

A Análise de Flambagem Lateral de Longarinas durante a Montagem

B. Ernani Diaz¹, Raissa L. S. de Toledo²

¹ Serv. Eng. B. Ernani Diaz / Departamento Técnico / ernani.diaz@uol.com.br

² Atmen Engenharia / Departamento Técnico / raissalst@gmail.com

Resumo

O tipo estrutural de pontes e viadutos mais comum no Brasil é aquele em que se utilizam vigas pré-moldadas protendidas bi-apoiadas em aparelhos de neoprene e unidas pela laje de rolamento. Na fase de execução, as longarinas de pontes e viadutos precisam ser transportadas e montadas por meio de dispositivos mecânicos dos mais variados tipos. Incluem-se nestes dispositivos: os prolongamentos da viga para movimentação no canteiro, os equipamentos de transporte por vias terrestres, as vigas de lançamento sobre rios e áreas urbanas, elevação e montagem das vigas com dois guindastes, elevação e montagem com um guindaste, etc. Cada uma destas alternativas apresenta problemas de estabilidade, que precisam ser analisados pelos projetistas das estruturas. Durante estas fases, as exigências de projeto possuem características que precisam ser levadas em conta pelos projetistas. Na realidade, a verificação durante a fase de construção exige, a rigor, uma análise não linear física e geométrica, como aquela efetuada para pilares de concreto amado. Solicitações de segunda ordem precisam ser determinadas como na verificação de pilares. Este estudo específico está sendo iniciado por meio de um trabalho de pesquisa. Entretanto, é possível avaliar o comportamento destas vigas por meio da determinação das solicitações elásticas de flambagem. Já o comportamento não linear físico e geométrico pode ficar restrito à análise do comportamento não linear da mesa de compressão da longarina, até que um estudo mais completo seja finalizado. São apresentadas considerações de como são determinadas numericamente as cargas críticas de flambagem por meio de programas especializados de análise estrutural. As fases mais críticas de suspensão de longarinas são verificadas quando a suspensão e montagem são efetuadas com somente um guindaste. Nesta situação ocorrem forças adicionais de compressão, que são inexistentes durante a vida útil da estrutura. A forma de unir as lingas metálicas de suspensão às longarinas tem uma importância capital. É mostrado como a suspensão não deve ser feita em casos específicos. Vários exemplos são mostrados e discutidos. São também discutidas as fases provisórias de montagem quando as vigas estão apoiadas sobre os aparelhos de neoprene.

Palavras-chave

Montagem; Flambagem Lateral; Longarinas; Pontes; Concreto Protendido.

Introdução

No projeto de tabuleiro de vigas múltiplas com a utilização de longarinas pré-moldadas e protendidas é necessário que o projetista leve em consideração a operação de montagem das longarinas protendidas. Uma definição da fôrma das longarinas com uma mesa de compressão inadequada pode tornar a montagem das vigas na obra suscetível de flambagem lateral durante a sua montagem. Assim, desde o projeto inicial da obra, considerações sobre a montagem das longarinas precisam ser avaliadas de comum acordo com o construtor ou com o proprietário da obra. A mesa de compressão das longarinas tem duas funções primordiais: dar estabilidade lateral à longarina durante a montagem e também permitir que a altura estrutural da laje de rolamento possa ser considerada com uma espessura mais elevada (espessura do flange da longarina+ espessura da laje de rolamento) reduzindo a armadura negativa transversal da laje de rolamento sobre as longarinas.

As longarinas podem ser transportadas durante a montagem por vários sistemas de suspensão, desde a sua retirada da fôrma no canteiro até a sua instalação no seu local definitivo. Aqui serão tratadas somente as condições mais críticas e importantes para sua estabilidade.

Critério rigoroso de verificação

A clássica carga crítica elástica de flambagem lateral de vigas bi-apoiadas de paredes finas para cargas distribuídas é apresentada no livro TIMOSHENKO & GERE (1963), capítulo 6.4. Esta carga crítica é válida para vigas engastadas à torção nos apoios. Assim, estes resultados não podem ser aplicados na solução das operações de montagem com guindastes. É importante lembrar que a torção, neste caso, se apresenta sob duas formas distintas: a torção de Saint Venant (torção circular) e a torção de empenamento (flexo-torção). Para a sua determinação é necessário determinar a rigidez clássica à torção circular e a rigidez de empenamento da flexo-torção da seção da viga em estudo. Em vista destes fatos a utilização de modelos com barras não pode ser aplicada, já que os modelos usuais de barras não levam em conta a torção de empenamento.

Já o estudo da estabilidade de longarinas de concreto protendido durante as fases de montagem precisa ser feito por meio de determinação de esforços de segunda ordem, exatamente como é exigido para pilares de concreto armado, isto é, por meio de uma análise não linear física e geométrica com a consideração de erros postulados de geometria. A norma CEB-FIP Model Code (1990) no seu item 6.6.3.3.4 trata deste assunto. A norma FIB Model Code (2010) no item 7.3.8, comenta a necessidade da verificação durante as fases de montagem e fornece uma indicação de que os efeitos de segunda ordem podem ser negligenciados, não informando sob quais condições de suporte a indicação é válida (supõe-se ser com engaste clássico à torção nos apoios). A condição apresentada é a seguinte:

$$l_{of}/b \leq 50/(h/b)^{0.333} \quad (1)$$

onde:

l_{of} é o comprimento do flange comprimido sem contraventamento

h é a altura da seção da viga na sua parte central

b é a largura do flange comprimido.

O mesmo problema de falta de definição clara da suportação ocorre também na norma NBR 6118 (2014) no seu item 15.10.

A necessária análise não linear física e geométrica consegue ser realizada atualmente por meio de processamento iterativo com auxílio de programas modernos de análise, capazes de efetuar análises não lineares geométricas de modelos 3D, mas há necessidade de introduzir procedimentos adicionais de determinação de rigidez não linear física não incluídos no programa base de análise. Este procedimento foi desenvolvido, por exemplo, com o programa SAP2000 para a estrutura do Porto de Açú numa análise iterativa não linear física e geométrica de estacas protendidas de fundação, como mostrado em CURY, FREITAS, DIAZ, (2009). O SAP2000 permite concatenar processamentos diversos por meio da linguagem VBA (Visual Basic do Excel), (ver TCC de SILVA (2017)), mas não internamente no processamento, como faz o programa ANSYS.

Existem atualmente inúmeros casos de análises com este tipo de técnica com a utilização automática do programa ANSYS, em que o procedimento de análise não linear de modelos 3D com elevado número de nós é efetuado pelo programa base de análise ANSYS. O usuário precisa, entretanto, programar especificamente as rotinas necessárias para a determinação dos efeitos não lineares físicos dos elementos.

É possível analisar uma suspensão com auxílio de programas de análise sofisticados capazes de analisar os deslocamentos geométricos não lineares, mas sem a consideração do comportamento não linear físico dos elementos de placa de concreto. Para efetuar uma análise não linear completa, inicialmente, deve-se modelar a viga protendida com elementos de chapa com dimensões sugeridas na ordem de 0.2m x 0.2m para incluir no modelo as armaduras projetadas, que seriam espaçadas de 0.2m. Modelos com barras não podem ser utilizados em vista da ocorrência de momentos de empenamento. As armaduras são definidas geometricamente entre elementos de placa. Tanto os elementos retangulares de placa de concreto como os elementos de barras das armaduras devem ser examinados com comportamento não linear físico em programas específicos, com base em inúmeros artigos que tratam do assunto. Este assunto tem sido muito estudado, sendo possível simular o comportamento não linear do concreto, depois das famosas experiências efetuadas em chapas de concreto armado na Universidade de Toronto. Um resumo destes estudos é apresentado por COLLINS & MITCHELL (1991). A protensão precisa ser modelada com elementos de cabos de protensão, pois a protensão atua evitando a criação de fissuras, impedindo, em parte, a queda de rigidez dos elementos.

Há métodos para considerar a fissura num elemento retangular, reduzindo convenientemente a rigidez do elemento sem modificar a geometria inicial do modelo. Esta técnica é designada de “espalhar a fissura” (*crack smearing*). Estudos atuais podem até considerar o efeito do cisalhamento no elemento da placa de concreto. Ver estudos com a consideração de cisalhamento em placas, por exemplo em SCHULZ & AVILA (2010).

Com a utilização do programa SAP2000 é possível em cada fase de uma análise iterativa modificar externamente a rigidez de cada elemento de concreto e de aço para as diversas etapas de iteração, e solicitar de cada vez uma nova análise não linear geométrica até obter a convergência em termos de deslocamentos da estrutura. É evidente que este procedimento envolve necessariamente um aumento das armaduras dispostas na viga, caso a convergência não possa ser encontrada. As armaduras necessárias a uma estabilização dos efeitos de segunda ordem são principalmente aquelas instaladas longitudinalmente no flange superior da viga. As armaduras longitudinais localizadas nas extremidades transversais do flange superior da viga são as mais importantes para dar estabilidade lateral à viga. Estas armaduras longitudinais são usualmente dispostas com bitolas bem leves, já que elas não são necessárias para dar estabilidade lateral à compressão do flange superior da longarina na fase definitiva da estrutura. Mas, em casos de flanges de pequena rigidez, estas armaduras precisam ser determinadas especificamente.

As diversas modalidades de suspensão de longarinas

Sabe-se que a verificação de estabilidade lateral de longarinas é mais crítica durante as diversas fases de montagem. Na situação definitiva da estrutura não há possibilidade de flambagem lateral das longarinas. Em vista da complexidade dos esforços atuantes durante a suspensão e das características específicas do guindaste a ser utilizado, a sua operação precisa ser detalhada com extremo rigor por uma especialidade em suspensão de cargas, que, em inglês, é designada por *rigging*.

A suspensão de longarinas durante a montagem pode ser efetuada de duas formas diferentes principais. A suspensão pode ser efetuada com auxílio de dois guindastes, resultando numa suspensão sem força longitudinal adicional de compressão ou ela pode ser efetuada com somente um guindaste, o que implica na atuação concomitante de força axial externa à viga.

Depois que a viga é posicionada sobre os aparelhos de apoio há necessidade também de avaliar a segurança à flambagem, já que a fixação por meio do aparelho de neoprene é flexível. Com a construção das transversinas de apoio, a verificação da flambagem lateral mostra-se, usualmente, ser adequada.

A Figura 1 mostra esquematicamente as diversas possibilidades de suspensão.

As diversas possibilidades podem ocorrer dependendo da disposição dos cabos de suspensão. São elas:

Tipo 1 – 4 cabos paralelos usualmente empregados nas treliças de montagem com pino de montagem

Tipo 2 – 2 cabos paralelos unidos à viga por alça sem pino de montagem

Tipo 3 – 2 cabos paralelos com utilização de 4 lingas curtas inclinadas presas ao pino de montagem

Tipo 4 – 2 cabos inclinados unidos à viga por alça sem pino de montagem

Tipo 5 – 2 cabos inclinados com 4 lingas curtas inclinadas presas ao pino de montagem

Tipo 6 – 2 cabos inclinados mais próximos unidos à viga por alça sem pino de montagem

Tipo 7 – 2 cabos inclinados mais próximos com 4 lingas curtas inclinadas presas ao pino de montagem

As modalidades 6 e 7 apresentam forças normais com um comprimento de flambagem mais curto à força normal. Mas, por outro lado, como o vão para as cargas distribuídas é menor, podem ocorrer fissuras no flange superior, causadas pela protensão, o que provoca uma queda de rigidez longitudinal do flange superior. Os modelos utilizados aqui não apresentaram erros geométricos postulados, como exigido adiante.

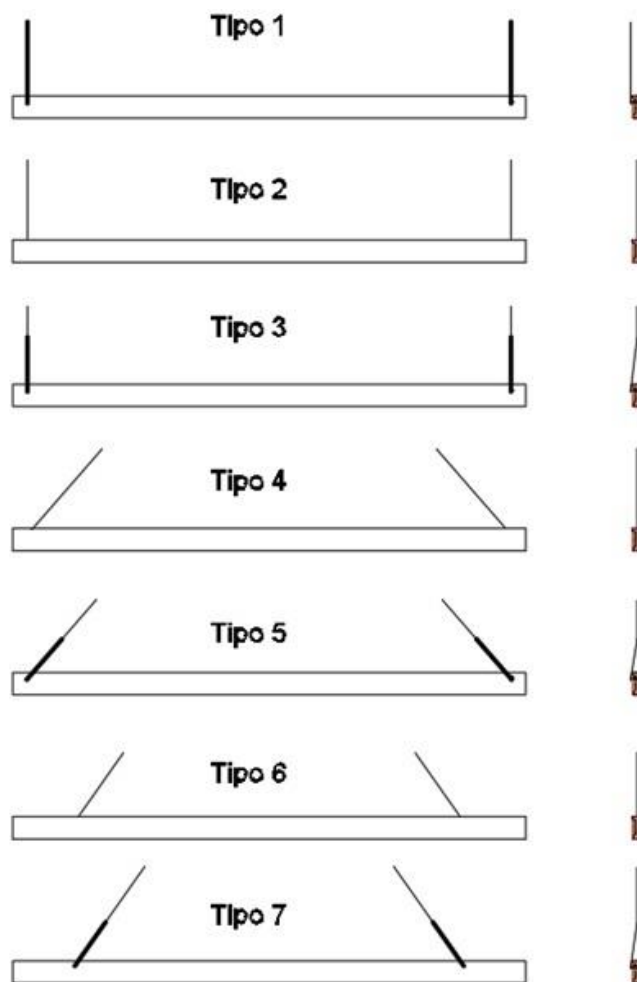


Figura 1 – Modalidades de suspensão

Ações e coeficientes de segurança a serem considerados

A análise de determinação dos esforços numa análise não linear física e geométrica deve ter como base o estudo de determinação de esforços de segunda ordem definido em norma para pilares.

As ações a serem consideradas na análise são as seguintes: peso próprio, protensão, impacto durante a suspensão (amplificação dinâmica) e vento. Além disso, deve ser levado em conta um erro postulado de geometria.

Pela norma NBR 8681, os coeficientes de segurança para combinações de construção são os seguintes:

Ações permanentes (pré-moldados): 1.20, Vento: 1.4, Protensão: 0.9 (provoca maior compressão no flange superior) e Impacto: 1.3.

Como a carga de impacto tem importância maior, pode-se adotar o coeficiente de combinação $\psi_0 = 0.6$ para o vento.

O erro postulado de geometria, neste caso, não é definido em norma nacional para longarinas. A norma NBR 6118 prescreve para pilares um ângulo mínimo de $\theta_1 = 1/300$, o que definiria para vigas uma flecha máxima horizontal de $f = \text{vão}/600$. Para um vão de 40m a flecha horizontal prevista seria de 0.067m.

Análise da flambagem elástica com a utilização de programas sofisticados de análise

Serão apresentados resultados de determinação de carga crítica à flambagem lateral de uma viga protendida de seção usual de 39m de comprimento com 1.7m de altura para cada uma das situações mostradas acima. O exemplo é hipotético. Foi suposto ter flange superior com dimensões de 0.75m x 0.253m, o que tem sido usado em alguns projetos. Foi utilizado o programa SAP2000 versão 22. Um trecho do modelo para esta análise está mostrado abaixo.

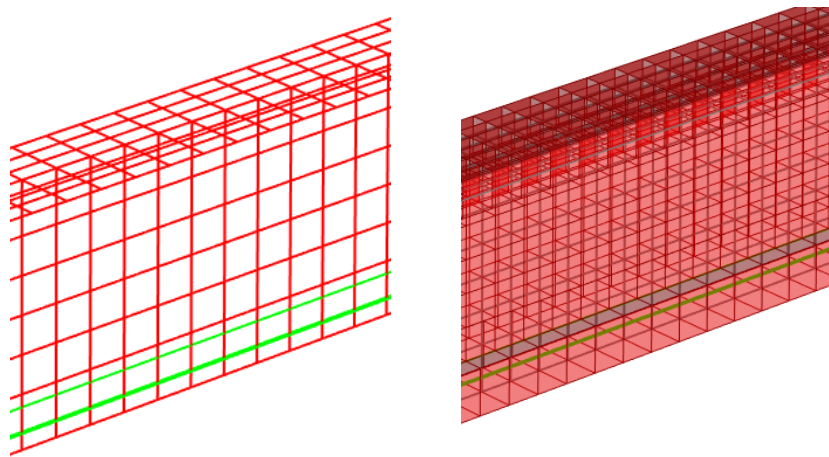


Figura 2 - Representação da seção da viga. O talão está modelado como uma chapa espessa.

A seção nesta análise não leva em conta a torção de Saint Venant (torção circular) no talão. Bastaria criar dois modelos de chapas horizontais adicionais delimitando o talão inferior para levar em conta este efeito. Este procedimento numérico apresenta diversos problemas de resolução, que serão comentados aqui, evidenciando a necessidade de uma avaliação criteriosa dos resultados numéricos. Inicialmente o modelo não pode ser criado de forma a constituir um mecanismo, o que é evidente. Para uma análise elástica de flambagem viável, em que o sistema suspenso por cabos deveria se comportar como se apresentasse várias rótulas, é necessário que na região dos pontos dos cabos seja criado um elemento de comprimento pequeno com conexões rígidas de extremidade, mas com rigidez pequena. A análise de flambagem irá determinar coeficientes amplificadores da carga atuante pré-definida com valores positivos e negativos. Os valores negativos devem ser descartados, pois indicam cargas críticas de sentido contrário ao da gravidade. Os modos críticos de flambagem devem ser determinados como aqueles que provocam de forma evidente um modo típico de deslocamentos igual ao de flambagem lateral de vigas.

Os coeficientes de carga crítica amplificadores das cargas de peso próprio, determinados pelo programa SAP2000, são apresentados a seguir. Os fatores devem ser maiores do que 3 (ver adiante).

Tabela 1 – Fatores de carga crítica considerando apenas a carga de peso próprio

Tipo 1 4 Lingas	Tipo 2 Rotul.	Tipo 3 Trap.	Tipo 4 Rotul. L.	Tipo 5 Trap. L.	Tipo 6 Rotul. C.	Tipo 6 Fl.Reduz	Tipo 7 Trap. C.	Tipo 7 Fl.Reduz
13.4	1.7	7.54	1.52	7.34	4.93	3.5	16.32	12.2

Os deslocamentos do modo de flambagem lateral para o Tipo 7 estão mostrados abaixo.

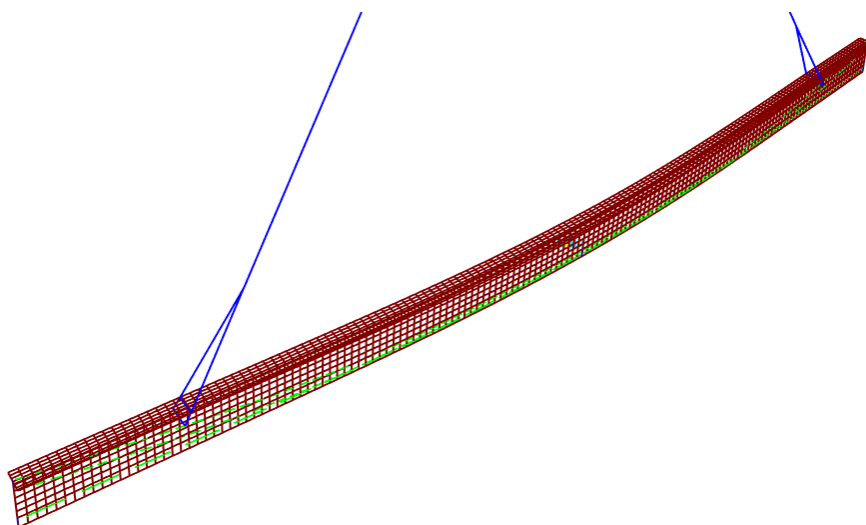


Figura 3 - Modo de flambagem para a suspensão do tipo 7

Os tipos 2, 4, 6 apresentam fixações por meio de alças construídas no eixo da viga no flange superior, o que não é recomendado.

Os tipos 3, 5, 7 apresentam fixações com pinos de suspensão e lingas em forma de trapézio.

Os tipos 6 e 7 foram calculados adicionalmente com redução de rigidez para o flange superior (indicado por “Fl. Reduz.” na Tabela 1). A protensão pode provocar fissuração no flange superior, motivada pela distância reduzida entre pontos de apoio dos cabos de suspensão.

Os tipos 4 e 5 apresentam condições relativas piores de flambagem, motivadas pela força normal ao longo de toda a viga.

Por meio deste estudo constata-se que não se deve utilizar alças ligadas diretamente às almas para suspender vigas longas. Os respectivos fatores de carga crítica são muito baixos. Assim, os tipos 2, 4 e 6 não devem ser usados. O tipo 1, empregado para suporte das vigas nas treliças de montagem, é adequado pelo engaste que proporciona na suspensão das vigas. Na suspensão com um guindaste deve-se sempre utilizar trapézios com lingas inclinadas atuantes no pino de suspensão, como mostra a Figura 3.

A suspensão com o tipo 7 necessita de um estudo muito apurado de fissuração no flange superior, pois a queda de rigidez pode ser pronunciada e fora de controle, motivada pelo elevado momento de protensão (com sinal diferente) em relação ao momento de cargas permanentes.

Neste estudo as cargas de peso próprio não foram, a priori, incrementadas com os coeficientes de segurança que deveriam ser adotados numa verificação no ELU, como será mostrado adiante. Os coeficientes fornecidos são relativos a uma carga crítica determinada com o modelo apresentando a rigidez no ELS.

Por isso, recomenda-se utilizar um coeficiente de segurança de pelo menos 3, em vista das incertezas do comportamento da viga no ELU (ver comentários adiante).

As cargas críticas de flambagem lateral foram determinadas também para o apoio da viga sobre um neoprene flexível e, também, para a condição em que as transversinas de apoio estiverem já concretadas.

Os coeficientes de carga crítica determinados foram 9.9 para o apoio sobre o neoprene e 14.1 para a situação depois da concretagem da transversina de apoio. As molas representantes do aparelho de neoprene aplicadas ao modelo foram obtidas de acordo com a norma europeia EN 1337-3 (2005).

Uma observação deve ser feita sobre a suspensão do tipo 7. Como se nota, o pino de suspensão está aplicado na alma da longarina com espessura estimada na ordem de 0.25m. Há necessidade de ser projetada com cuidado a união das lingas inclinadas de suspensão com as extremidades do flange superior, para que a longarina não gire em torno do apoio do eixo na alma. Além disso, o pino de suspensão precisa ser dimensionado adequadamente. Se estas condições não forem atendidas, o coeficiente de carga crítica cai de 12.2 para um perigoso 2.3.

Deve ser ressaltado que os coeficientes de carga crítica foram fornecidos em função das cargas de peso próprio. Se for considerado um coeficiente de impacto de 1.2 durante a suspensão, todos os coeficientes apresentados devem ser reduzidos pelo fator multiplicativo $1/1.2=0.83$.

Este método de verificação por meio da carga crítica elástica, evidentemente, não é moderno, mas era aplicado intensamente nas décadas passadas. No livro importantíssimo e magistral sobre concreto protendido, do prof. LEONHARDT (1973), no seu capítulo 15, é sugerido efetuar a análise desta forma, utilizando um coeficiente mínimo de segurança de 3.0, em vista dos inúmeros problemas relativos a esta análise e por não ser um método baseado numa verificação no ELU.

Análise não linear geométrica elástica

Pode ser feita uma análise elástica não linear geométrica, desde que as tensões do concreto se mantenham aproximadamente elásticas e sem fissuração. As ações a serem impostas são as solicitantes no ELU. Esta análise pode ser feita por programas robustos de análise. No caso do SAP2000 esta análise é designada de P-Delta com grandes deslocamentos. Caso a convergência dos deslocamentos seja conseguida e as tensões ao longo da estrutura se mantenham quase elásticas com a protensão, esta análise pode indicar uma boa avaliação da segurança à flambagem lateral. Foi feita uma análise deste tipo para a modalidade Tipo 7 de suspensão para o exemplo hipotético. A ação do vento implica num deslocamento transversal até que a estrutura encontre o equilíbrio. A figura abaixo mostra o deslocamento transversal da estrutura sob ação do vento. As forças de tração obtidas nesta análise precisam ser resistidas por armadura a ser especificamente determinada com tensões baixas.

Seria possível efetuar uma análise não linear física e geométrica com o SAP2000, mas seria necessário definir armaduras da alma e do flange superior nas duas direções. Estas análises efetuadas automaticamente

pelos programas robustos precisariam ser analisadas e comparadas por processos iterativos sob controle do usuário.



Figura 4 - Deformada da longarina para ações solicitantes no ELU

A importância da resistência do flange superior

Verifica-se por análise e por avaliação do comportamento da viga sob as condições de flambagem, que o flange superior não pode ser muito flexível e não deve apresentar fissuração elevada. Durante o evento de flambagem lateral o flange superior atua como se fosse um pilar horizontal, que recebe um fluxo de forças de cisalhamento ao longo do seu comprimento. Isto significa que a força normal ao longo deste flange tem uma configuração similar ao de uma parábola. É possível, com programas existentes específicos, examinar o comportamento não linear físico e geométrico deste pseudopilar isolado, sujeito a forças normais e momentos fletores, com a armadura longitudinal que foi nele instalada. No sentido vertical, este pseudopilar isolado está ligado à alma da viga e não necessita ser avaliado. Já no sentido horizontal, é necessário examinar se ele consegue suportar os esforços de compressão e de momento horizontal transversal por meio de uma análise não linear física e geométrica clássica. Um programa que consegue efetuar esta análise pode ser o programa Flamob1 (também designado Trak1 ou Knick), preparado por GALGOUL (1985) na sua tese de doutorado em Munique, Alemanha. Este programa permite aplicar cargas longitudinais e transversais ao longo da peça. As forças horizontais aplicadas pela alma ao flange são determinadas em função dos fluxos de cisalhamento da alma (incluindo outros efeitos) com base nos momentos fletores determinados no ELU, provocados pelas cargas de peso próprio, impacto, vento e protensão multiplicadas pelos devidos coeficientes de segurança. Esta verificação está associada aos momentos de empenamento (flexo-torção) que se formam na seção laminar da viga. Os momentos de Saint Venant (torção circular) também são criados, mas têm importância menor. Esta verificação é uma simplificação em relação a uma verificação rigorosa. Na realidade, a verificação final precisa ser feita como evidenciado no parágrafo acima “Critério rigoroso de verificação”.

Análise do flange superior como uma peça comprimida isolada

Será apresentado, a seguir, um procedimento simples para a avaliar se o flange superior de uma determinada longarina é capaz de suportar os esforços de compressão que ocorrem quando os esforços no ELU são aplicados no sistema de viga na sua suspensão com auxílio de cabos.

Será feita uma verificação aproximada no caso de suspensão acima definido como tipo 7. O flange superior será considerado como pseudopilar isolado. Foi processado o modelo de elementos finitos sob a combinação

$1.2 \cdot \text{PesoPr} + 0.84 \cdot \text{Vento} + 1.3 \cdot \text{Imp} + 0.9 \cdot \text{Prot}$, como definido acima. Deve ser observado que a ação do vento é exagerada, pois uma montagem com guindaste não deve ser efetuada com condições inadequadas de vento forte. As forças unitárias de compressão (kN/m) no sentido longitudinal no flange superior são mostradas a seguir. Estes esforços foram determinados por meio de uma análise não linear elástica geométrica com grandes deslocamentos (SAP2000) do modelo da suspensão de tipo 7.

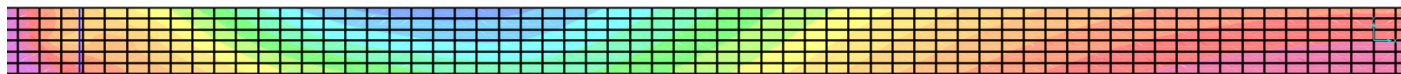


Figura 5 – Forças de compressão unitárias (kN/m) no flange superior para metade da viga entre o ponto de apoio do cabo (à esquerda) e o centro da viga (à direita)

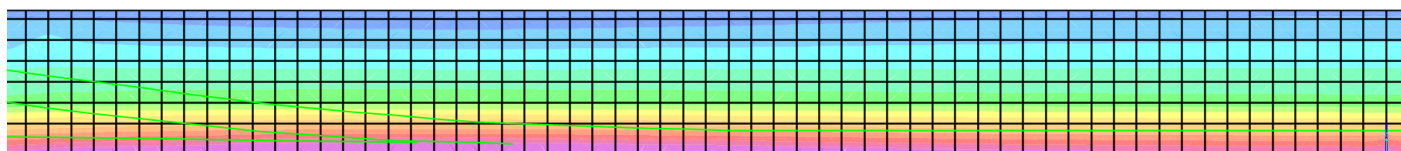


Figura 6 – Forças de compressão unitárias (kN/m) na alma para metade da viga entre o ponto de apoio do cabo (à esquerda) e o centro da viga (à direita)

Sabe-se que a protensão aderente em peças comprimidas não provoca flambagem. Aqui, o efeito da protensão é de aliviar a força de compressão no flange superior. Os momentos introduzidos no flange superior são causados pelo vento (e também pela configuração postulada de erro geométrico). Nota-se que os esforços normais longitudinais não são constantes, como previsto no flange superior.

Como a geometria do modelo não levou em conta os erros geométricos, um momento adicional foi adicionado para considerar este efeito na verificação.

Os traçados das forças normais e momentos fletores “horizontais” no flange superior são mostrados abaixo ao longo da dimensão longitudinal do pseudopilar.

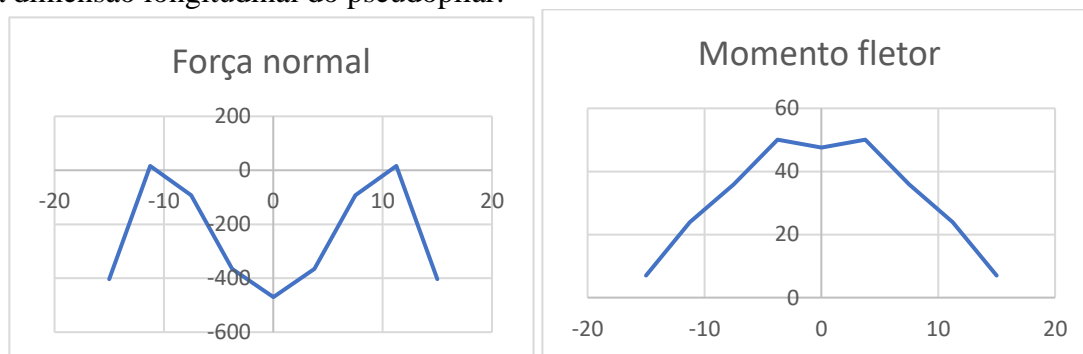


Figura 7 - Forças normais e momentos fletores no flange superior

A armadura longitudinal proposta no flange foi de 12 barras de Ø10mm de CA-50, uma armadura leve usual. A seção considerada do flange, neste exemplo hipotético, possui 0.75m de largura e 0.25m de espessura média. O f_{ck} utilizado foi 40MPa. O pseudopilar isolado tem 30m de comprimento, que é a distância entre apoios dos cabos de suspensão. O programa Flamob1 de GLAGOUL (1985) permite a aplicação de forças quaisquer, assim como definições de restrições de apoio ao longo do pilar. O processamento com os dados numéricos fornecidos mostrou que o pseudopilar horizontal está estável.

Conclusões

Há necessidade de estudar a estabilidade à flambagem lateral de longarinas durante a montagem com guindastes por meio de estudos cuidadosos. Está havendo tendência atual de reduzir a largura dos flanges de compressão das longarinas. Esta redução pode provocar problemas de estabilidade lateral em casos extremos. Por isso, uma verificação específica na fase de montagem deve ser feita pelo projetista da obra. Sabe-se que, em algumas obras, longarinas com flanges relativamente curtos têm se comportado de forma inadequada. Por outro lado, reduzir a largura das longarinas demasiadamente implica em dificuldades no dimensionamento das lajes de rolamento sobre as longarinas com alturas maiores, levando em conta a

espessura do flange das longarinas, em virtude da verificação necessária da ligação entre o flange e a laje no plano da emenda horizontal. Pesquisas do comportamento desta união deveriam ser feitas para definir o comprimento adequado dos flanges para que seja possível adotar uma altura maior no dimensionamento das lajes de rolamento.

A suspensão deve ser feita sempre de forma a evitar o giro da longarina no ponto de apoio do cabo de suspensão. Suspensão com alças simples não é adequada. É aconselhável sempre adotar um padrão de suspensão com auxílio de um trapézio preso ao pino de suspensão. Quando a suspensão é feita por meio de um só guindaste atuam forças de compressão adicionais nas longarinas, que reduzem a segurança da operação de montagem.

A forma mais simples de avaliação é por meio de uma determinação de carga crítica de flambagem lateral elástica com a utilização de programas robustos de análise. Mas, este método não segue a tradição correta de examinar a estrutura no regime do ELU.

Pode ser feita análise elástica não linear elástica com determinação de grandes deslocamentos com auxílio de programas robustos com as ações solicitantes no ELU, desde que as tensões na estrutura se mantenham quase elásticas. Se a convergência dos deslocamentos for conseguida, a análise pode ser considerada uma boa avaliação do problema.

A solução da verificação do problema de estabilidade lateral das longarinas só pode ser feita de forma satisfatória por meio de uma análise não linear física e geométrica sofisticada, levando em conta todas as variáveis em jogo do problema, por meio de uma análise com elementos finitos de placas retangulares considerando a armadura de CA-50 e a de protensão. O ideal seria desenvolver um programa específico de análise do problema, sem a necessidade de utilização de programas poderosos e dispendiosos na análise destes problemas de estabilidade lateral de longarinas de concreto protendido. Até lá não se vislumbra outra alternativa senão utilizar, por meio de complementações especiais, os programas clássicos de análise estrutural. Mas, há necessidade de especificar, com base em dados experimentais, o comportamento de concreto armado dos painéis no regime não linear físico, fato este que ainda não é usual nos programas de análise tradicionais.

As armaduras longitudinais dos flanges superiores de longarinas quase sempre são muito leves. É claro que, se a longarina na suspensão se tornar crítica quanto à flambagem, armaduras mais pesadas entram em cogitação. Mas, para isto, estudos mais cuidadosos precisam ser efetuados.

Referências

- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, CEB-FIP Model Code, 1990.
- FÈDERATION INTERNATIONALE DU BÉTON, FIB Model Code for Concrete Structures, 2010.
- ABNT, Norma NBR 6118, Projeto de Estruturas de Concreto-Procedimento, 2014.
- CURY, R., FREITAS, L. B., DIAZ, B. E., A análise não linear de estruturas de concreto armado para determinação de esforços de 2ª ordem em estruturas de portos, 51º Congr. Bras. Concreto, 2009.
- SILVA, A. A., Estudo das Fases Construtivas do Vão Principal de uma Ponte Estaiada, TCC na UFRJ, 2017.
- SCHULZ, M, AVILA M. P. S. Analysis of Reinforced Concrete Shells with Transverse Shear Forces, ASCE, Journal Struct. Eng., July 2010.
- COLLINS, M. P. & MITCHELL, D., Prestressed Concrete Structures, Printice Hall, 1991.
- BSI European Standard BS-EN-1337-3 Structural Bearings-Elastomeric Bearings, 2005.
- LEONHARDT, F., Spannbeton für die Praxis, 3te Auflage, Wilhelm Ernst & Sohn, 1973.
- ABNT, Norma NBR 8681. Ações e segurança nas estruturas-Procedimento, 2003.
- GALGOUL, N. S., Contribution to the Design of slender Reinforced Concrete Columns subjected to Biaxial Bending and Axial Compression considering short and long Term Loadings, Ernst & Sohn., 1985.
- TIMOSHENKO, S. P. & Gere, J. M., Theory of Elastic Stability, 2nd Edit., McGraw Hill Book Co., 1963.