 2 \geq 0,5 \quad (8)$$

Formulação proposta por Lee et al. (2014)

Lee et al. (2014) fornece as equações (9) a (11) para a determinação da rigidez mínima dos enrijecedores transversais, baseando-se na Equação (7) ajustada por meio do parâmetro identificado neste estudo como j_{Lee}. Essa equação é desenvolvida somente no regime para almas que trabalham na zona elástica de dimensionamento, ou seja, almas cuja tensão cisalhante crítica de flambagem é inferior à tensão cisalhante de escoamento. O momento de inércia dos enrijecedores, calculado em relação ao eixo de contato entre a alma e o enrijecedor, deve atender à relação estabelecida na equação (7)

$$I_t \geq j_{Lee} dt_w^3 \quad (9)$$

O valor de j_{Lee}, determinado pelas equações (10) e (11), é resultado de uma regressão polinomial feita por Lee et al. (2014) a partir dos valores obtidos no modelo numérico desenvolvido pelo mesmo.

$$j_{Lee} = \frac{2,99}{(d/b)^4} - \frac{9,84}{(d/b)^3} + \frac{11,15}{(d/b)^2} - \frac{4,64}{(d/b)} + 0,7$$

$$\text{para } \frac{d}{b} \leq 3,0 \quad (10)$$

$$j_{Lee} = \frac{1,2}{(d/b)^2} - \frac{0,38}{(d/b)} + 0,04 \quad \text{para } \frac{d}{b} > 3,0 \quad (11)$$

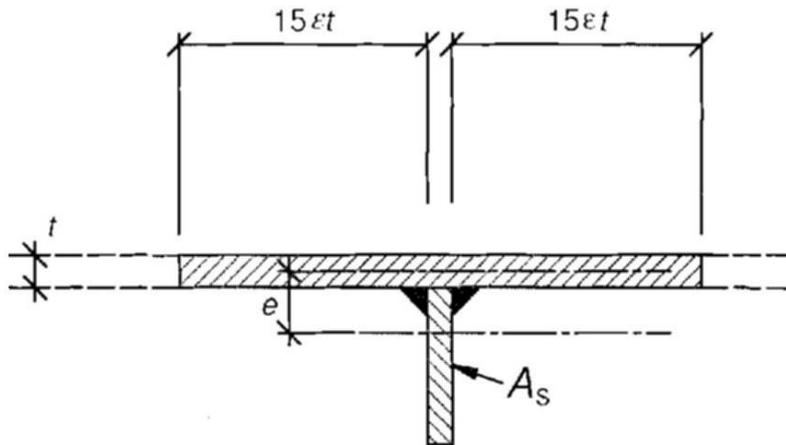


Figura 1 – Seção transversal efetiva de um enrijecedor intermediário.

FONTE: EN 1993-1-5 (2010).

Metodologia

Os valores de momento de inércia mínimos dos enrijecedores transversais da alma fornecidos pela Formulação Clássica, EN 1993-1-5 (2010), AASHTO 2014, e pela equação de Lee *et al.* (2014) são comparados aos resultados obtidos aplicando o Método dos Elementos Finitos (MEF), conforme apresentado a seguir.

No modelo numérico, para se determinar a inércia mínima do enrijecedor, varia-se a largura do mesmo, observando as mudanças dos modos de instabilidade e valores de tensão cisalhante crítica de flambagem.

Modelo em Elementos Finitos

Os modelos em elementos finitos foram desenvolvidos no programa computacional ANSYS. O elemento utilizado é o *shell181*, que é um elemento de casca com quatro nós e seis graus de liberdade em cada nó. Esse elemento apresenta a integração reduzida, contendo apenas 1 ponto gaussiano. O método de solução adotado é linear e elástico, no qual são obtidos os auto-valores e auto-vetores do modelo, que representam as cargas críticas e os modos de instabilidade, respectivamente. O material dos elementos do modelo considerado é um aço que apresenta módulo de elasticidade igual a 200 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e tensão de escoamento de 350 MPa.

Para impor a pré-tensão nos modelos, aplica-se o estado de tensões de cisalhamento puro, uniforme e auto-equilibrado no valor da tensão de Euler, para que o autovalor obtido corresponda à constante k_{τ} . Na aplicação desse estado de tensões utiliza-se o ponto central da viga para restringir os deslocamentos em X, em Y e a rotação em torno de Z. Tendo em vista que o modelo é auto-equilibrado pelos carregamentos aplicados, as reações de apoio no ponto central devem ser desprezíveis para que essa restrição não influencie nos resultados de tensão.

Geometria do Modelo

Nos modelos desenvolvidos, adicionam-se as mesas da viga e os enrijecedores nas bordas laterais e ao longo da alma dividindo-a em três ou mais painéis de mesmo comprimento d para que seja possível observar a evolução dos resultados em função do aumento do momento de inércia do enrijecedor, obtendo assim, o valor mínimo desse momento de inércia necessário para a divisão do painel. Mantém-se o comprimento total da viga igual a, pelo menos, três vezes o comprimento do painel para evitar que as restrições nas bordas laterais influenciem nos painéis centrais que são analisados. Os parâmetros geométricos que foram mantidos fixos no modelo são a altura do perfil (b) de 2000 mm, o comprimento total da viga de 20 m e a espessura da alma (t_w) e do enrijecedor (t_r) para as quais se adotou 9,5 mm. As condições de contorno impostas para todos os modelos são o travamento das três translações e a rotação em torno de y nos nós das bordas laterais. Nesse estudo, os parâmetros variados são as configurações das dimensões das mesas, o comprimento do painel e consequentemente a razão de aspecto como mostrado na Tabela 1. Os termos bf e tf representam a largura e a espessura das mesas, respectivamente.

Sensibilidade de Malha

A verificação da sensibilidade de malha é realizada por um modelo com quatro bordas apoiadas como mostrado na Tabela 2. Por meio da comparação entre os valores de k_{τ} calculados pela Equação (1) e os valores calculados numericamente, pode-se observar a convergência dos resultados conforme a malha é refinada. Os valores de tempo de processamento para cada malha correspondem ao intervalo de tempo necessário para que o modelo fosse gerado e solucionado utilizando uma macro desenvolvida para esse tipo de problema. Os modelos foram executados em um computador do tipo IBM-PC com velocidade de processamento de 2,3 GHz, processador Core™ i5-2410 M e memória RAM de 4 Gb.

Tabela 1 – Parâmetros Geométricos que são variados nos modelos desenvolvidos.

Configuração geométrica das Mesas	Valores de esbeltez
$b_f = 500 \text{ mm} ; t_f = 14,5 \text{ mm}$	0,333 ; 0,666 ; 1,0 ; 1,333 ; 1,666 ; 2,0
$b_f = 500 \text{ mm} ; t_f = 25 \text{ mm}$	0,333 ; 0,666 ; 1,0 ; 1,333 ; 1,666 ; 2,0
$b_f = 500 \text{ mm} ; t_f = 50 \text{ mm}$	0,333 ; 0,666 ; 1,0 ; 1,333 ; 1,666 ; 2,0
$b_f = 600 \text{ mm} ; t_f = 14,5 \text{ mm}$	0,333 ; 0,666 ; 1,0 ; 1,333 ; 1,666 ; 2,0
$b_f = 1000 \text{ mm} ; t_f = 25 \text{ mm}$	0,333 ; 0,666 ; 1,0 ; 1,333 ; 1,666 ; 2,0
$b_f = 1000 \text{ mm} ; t_f = 50 \text{ mm}$	0,333 ; 0,666 ; 1,0 ; 1,333 ; 1,666 ; 2,0

Para aplicação nos modelos estudados, adotou-se uma malha cujos elementos apresentam 50 mm de lado, pois essa malha apresentou um erro inferior a 1% aliado a um tempo de processamento aceitável tendo em vista o número de análises a serem realizadas.

Comportamento Padrão dos Modelos

Para obter o momento de inércia mínimo necessário para os enrijecedores, adotou-se um procedimento padrão no qual a largura do enrijecedor b_r é variada, observando-se a variação do coeficiente k_r e a diferença dos auto-valores correspondentes aos dois primeiros modos de instabilidade, bem como a alteração da forma dos modos. A Figura 2 apresenta o comportamento padrão dos parâmetros observados no modelo em função do valor do momento de inércia do enrijecedor. Os resultados apresentados na Figura 2 correspondem ao modelo de viga cuja esbelteza (d/b) é igual a 1 e as mesas possuem 500 mm de largura e 25 mm de espessura.

A Figura 3 mostra a forma deformada do modo de instabilidade da alma correspondente à cada região

do gráfico delimitada pelas linhas verticais pretas que indicam os pontos nos quais ocorre a mudança na forma deformada dos modos. O principal indicador do limite entre essas regiões é a diferença entre o primeiro e o segundo autovalor do modelo. Assim, as linhas verticais podem ser traçadas nos pontos em que essa diferença se aproxima de zero. Outro indicador desses limites é um aumento do valor de k_r no ponto de transição da Região 3 para a Região 4. A linha tracejada na Figura 3 representa o eixo de simetria no centro do modelo.

Para valores de momento de inércia I_r entre 0 e 20 cm^4 , a Região 1 apresentou o primeiro modo de instabilidade como um modo simétrico em relação ao centro do modelo. Na Região 2, cujos valores de I_r estão compreendidos entre 20 cm^4 e 45 cm^4 , observa-se o primeiro modo antissimétrico, no qual o enrijecedor central permanece centralizado, apesar dos deslocamento dos demais enrijecedores. Esse ponto indica o menor momento de inércia que garante que o enrijecedor central exerça sua função como rígido. Na região 3, observa-se novamente um modo simétrico com deslocamento dos enrijecedores, para os valores

Tabela 2 – Análise de sensibilidade de malha por modelo com quatro bordas apoiadas.

Tamanho do Elemento [mm]	Quantidade de nós	k_r – Analítico	k_r – Modelo tipo A	Diferença percentual entre os valores de k_r	Tempo de Processamento [s]
400	36	9,34	11,505	23,18%	3
200	121	9,34	10,033	7,42%	3
100	441	9,34	9,489	1,60%	3
50	1681	9,34	9,357	0,18%	6
25	6561	9,34	9,319	-0,22%	12

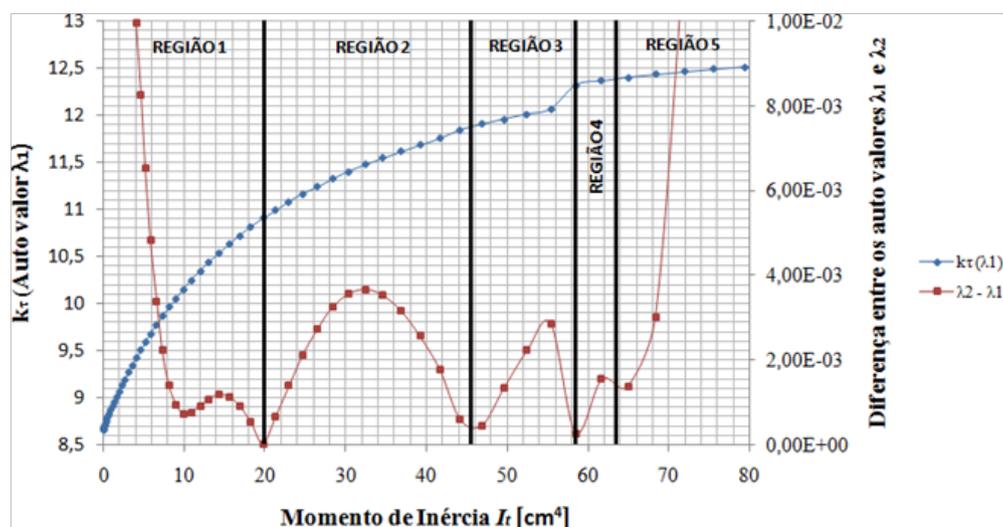


Figura 2 – Variação de k_r e variação da diferença entre λ_1 e λ_2 em função do momento de inércia do enrijecedor.

de I_t entre 45 cm^4 e 59 cm^4 . Na região 5, a forma deformada altera pela última vez. A partir desse ponto, as formas deformadas dos modos e os valores de k_t não sofrem variações significativas.

Avaliação da Influência da Mesa

O critério da rigidez mínima explicitado por Bleich (1952) para o dimensionamento de enrijecedores é baseado na determinação do valor mínimo de I_t que fornece uma resistência à instabilidade da alma equivalente à resistência calculada para um painel de mesma altura, com quatro bordas apoiadas e comprimento igual ao espaçamento entre os enrijecedores. esse valor de momento de inércia é denominado, neste estudo, como I_{t0} . Esse parâmetro não garante que o enrijecedor exerça a função de divisor de painéis, mas aumente a resistência do painel mesmo assim. Traçou-se um gráfico da variação de I_{t0} calculado numericamente em função do inverso da esbelteza b/d , como mostrado na Figura 4. As propriedades geométricas das mesas estão indicadas na legenda à direita.

Apenas os valores de I_{t0} para $b/d > 1$ são possíveis de serem obtidos nos modelos analisados, pois o aumento de rigidez provocado pela adição das mesas já garantem valores de k_t superiores aos da placa com quatro bordas apoiadas, sem a necessidade de adição de enrijecedores. Observa-se uma tendência de deslocamento das curvas, na Figura 4, em função

do valor do menor momento de inércia da mesa. Isso está relacionado à rigidez a flexão da placa que compõe a mesa trabalhando como um apoio elástico para a rotação das extremidades do enrijecedor vertical.

Comparação entre os Resultados Numéricos, Normas e Formulações

O valor de I_t que divide a Região 1 e a Região 2 mostradas na Figura 2 é extraído dos modelos, observando o menor valor da largura b_p que resulta em um primeiro modo de instabilidade antissimétrico, sem deslocamento lateral do enrijecedor central. Dessa forma, pode-se comparar esses valores com os valores exigidos pelas normas de projeto. No gráfico da Figura 5 os resultados obtidos numericamente se mostraram inferiores a todos os valores calculados por meio de normas. A formulação clássica apresentou resultados muito próximos aos da AASHTO (2014), o que é esperado, tendo em vista que a norma se baseia nesta formulação. Os resultados calculados pela norma EN 1993 - 1-5 (2010) são os resultados que mais se distanciam dos resultados do modelo numérico. Por outro lado, a formulação proposta por Lee *et al.* (2014) é a formulação que mais se ajusta aos resultados numéricos, mas, para mesas estudadas com os menores valores de momento de inércia, a formulação de Lee *et al.* (2014) não se mostra adequada por fornecer resultados de I_t menos conservadores.

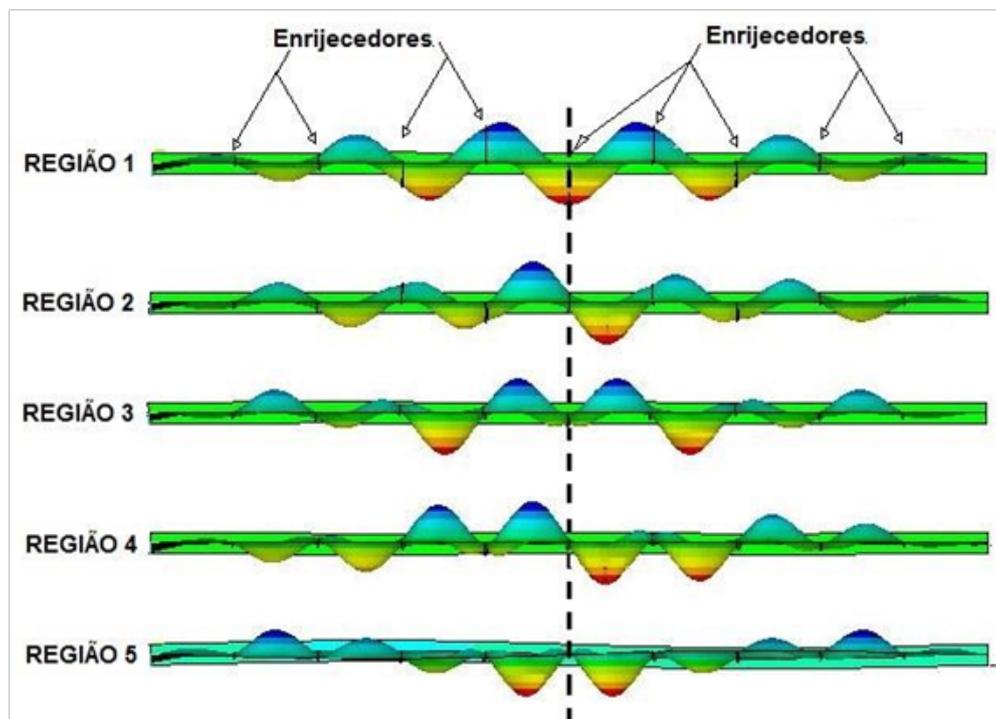


Figura 3 – Alternância do primeiro modo de instabilidade da alma em cada região do gráfico da Figura 2.

Conclusões

As normas vigentes de projeto de pontes em estruturas metálicas apresentam formulações para dimensionamento de enrijecedores que não consideram a influência das propriedades geométricas das mesas. Essa simplificação pode levar a resultados de momento de inércia cujas diferenças, em relação aos modelos

analisados, atingem até 50%. A formulação proposta por Lee *et al.* (2014) apresenta resultados mais próximos dos numéricos, mesmo não considerando a influência das mesas. Contudo, as normas se mostram a favor da segurança para todos os casos simulados, diferentemente da formulação de Lee *et al.* (2014) para alguns desses casos.

Os modelos numéricos simulam perfis soldados

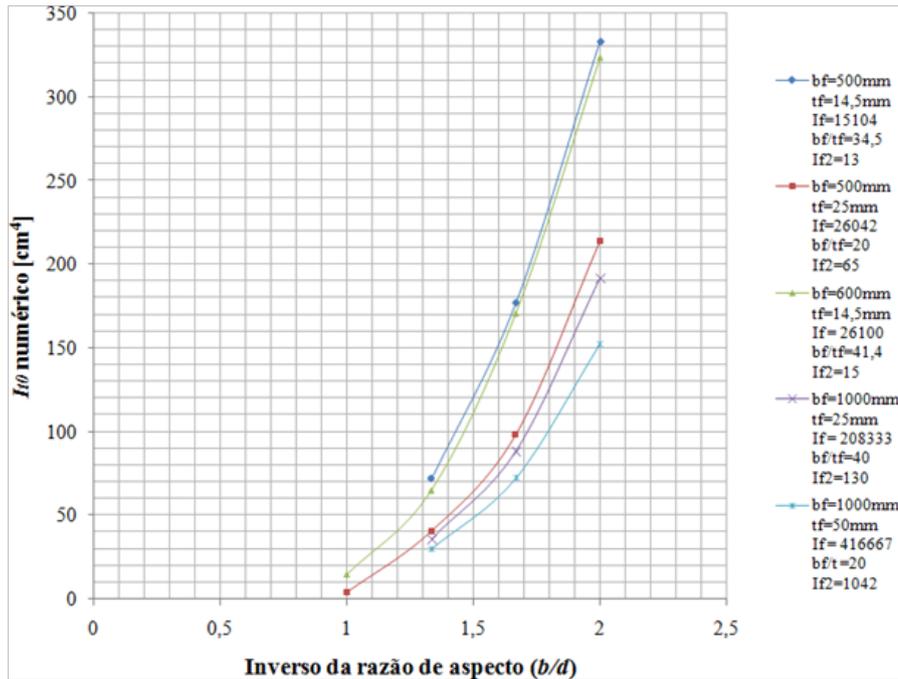


Figura 4 – Momento de inércia mínimo I_{10} em função da razão de aspecto e da configuração geométrica das mesas.

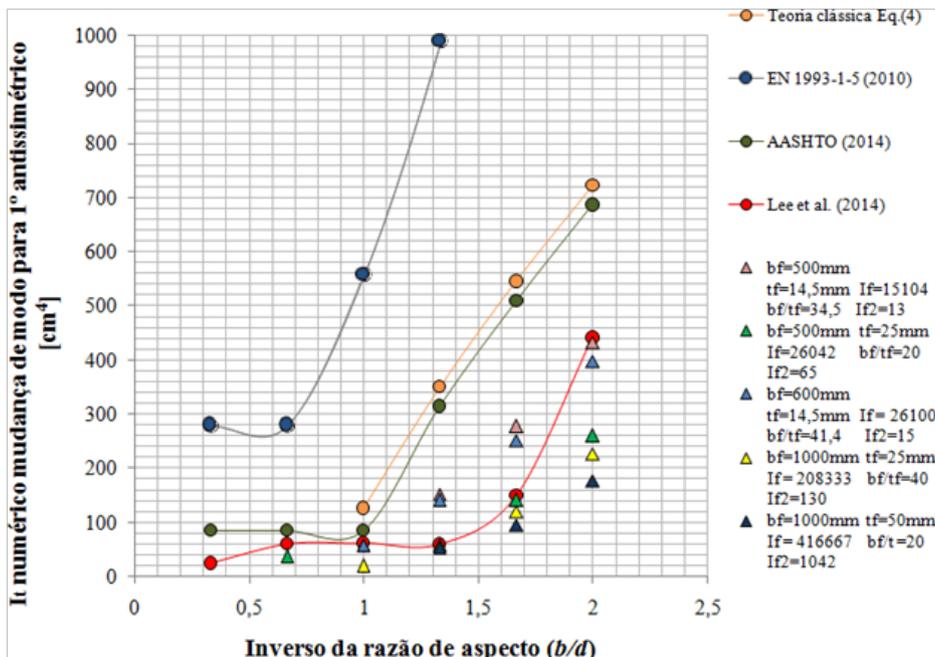


Figura 5 – Momento de inércia mínimo I_1 em função da esbelteza e da configuração geométrica das mesas.

com propriedades geométricas comuns em projetos de pontes. Entretanto, mais estudos são necessários para avaliar a abrangência dos resultados.

Referências

- AASHTO LRFD. Bridge design specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014.
- ANSYS-18. Release 1.0 Documentation for Ansys. Canonsburg, United States
- BARBOSA, D.A. Estudo de Almas Enrijecidas Longitudinalmente. 2016. 268 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- BEG, D. *et al.* Design of plated structures. ECCS Eurocode design manual. Publication by Ernst & Sohn, 2010.
- BLEICH, F. Buckling Strength of Metal Structures. New York: McGraw-Hill Book Company Inc., 1952.
- LEE S.C.; LEE D.S., YOO C.H., Design of Intermediate Transverse Stiffeners for Shear Web Panels. Engineering Structures, 2014.
- TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. Theory of Elastic Stability. 2 ed., McGraw-Hill Kohskusha. New York, 1961.
- XIE, M.; CHAPMAN, J.C.; HOBBS, R.E. A Rational Design Model for Transverse Web Stiffeners. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 64, p. 928-946, 2008.