

Comparação entre diferentes códigos normativos frente à instabilidade lateral de vigas pré-moldadas de pontes para a definição de dimensões mínimas de mesas de compressão

Matheus Agustini¹, Guilherme da Silva Munhoz², Lucas Matheus de Oliveira Scoz³

¹Universidade do Vale do Itajaí / Engenharia Civil / matheus-agustini@hotmail.com

²Universidade do Vale do Itajaí / Engenharia Civil / munhoz.guilherme@outlook.com.br

³Universidade do Vale do Itajaí / Engenharia Civil / lucas.scoz@univali.br

Resumo

A fim de que se assegure um menor transtorno ao ambiente no qual está inserido, tanto o processo de concepção estrutural, quanto o da execução de Obras de Arte Especiais (OAE), compreendem uma série de considerações a serem previamente discutidas. Dentre essas, salienta-se a escolha do sistema construtivo e a respectiva tipologia estrutural. No Brasil, a ampla construção de pontes em vigas pré-moldadas de concreto armado ou protendido está associada ao excelente benefício-custo desse sistema, tendo em vista que esse é de fácil execução e montagem, dispensando a utilização de cimbramentos, e não exigindo mão-de-obra altamente especializada. Contudo, a fase de montagem do tabuleiro requer uma atenção especial, visto que nesta etapa as vigas receberão grande parte das cargas permanentes da superestrutura (peso próprio das lajes, guarda-corpos, barreiras de proteção, e das próprias vigas) que irão incidir sobre a estrutura ao longo de sua vida útil. Além do aspecto de montagem, a magnitude dos esforços atuantes nas OAEs, também demandam às vigas, um dimensionamento com seções resistentes consideráveis. Dessa forma, durante a instalação do tabuleiro, o fato destas ainda não estarem solidarizadas aos demais elementos estruturais, as tornam suscetíveis à flambagem lateral com torção. Diante disso, comparou-se os códigos normativos NBR 6118:2014, NBR 9062:2017, ACI 318:2014, EN 1-1:2004, e BS 8110-1:1997 frente à instabilidade lateral, e arbitrou-se diferentes comprimentos e alturas de vigas para a obtenção da mínima largura que assegurasse os parâmetros de estabilidade de cada normativa. Por conseguinte, por meio da análise dos resultados pode-se concluir que para um mesmo comprimento e altura de viga, o código brasileiro (NBR 6118:2014) é o mais conservador dentre os abordados. Já o britânico (BS 8110-1:1997), por outro lado, é o mais liberal, com dimensões ligeiramente inferiores em relação aos demais.

Palavras-chave

Vigas pré-moldadas de pontes; Instabilidade lateral; Flambagem lateral com torção; Mesa de compressão;

Introdução

O processo de construção de uma Obra de Arte Especial (OAE) compreende um alto nível de complexidade em todas as suas etapas. Na sua concepção, por exemplo, deve-se avaliar o local mais adequado para sua implantação, sem comprometer ou ocasionar transtornos ao tráfego local; durante sua execução, por outro lado, deve-se ater à princípios de rapidez de execução, desde que segura e economicamente viável; e, por

fim, durante o seu uso, quando fatores como segurança estrutural, conforto sensorial e baixa manutenção devem ser assegurados aos usuários.

Segundo Mendes (2009, *apud* Silva *et al*, 2014), o sistema estrutural mais utilizado e capaz de satisfazer a todos esses requisitos é o de vigas de concreto armado ou protendido que, por sua vez, corresponde a 94% dos sistemas das pontes cadastradas nas rodovias federais pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT).

Esse índice expressivo está associado à praticidade que o modelo confere tanto à análise estrutural, poupando tempo de processamento e facilitando as tomadas de decisão, quanto à execução da estrutura, por possuir geometrias relativamente simples, de fácil armação e não requerer uma mão de obra altamente especializada. Deste modo, toda essa praticidade se traduz em redução de custos ao longo das etapas, e, se torna um fator preponderante na determinação do modelo da OAE a ser adotado.

Não obstante, além de todas as vantagens da utilização do sistema de vigas, o surgimento da pré-fabricação, devido ao processo de industrialização no qual a construção civil está inserida, permitiu minimizar riscos, reduzir o cronograma de execução e abater custos, uma vez que não houve mais a necessidade de cimbramentos.

Todavia, apesar da grande vantagem econômica na utilização de vigas pré-moldadas de concreto armado/protendido, o processo de dimensionamento também fica mais robusto. Desta forma, são necessárias verificações de segurança e estabilidade adicionais para que seja assegurado o bom desempenho das peças. Para tal, são averiguadas as situações desde a desforma, incluindo içamento, transporte e montagem, até as condições de uso, propriamente ditas.

Nessa premissa, um dos pontos mais críticos da execução de pontes pré-fabricadas ocorre justamente durante a etapa de montagem, quando a viga é posicionada sobre a mesoestrutura. Ao longo desta etapa, ela encontra-se simplesmente apoiada pela sua mesa inferior, uma vez que ainda não está solidarizada a nenhum outro elemento estrutural. Assim, caso ela seja muito esbelta, estará sujeita à instabilidade por flambagem lateral, o que poderá acarretar no seu tombamento. Salienta-se, ainda, que as vigas de pontes são mais suscetíveis ao tombamento que as demais, devido às grandes dimensões que possuem, grandes comprimentos e, conseqüentemente, grandes alturas.

Para combater tais efeitos, o código brasileiro NBR 6118:2014, aborda em seu *Capítulo 15.10 - Instabilidade Lateral de Vigas*, um procedimento que relaciona a resistência à flambagem, a largura da mesa de compressão superior e o vão efetivo da viga. Contudo, por tratar-se de um processo aproximado, ele está sujeito ao superdimensionamento da mesa de compressão, o que pode comprometer a viabilidade do projeto.

Em âmbito global, por outro lado, o estudo da instabilidade lateral também é debatido por outros comitês normativos como o *American Concrete Institute – ACI*; *European Committee for Standardization – CEN*; e a *British Standards – BS*.

Diante deste contexto, este estudo busca comparar os resultados obtidos frente à instabilidade lateral por meio da NBR 6118:2014, com as demais normativas propostas pelos comitês internacionais mencionados. Como resultado, objetiva-se a obtenção da mínima largura admissível de mesa de compressão, capaz de assegurar os parâmetros de estabilidade em vigas pré-moldadas de pontes.

Instabilidade Lateral de Vigas

Embora não seja um problema exclusivo de pontes, o realce da verificação de instabilidade lateral de vigas, ao longo do processo de dimensionamento das OAEs, ocorre devido às grandes dimensões dos elementos estruturais que as constituem. Nesse cenário, o fenômeno acontece com uma deformação lateral inicial, que progride com a torção da seção e, conseqüentemente, sua ruptura.

Isto posto, o conhecimento de algumas propriedades – como (a) esbeltez, cujo índice geométrico distingue flexão de compressão; (b) rigidez, que relaciona a capacidade de um corpo de se deformar quando sujeito a uma carga; e (c) as características da seção transversal, que assim como o tipo de material, influenciam diretamente no peso e na geometria da estrutura interferindo em sua estabilidade; – são de fundamental importância para a elaboração de um estudo seguro.

Dessa forma, em virtude do aspecto dos apoios das vigas, Krahl (2014) afirma que existem três tipos de instabilidade temporária. Entre eles, (a) a instabilidade por deformação com os apoios restringindo o giro e o deslocamento lateral; a (b) instabilidade também por deformação, porém com apoios flexíveis; e, por fim, (c) a instabilidade com tombamento pelo rompimento dos apoios.

No estudo, por outro lado, optou-se por enfatizar a abordagem de diversos códigos normativos sob a perspectiva da infixidez de vigas com apoios flexíveis, uma das situações mais críticas presenciada em campo durante a etapa de montagem. Neste momento, na fase que antecede o lançamento do tabuleiro, as vigas encontram-se simplesmente apoiadas, sem qualquer travamento. Isso, associado a um elemento esbelto, se traduz em deficiências na estabilidade da estrutura.

NBR 6118:2014

A atualização do código brasileiro que trata do dimensionamento de estruturas de concreto, a NBR 6118:2014, aborda (apenas na ausência de um método mais apropriado) no item 15.10 a instabilidade lateral de vigas.

De acordo com a norma da ABNT, por meio de um método aproximado, pode-se classificar as vigas sujeitas à flambagem lateral de acordo com as relações (Equações 1 e 2):

$$b \geq \frac{l_0}{50} \quad (1)$$

$$b \geq \beta_{fl} x h \quad (2)$$

Onde, “**b**” é a largura da zona comprimida; “**h**” é a altura total da viga; “**l₀**” é o comprimento do flange comprimido, medido entre suportes que garantam o contraventamento lateral; e “**β_{fl}**” é o coeficiente que depende da forma da viga conforme Figura 1:

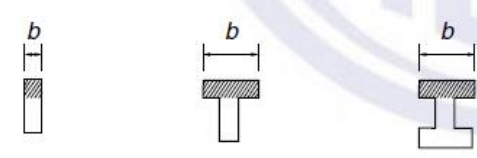
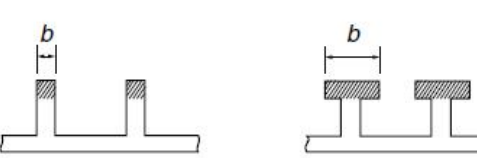
Tipologia da viga	Valores de β_{fl}
	0,40
	0,20
onde Zona comprimida	

Figura 1 – Valores de β_{fl} .

Fonte: NBR 6118:2014

NBR 9062:2017

A verificação de instabilidade lateral em vigas é assunto abordado tanto na NBR 6118:2014, quanto na NBR 9062:2017, que trata do projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldadas. No entanto, até 2006, esta última especificava que caso não houvesse a necessidade de cálculos rigorosos para o processo de montagem, permitia-se adotar as considerações desta primeira, desde que se considerasse a largura do vão como a distância compreendida entre os pontos de içamento.

Em contrapartida hoje, com a atualização da norma para a versão NBR 9062:2017, ela retoma a classificação fixada na versão de 1985 sobre instabilidade lateral e fixa que (a) o espaçamento entre os sistemas de travamento transversais não deve exceder a Equação 3 e, ainda, caso haja excentricidade ou inclinação da carga em relação ao plano médio da viga deve-se diminuir a distância entre os travamentos; e (b) caso a referência estabelecida na Equação 4 seja ultrapassada, deve-se considerar que o estado limite por instabilidade acomete o elemento antes do estado limite por ruptura na flexão.

$$\frac{L}{b_f} \leq 50 \quad (3)$$

$$\frac{L \times h}{b_f^2} \leq 500 \quad (4)$$

As incógnitas de ambas as equações estão definidas na Figura 2:

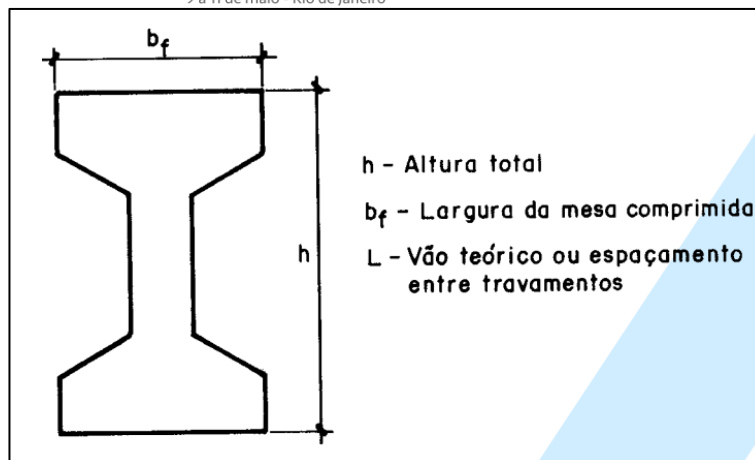


Figura 2 – Definição das incógnitas das Equações 3 e 4.
 Fonte: NBR 9062:2017

Por fim, a ABNT também sugere que sejam feitas as verificações de instabilidade lateral ao longo de todas as etapas compreendidas no item 5.2.1.4 da NBR 9062:2017, dentre elas: (a) fabricação; (b) manuseio; (c) armazenamento; (d) transporte; (e) montagem; e (f) construção. Todavia, a ausência de normatização de equações e fórmulas tornam esse processo um tanto quanto subjetivo.

ACI 318:2008

A regulamentação americana proposta pelo *American Concrete Institute* em 2008 por meio da ACI 318 é bastante subjetiva segundo Borghi e Lisboa (2017). Os autores defendem que, embora o código determine que devem ser consideradas ações externas corretivas em virtude de falhas durante os processos de execução, cura, montagem, ele não estabelece procedimentos específicos para tal.

Da mesma forma, Krahl (2014) afirma que a norma exige, subjetivamente, que durante a etapa de montagem, as vinculações das peças devem ser estudadas para que nem seu alinhamento, nem sua integridade estrutural sejam comprometidas.

Em contrapartida, a ACI 318:2008 fixa no item 10.4 o espaçamento máximo compreendido entre os travamentos laterais com base na face comprimida da viga conforme a Equação 6:

$$\frac{l_{of}}{b_f} < 50 \quad (6)$$

Onde “ l_{of} ” representa o vão teórico entre as restrições de movimentação lateral; e “ b_f ” é a menor dimensão da flange comprimida, na qual seções retangulares admite-se a largura total da viga “ b_w ”.

Por fim, a norma também recomenda a avaliação do efeito de excentricidades laterais que possam vir a ocorrer na determinação do vão teórico, contudo nenhuma das normativas averiguadas aborda um método que compreenda a relação da excentricidade lateral com a instabilidade da viga (HURFF; KAHN, 2012).

EN 1-1:2004

O código europeu Eurocode EN 1-1:2004 estabelece que a análise de instabilidade lateral em vigas deve ser executada sempre que necessário. Como exemplo, a norma cita desde as etapas de transporte e içamento, até elementos cujo travamento lateral seja insuficiente.

Além disso, a normativa também discute a consideração de imperfeições geométricas. Nesse caso, entende-se como tal, uma deflexão lateral de $L/300$, onde “L” é o comprimento total da viga desconsiderando seus travamentos. Todavia, para estruturas prontas, o travamento feito por outros elementos pode contabilizar como dimensão “L”. Não obstante, o código também trata de efeitos de segunda ordem que possam estar associados à instabilidade lateral. Para que sejam relevados, deve-se atender as condições da Equação 7 para situações permanentes; e a Equação 8 para situações temporárias:

$$\frac{l_{0t}}{b} \leq \frac{50}{(h/b)^{1/3}} \quad \text{e} \quad \frac{h}{b} \leq 2,5 \quad (7)$$

$$\frac{l_{0t}}{b} \leq \frac{70}{(h/b)^{1/3}} \quad \text{e} \quad \frac{h}{b} \leq 3,5 \quad (8)$$

Onde, “ l_{0t} ” é a distância entre elementos de restrição de torção; “h” é a profundidade da viga na distância “ l_{0t} ”; e “b” é a espessura da flange comprimida da viga.

Por fim, a norma acrescenta que quando houver torção vinculada à instabilidade lateral, esta também deverá ser levada em consideração no processo de dimensionamento do elemento estrutural de apoio.

BS 8110-1:1997

Da mesma forma que as demais normativas já abordadas, a BS 8110:1997 trata em seu item 4.3.2 de vigas esbeltas e os riscos de instabilidade lateral, tanto durante a execução, quanto durante a vida útil da estrutura.

Ao contrário das abordagens estudadas, o código britânico associa o fenômeno da inflexão lateral, exclusivamente, ao tombamento da viga que pode ocorrer sobre o eixo longitudinal em relação ao ponto de içamento. Por meio de imperfeições geométricas, esse tombamento inicial pode ocasionar momentos fletores laterais que, sê elevado, resultam em instabilidade.

Embora a norma não apresente nenhum parâmetro de classificação, ela determina situações e características que devem ser melhor estudadas para evitar a ocorrência do fenômeno, como (a) a geometria da viga, tal como seção transversal e a relação entre vão, largura e espessura; (b) locação dos pontos e técnicas utilizadas para o içamento; e (c) as tolerâncias admitidas, como curvatura lateral máxima.

Apesar de toda a subjetividade, o código aborda no item 3.4.1.6 os limites de esbeltez para que sejam asseguradas as condições de estabilidade lateral das vigas. Dessa forma, para elementos simplesmente apoiados ou contínuos, tem-se a Equação 9; para vigas engastadas com travamento lateral apenas na base, utiliza-se a Equação 10:

$$\frac{L \times d}{b_c^2} \leq 250 \quad \text{ou} \quad \frac{L}{b_c} \leq 60 \quad (9)$$

$$\frac{L \times d}{b_c^2} \leq 100 \quad \text{ou} \quad \frac{L}{b_c} \leq 25 \quad (10)$$

Na qual “*L*” é a distância livre entre os travamentos laterais; “*b_c*” é a largura da face comprimida da viga na metade de “*L*”; e “*d*” diz respeito à altura útil da viga dimensionada para resistir a carga última.

Por último, o código oferece recomendações no processo de dimensionamento levando em consideração as tensões admissíveis de cálculo devido ao processo de instabilidade, relacionando-os com os carregamentos permanentes. Além disso, caso haja formação de fissuras, ela sugere que sejam fornecidos travamento lateral de acordo com a necessidade do elemento em manter sua vida útil.

Metodologia

Buscando garantir os princípios de estabilidade horizontal em vigas pré-moldadas de pontes, ainda em situações temporárias, o código brasileiro NBR 6118:2014 especifica um procedimento para obtenção da mínima largura admissível de mesa de compressão em função da tipologia, altura e vão efetivo da viga. A fim de verificar a possibilidade de superdimensionamento desse procedimento, a mínima largura admissível de mesa de compressão foi calculada para vigas de diferentes alturas e comprimentos, em seguida os resultados apresentados a partir da NBR 6118:2014 foram comparados com os resultados obtidos pelas indicações dos seguintes códigos: NBR 9062:2017, ACI 318:2008, EN 1-1:2004 e BS 8110-1:1997.

Para o estudo foram estabelecidas vigas cujas alturas variaram de 5,00 em 5,00 cm, entre 1,00 e 2,00 m. Para a determinação do vão efetivo das vigas, seguiram-se dois critérios (Equações 11 e 12).

$$h = \frac{L}{20} \quad (11)$$

$$h = \frac{L}{10} \quad (12)$$

Assim, no primeiro critério, o vão efetivo das vigas variou de 1,00 em 1,00 m, entre 20,00 e 40,00 m, enquanto no segundo, a variação foi de 0,50 em 0,50 m, de 10,00 a 20,00 m.

As relações indicadas pelas Equações 11 e 12, representam, respectivamente, as relações entre altura e comprimento usualmente utilizadas no pré-dimensionamento de vigas em concreto armado e protendido.

Na determinação da mínima largura admissível de mesa de compressão pelo procedimento da NBR 6118:2014, foi admitido como resultado final o valor máximo apresentado entre as Equações 1 e 2. Ainda, para o coeficiente β_{fl} , foi assumido o valor equivalente a 0,40, em função da tipologia das vigas.

Seguindo as indicações da NBR 9062:2017, a mínima largura admissível de mesa de compressão foi considerada como a maior apontada pelas Equações 3 e 4.

Ainda, para o código ACI 318:2008, utilizou-se a Equação 6 para a determinação da mínima largura admissível de mesa de compressão.

O código europeu, EN 1-1:2004, estabelece duas verificações quanto a instabilidade lateral de vigas, para tal, foram verificadas neste estudo as condições da Equação 8, uma vez que a pesquisa analisa a estabilidade de vigas em situações de caráter temporário.

Por fim, o código BS 8110-1:1997 estabelece limites de esbeltez para que sejam asseguradas as condições de estabilidade lateral das vigas, de modo que a Equação 9, indicada para elementos simplesmente apoiados ou contínuos, foi utilizada na determinação da mínima largura admissível de mesa de compressão das vigas estudadas.

Análise dos Resultados

As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados de mínima largura admissível de mesa de compressão das vigas estudadas, sendo que esses representam, respectivamente, os valores para as vigas cujas alturas foram determinadas a partir das relações $L/20$ e $L/10$.

Os resultados dispostos na Figura 3 indicam que para vigas cuja altura equivale a relação $L/20$, os códigos NBR 6118:2014, NBR 9062:2017, ACI 318:2008 e EN 1-1:2004 apresentaram mínima largura admissível de mesa de compressão notadamente semelhantes, com variação máxima de 1 cm. No entanto, os resultados de mínima largura admissível de mesa de compressão seguindo os critérios do código BS 8110-1:1997 se mostraram imediatamente inferiores aos dos demais códigos, indicando uma redução de, em média, 15% dessa dimensão.

A Figura 4 expõe os resultados de mínima largura admissível de mesa de compressão das vigas cujas alturas foram determinadas a partir da relação $L/10$. Percebe-se que as dimensões determinadas a partir dos critérios especificados pela NBR 6118:2014 se mostraram superiores às obtidas pelos demais códigos, em média 52% maiores que as dimensões indicadas pela NBR 9062:2017, ACI 318:2008 e BS 8110-1:1997, que apresentaram os menores resultados. Vale ressaltar que as especificações dos códigos NBR 9062:2017, ACI 318:2008 e BS 8110-1:1997 determinaram mínimas larguras admissíveis de mesa de compressão com variação máxima de 2 cm. Por fim, comentase, que ainda para essa condição, os resultados indicados pelo código EN 1-1:2004 se mostraram, em média, 28% inferiores aos da NBR 6118:2014, e em média, 31% superiores aos dos demais códigos.

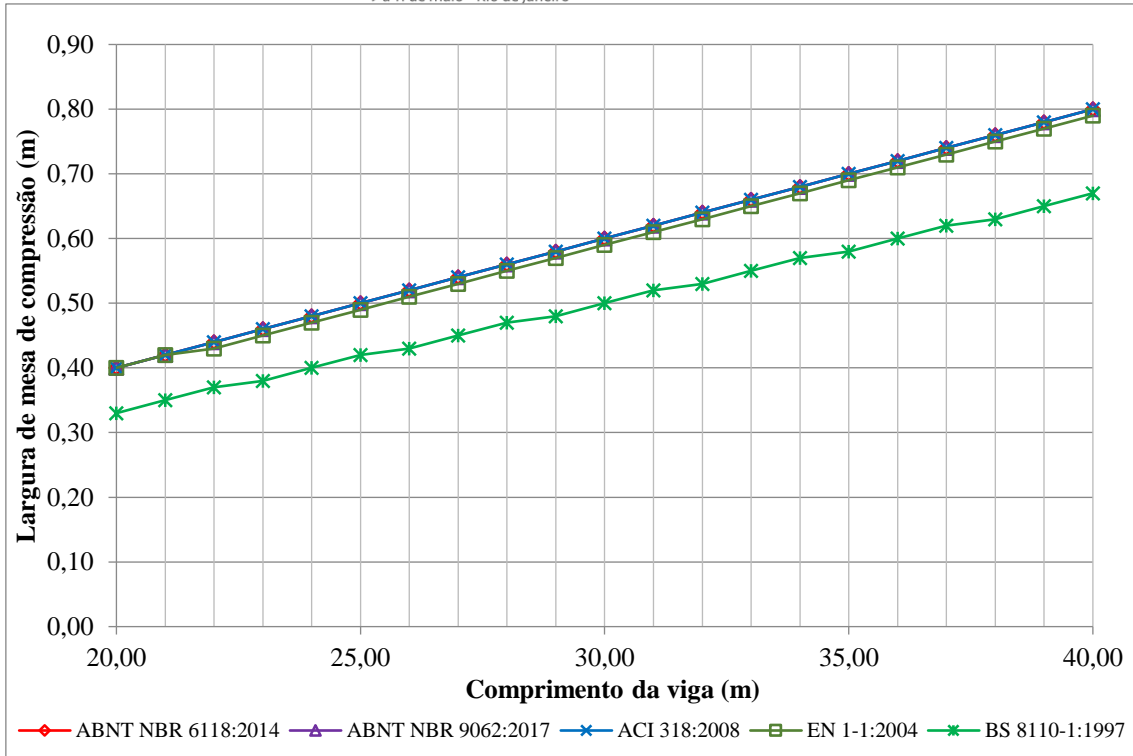


Figura 3 – Mínima largura de mesa de compressão de vigas com altura equivalente a $L/20$.

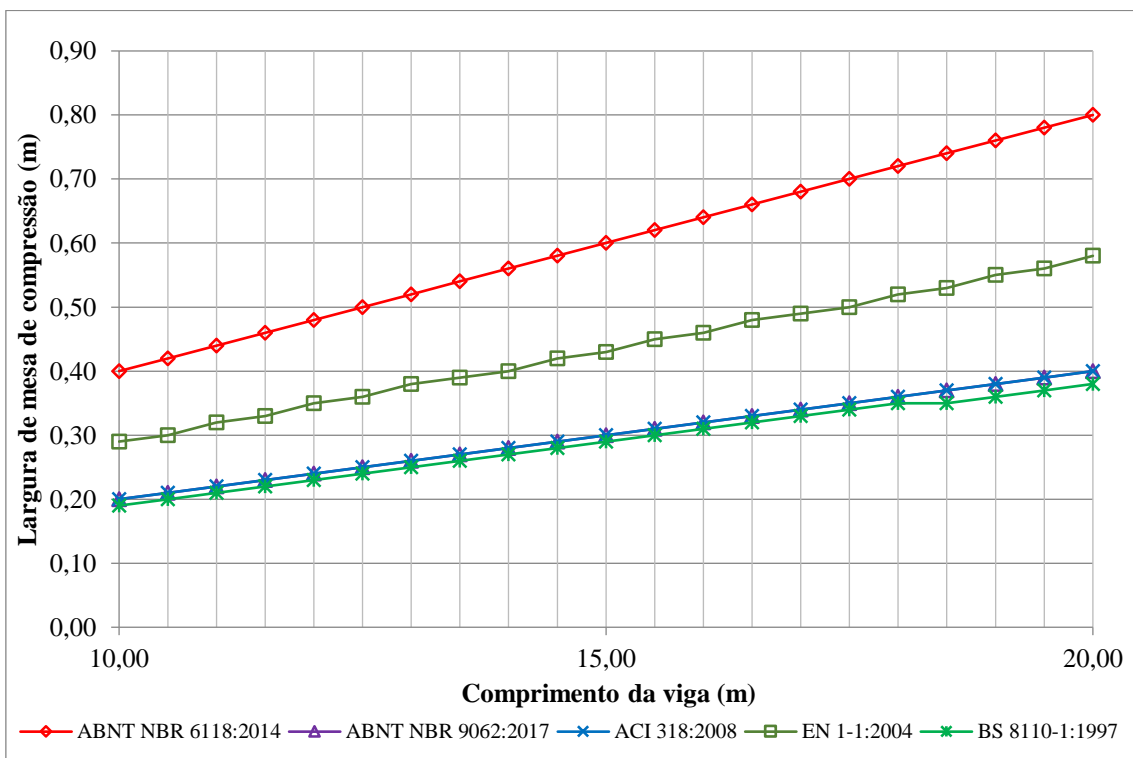


Figura 4 – Mínima largura de mesa de compressão de vigas com altura equivalente a $L/10$.

Conclusões

Para a altura de relação $L/20$ (concreto protendido), a NBR 6118:2014 apresenta vigas com largura mínima de mesa de compressão, em média, 15% maiores que as analisadas sob os critérios do código BS 8110-1:1997. Contudo, quando comparada aos demais códigos normativos abordados neste estudo, estes apresentam valores similares.

Por outro lado, para a altura de relação $L/10$ (concreto armado), a análise frente a NBR 6118:2014 originou vigas com largura mínima de mesa de compressão, aproximadamente, 52% maiores que as analisadas sob os critérios dos códigos NBR 9062:2017, ACI 318:2008 e BS 8110-1:1997; e, em média, 28% maior que a EN 1-1:2004.

Reitera-se, também, que por meio dos resultados, notou-se que a BS 8110-1:1997 foi o código que apresentou menores valores, no entanto, esta carece de uma investigação mais aprofundada, uma vez que está há mais de 20 anos sem atualização.

Por fim, conclui-se que a NBR 6118:2014 provou-se mais rigorosa em comparação com a BS 8110-1:1997, e aos demais códigos, quando adotada a altura de relação $L/10$. Todavia, para a altura de relação $L/20$, esta apresenta resultados compatíveis e semelhantes às demais normativas estudadas.

Dessa forma, de modo geral, salienta-se que a NBR 6118:2014 possui uma metodologia de cálculo de instabilidade lateral de vigas mais rigorosa que as demais normas, independentemente da relação de altura escolhida.

Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318 – Building Code Requirements for Structural Concrete**. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017.
- BORGHI, G. B.; LISBOA, G. P. **Verificação da Instabilidade Lateral de Vigas Pré-Moldadas de Concreto em Fases Transitórias**. 2017. 112 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8110 – Code of practice for structural use of concrete**. London; 1997.
- EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION. **EUROCODE 2 – Design of Concrete Structures - Part 1-1**: General rules and rules for buildings, Brussels, 2004.
- HURFF, Jonathan B.; KAHN, Lawrence F. Lateral-Torsional Buckling of Structural Concrete Beams: Experimental and Analytical Study. **Journal of Structural Engineering**. 9 ed. Reston, 2012. 138 v.
- KRAHL, Pablo Augusto. **Instabilidade Lateral de Vigas Pré-Moldadas em Situações Transitórias**. 2014. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2014.
- SILVA, Pauline Fonseca da. *et al.* Efeitos da Mudança da NBR 7188:2013 nos Projetos de Pontes. **Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**. 7 ed. Rio de Janeiro, 2014. V.