

Anna Carolina Haiduk Nelsen

Mestranda em Construção Civil no Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos

Alex Sander Clemente de Souza

Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos

Dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto protendidas

RESUMO

Apresentam-se e discutem-se aspectos fundamentais sobre o comportamento estrutural, vantagens e desvantagens, procedimentos de projeto e aspectos construtivos referentes à utilização de protensão externa em vigas mistas de aço e concreto. O uso da protensão em estruturas de aço e mistas de aço e concreto pode ser utilizada para vencer grandes vãos, atender à limitações arquitetônicas como limitação de altura de viga ou até mesmo para reforçar e recuperar estruturas metálicas ou mistas já existentes, como passarelas, viadutos e pontes. Além disso, é mais uma alternativa para projetos estruturais que poderá contribuir na busca por eficiência construtiva, sobretudo no sentido da redução do consumo de materiais, custos e prazos de execução.

INTRODUÇÃO

A protensão é uma técnica construtiva bastante utilizada para soluções estruturais envolvendo grandes vãos como, por exemplo, em grandes coberturas, passarelas e pontes. A técnica já vem sendo utilizada com sucesso e possui alto nível de desenvolvimento técnico e projetivo nas estruturas de concreto armado e nos elementos em concreto pré-fabricado. Porém, a técnica da protensão pode ser aplicada também nas estruturas metálicas e nas estruturas mistas de aço e concreto, resultando em elementos de grande eficiência estrutural sendo capaz de vencer grandes vãos, resistindo a carregamentos elevados com peso reduzido, menores dimensões de seções transversais, facilidade construtiva e, conseqüentemente, economia.

Entre as vantagens da protensão externa está a facilidade de inspeção e manutenção durante e após a protensão.

O conceito de protensão em estruturas de aço, segundo Troitsky (1990), vem sendo utilizado desde 1837. Porém, apenas em meados da década de 1930, F. Dischinger na Alemanha, Gustave Magnel na Bélgica, entre outros pela Europa, iniciaram estudos teóricos e experimentais consistentes e a partir da década de 1950 se verificou publicações de artigos técnico-científicos mais expressivos sobre o tema.

Com isso, o interesse por este sistema construtivo foi sendo incrementado dando origem a pesquisas teóricas e experimentais para entender o comportamento estrutural de vigas metálicas e vigas mistas de aço e concreto com protensão externa. Entre as pesquisas mais recentes a cerca do comportamento de vigas metálicas e

mistas protendidas destacam-se os seguintes autores: Bradford (1991); Nunziata (1999); Nunziata (2003); Nunziata (2004); Belletti & Gasperi (2010), Safan & Kohoutková (2001), Chen (2005) e Chen & Jia (2010).

No Brasil, têm-se registros de alguns estudos sobre protensão em vigas de aço como, por exemplo, os trabalhos de Sampaio Júnior (1976) e de Gonçalves (1992) que desenvolveram procedimentos analíticos para dimensionamento e aplicações em reforço de pontes. Mais recentemente, Ferreira (2007) e Rezende (2007) analisaram numericamente o comportamento estrutural de vigas metálicas protendidas externamente com seção transversal tipo I. Com relação ao uso de protensão em vigas mistas de aço e concreto não foram encontrados estudos no Brasil.

VIGAS MISTAS PROTENDIDAS: CARACTERIZAÇÃO

Nas vigas mistas protendidas podem ser utilizados qualquer tipo de perfil metálico associado ao concreto estrutural. Esse concreto pode ser a própria laje ou pode estar revestindo total ou parcialmente a seção de aço. Os cabos de protensão podem ser posicionados fora da seção transversal ou no interior da mesma. A Figura 1 apresenta os componentes de uma viga mista protendida e na Figura 2 algumas alternativas de seções transversais.

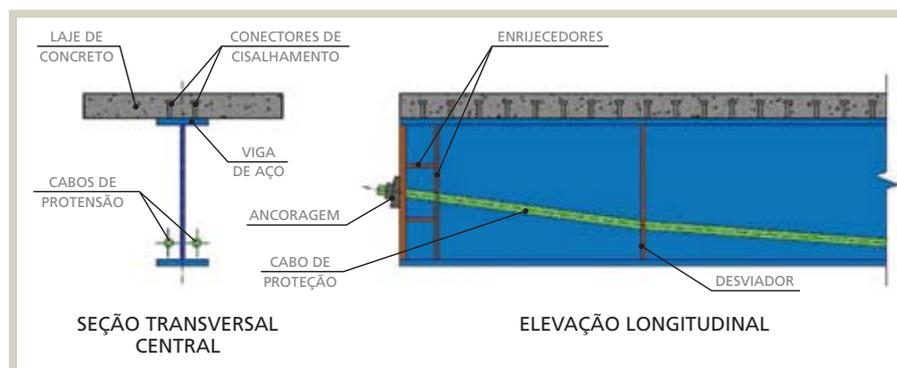


Figura 1: Viga mista de aço e concreto protendida – croqui esquemático

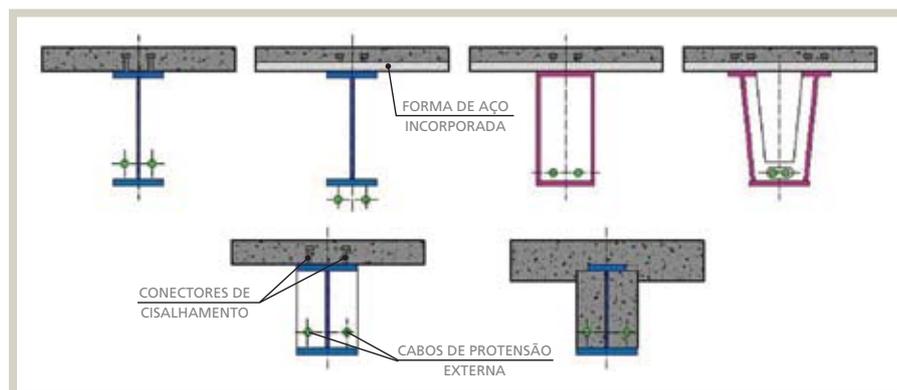


Figura 2: Exemplos de seções transversais

Os cabos e acessórios para a protensão são os mesmos utilizados nas estruturas de concreto, com detalhes adequados de ancoragem (Figura 3) e desviadores (Figura 4).



Figura 3: Detalhes de ancoragem NUNZIATA (1999)

Os desviadores são utilizados para manter o traçado desejado do cabo enquanto as ancoragens são usadas para manter e transferir a força de protensão; podem ser constituídos por chapas ou pinos soldados no perfil metálico. Na Figura 4 apresentam-se detalhes esquemáticos de desviadores.

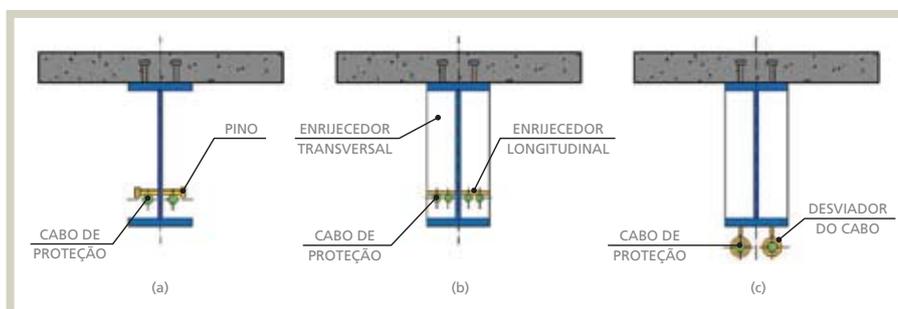


Figura 4: Tipos de desviadores: (a) Pino; (b) Enrijecedor; (c) Outro

O posicionamento e o traçado dos cabos, que pode ser retilíneo ou poligonal, devem ser definidos em função dos esforços atuantes sem perder de vista os condicionantes construtivos. Algumas possibilidades de traçado do cabo estão na Figura 5.

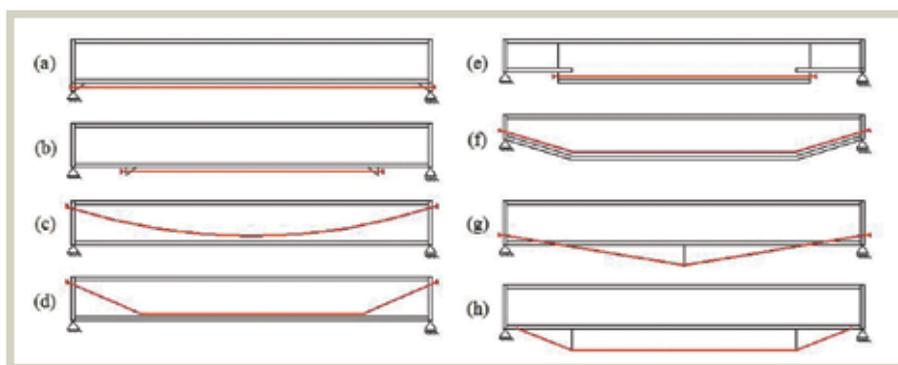


Figura 5: Possíveis traçados do cabo de protensão

Cabos com traçado reto são mais comuns em vão com momentos fletores uniformes e devem ser posicionados abaixo do eixo neutro para maximizar a excentricidade. Para os cabos com traçado poligonal ou parabólico (Figura 5c e Figura 5d) a força de protensão tem maior valor no ponto de inflexão do cabo, que deve coincidir com a seção mais solicitada. A configuração com traçado poligonal é mais complicada, pois exige maior número de desviadores, detalhes construtivos específicos, além de maior consumo de material, uma vez que também se necessita um comprimento maior de cabo. Os cabos posicionados fora da seção (Figura 5g, Figura 5h) apresentam maior eficiência para a protensão e comportamento posterior do cabo quando solicitado; porém

apresentam alguns inconvenientes com o transporte e manuseio do elemento e proteção do cabo contra corrosão.

PROCEDIMENTO CONSTRUTIVO

O comportamento e o procedimento de projeto de vigas mistas protendidas dependem da sequência construtiva. As variações principais são a utilização ou não de escoramento durante a concretagem da laje ou da capa e o momento da aplicação da protensão. Muitas vezes é vantajoso ou conveniente eliminar os escoramentos. Isto pode ser feito desde que a viga de aço isolada seja verificada para uma situação transitória de construção.

Em relação ao momento da aplicação da protensão pode-se ter: (i) protensão na viga de aço antes da concretagem da laje; (ii) na viga de aço durante a concretagem da laje; (iii) na viga mista após a cura do concreto. Em função disto, as vigas mistas podem ser classificadas em: pré-tracionada (ou pré-tração) ou pós-tracionada (ou pós-tração). Entende-se como pré-tração a aplicação da protensão externa ao perfil de aço antes do lançamento do concreto da laje e, como pós-tração a protensão realizada após a cura do concreto quando já há o comportamento misto. No Quadro 1 apresenta-se um resumo comparativo dos estágios de carregamento de vigas mistas protendidas aplicando-se as técnicas da pré-tensão e pós-tensão.

Estágio de carregamento	PRÉ-TRACIONADA	PÓS-TRACIONADA
1	Peso próprio da viga de aço	Peso próprio da viga de aço
2	Aplicação da protensão	Peso próprio do concreto da laje
3	Peso próprio do concreto da laje	Aplicação da protensão
4	Incremento na força de protensão	Carregamento permanente
5	Carregamento permanente	Carregamento de serviço
6	Carregamento de serviço	Incremento na carga de protensão
7	Incremento na força de protensão	-

Quadro 1: Quadro comparativo dos estágios de carregamento da viga mista protendida

A diferença no somatório de tensões varia muito pouco, porém a sequência de verificações é bem diferente. Estudos recentes demonstram maior economia e facilidade construtiva com o uso da pré-tração.

PROCEDIMENTOS DE PROJETO PARA VIGAS MISTAS PROTENDIDAS

Apresenta-se em seguida, de forma sintética, os procedimentos para determinação da capacidade resistente de vigas mistas protendidas em região de momentos positivos. A formulação apresentada aplica-se às vigas mistas com iteração total, não escoradas, com perfis de aço de seção tipo I compactas (livre de flambagem local), cabos com traçados retilíneos e materiais de resistência usual, além das demais restrições para vigas mistas de aço e concreto da NBR 8800:2008. Com base nestas premissas admite-se como estado limite último a plastificação total da seção (Figura 6), porém impondo que o cabo de protensão permaneça em regime elástico. No Quadro 2 está a formulação para o caso de vigas mistas com pós-tração.

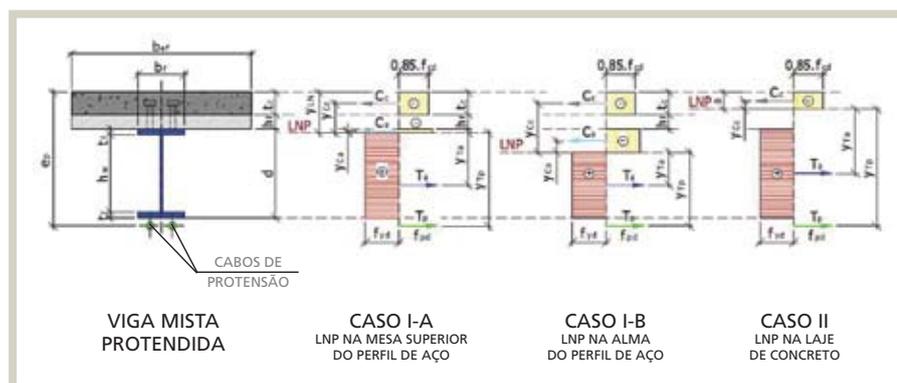


Figura 6: Distribuição de tensões em vigas mistas sob momento positivo – regime plástico

Posição da LNP	CASO I-A MESA DO PERFIL DE AÇO
Condição	$C_a \leq A_f f_{yd}$
T_a	$(2A_f + A_w) f_{yd}$
T_p	$A_p f_{pd}$
C_c	$0.85 f_{cd} b_{ef} t_c$
C_a	$0,5(T_a + T_p - C_c)$
a	-
y_{LN}	$t_c + h_f + \frac{C_a}{b_f f_{yd}}$
y_{Ta}	$0,5 \times (t_c + h_f + d - y_{LN})$
y_{Tp}	$e_p - y_{LN}$
y_{Cc}	$y_{LN} - 0,5 \times t_c$
y_{Ca}	$0,5 \times (y_{LN} - t_c - h_f)$
M_{Rd}	$T_a y_{Ta} + T_p y_{Tp} + C_c y_{Cc} + C_a y_{Ca}$

Posição da LNP	CASO I-B ALMA DO PERFIL DE AÇO
Condição	$C_a > A_f f_{yd}$
T_a	$(2A_f + A_w) f_{yd}$
T_p	$A_p f_{pd}$
C_c	$0.85 f_{cd} b_{ef} t_c$
C_a	$0,5(T_a + T_p - C_c)$
a	-
y_{LN}	$t_c + t_f + h_f + \frac{(C_a - A_f f_{yd})}{t_w f_{yd}}$
y_{Ta}	$0,5 \times (t_c + h_f + d - y_{LN})$
y_{Tp}	$e_p - y_{LN}$
y_{Cc}	$y_{LN} - 0,5 \times t_c$
y_{Ca}	$0,5 \times (y_{LN} - t_c - h_f)$
M_{Rd}	$T_a y_{Ta} + T_p y_{Tp} + C_c y_{Cc} + C_a y_{Ca}$

Posição da LNP	CASO II MESA DE CONCRETO
Condição	$C_c > T_a + T_p$
T_a	$(2A_f + A_w)f_{yd}$
T_p	$A_p f_{pd}$
C_c	$0,85 f_{cd} b_{ef} t_c$
C_a	-
a	$\frac{(T_a + T_p)}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_{ef}}$
y_{LN}	-
y_{Ta}	$0,5 \times d + t_c + h_f - a$
y_{Tp}	$e_p - a$
y_{Cc}	$0,5 \times a$
y_{Ca}	-
M_{Rd}	$T_a y_{Ta} + T_p y_{Tp} + C_c y_{Cc}$

Quadro 2: Formulação para determinação do momento fletor resistente de cálculo

Onde: f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto; b_{ef} representa a largura efetiva da laje de concreto; t_c é a espessura da laje de concreto; A_f , A_w e A_p são respectivamente as áreas da seção transversal da mesa do perfil de aço, da alma do perfil de aço e do cabo de protensão; f_{yd} e f_{pd} as resistências de cálculo do aço estrutural e do aço de protensão, respectivamente; h_f é a altura da forma de aço incorporada, quando existir; C_c e C_a são as forças de compressão na laje de concreto e na viga de aço, respectivamente; (C_c) é menor que o T_a e T_p são as forças de tração na viga de aço e no cabo de protensão, respectivamente; b_f é a largura da mesa do perfil de aço; t_f e t_w são as espessuras da mesa e da alma do perfil de aço, respectivamente.

A força de protensão total no cabo será $P = P_0 + \Delta P_g + \Delta P_q$, onde P_0 representa a força de protensão inicial, ΔP_g incrementos da força de protensão devido a peso próprio e ΔP_q incrementos da força de protensão devido a sobrecarga de utilização. Essas parcelas de incremento de protensão variam conforme a sequência construtiva. A força de protensão inicial é limitada pela capacidade ao escoamento do aço do perfil - Quadro 3.

FORÇA DE PROTENSÃO INICIAL	INCREMENTO NA FORÇA DE PROTENSÃO
$P_0 = \frac{f_{yd} + \frac{M_g}{W}}{\frac{\beta \times \gamma_p}{A_a} + \frac{\beta \times \gamma_p \times e}{W}}$ <p>Onde: M_g é o valor do momento fletor máximo referente ao peso próprio da viga considerando o coeficiente de segurança; W é o módulo de resistência elástico e é a excentricidade do cabo; A_a é a área da viga de aço; γ_p é o coeficiente de segurança aplicado à força de protensão; β é o coeficiente que leva em conta as perdas de protensão.</p>	$\Delta P = \frac{e \int_0^l M(x) dx}{e^2 + \frac{E_a I}{E_p A_p} + \frac{I}{A}}$ <p>Onde: M é o momento aplicado após a protensão e é a excentricidade do cabo; E_p é o módulo de elasticidade do cabo; l é o comprimento do cabo; I é o momento de inércia da viga; A e A_p são as áreas das seções transversais da viga e do cabo.</p>

Quadro 3: Determinação da força de protensão

Adicionalmente deve ser verificada a possibilidade de flambagem distorcional no perfil de aço provocada pelo acréscimo de tensão de compressão na viga devido à protensão. A instabilidade distorcional pode constituir um limitante para a força de protensão e, conseqüentemente, para a capacidade resistente da viga. É possível analisar esse fenômeno pela NBR 8800:2008.

Não se pode esquecer das perdas de protensão (representada pelo parâmetro β) que podem ocorrer pela fluência e retração do concreto, por atrito e pela variação de temperatura. Na falta de processos mais rigorosos para estimativas das perdas de protensão, Troitsky (1990) propõe para que o dimensionamento utilize 85% da protensão inicial. Já Nunziata (2004) recomenda um acréscimo de 10% na protensão inicial para considerar tais perdas. Ou seja, as perdas variam de 10% a 15%.

COMENTÁRIOS FINAIS

Neste artigo foram apresentados e discutidos os princípios fundamentais do uso de protensão em vigas mistas de aço e concreto bem como as hipóteses construtivas e de projeto. Os estudos iniciais demonstraram a viabilidade e levantaram algumas vantagens dessa técnica, que propicia um aproveitamento das características positivas de cada material. O uso da protensão proporciona uma redução das tensões máximas de sollicitação da viga e, conseqüentemente, possibilita uma redução da seção transversal do perfil de aço,

desde que respeitadas algumas restrições de projeto. Embora pouco explorado no Brasil, nota-se que na literatura internacional são vários os estudos teóricos e experimentais que têm como objetivo investigar o comportamento e propor aplicações para esse elemento estrutural. Finalmente, ressalta-se a grande potencialidade de aplicação em projetos de estruturas de grande porte ou na recuperação e reabilitação de estruturas existentes. ■

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP pelo apoio para desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- **BELLETTI, B.; GASPERI, A.** Behavior of prestressed steel beams. *Journal of Structural Engineering*, [S.l.], v. 136, no. 9, p. 1131-1139, Sept. 2010.
- **BRADFORD, M. A.** Buckling of prestressed steel girders. *Engineering Journal*, American Institute of Steel Constructions, [S.l.], v. 34, p. 98-101, 1991.
- **CHEN, S.** Experimental study of prestressed steel-concrete composite beams with external tendons for negative moments. *Journal of Constructional Steel Research*, [S.l.], v. 61, n. 12, p. 1613-1630, Dec. 2005.
- **CHEN, S.; JIA, Y.** Numerical investigation of inelastic buckling of steel-concrete composite beams prestressed with external tendons. *Thin-Walled Structures*, [S.l.], v. 48, p. 233-242, Nov. 2010.
- **FERREIRA, A. C.** Vigas metálicas protendidas: análise estática, modal e de ruptura do cabo de protensão e aplicativo computacional para projetos. 276 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- **GONÇALVES, R. M.** Alguns aspectos relativos à inspeção e recuperação de pontes de aço: ênfase em pontes ferroviárias. 309 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.
- **NUNZIATA, Vincenzo.** Prestressed steel structures. *Structure in acciaio precompresso*. In: CONGRESSO C.T.A., XVII, 1999. Napoli. Proceedings... Napoli: [s.n.], 1999. p. 6.
- **NUNZIATA, Vincenzo.** Prestressed steel structures design: a new frontier for structural engineering. In: ISCE-02 Second International Structural Engineering and Construction Conference, 2nd, 2003. Roma. Proceedings... Roma: [s.n.].
- **REZENDE, C. R.** Análise estrutural de vigas metálicas protendidas. 2007. 119 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2007.
- **SAFAN, M.; KOHOUTKOVÁ, A.** Experiments with externally prestressed continuous composite girders. *Acta Polytechnica*, Czech Technical University Publishing House, v. 41, n. 3/2001, p. 65-73, 2001.
- **SAMPAIO JR., C. F.** Dimensionamento econômico de vigas protendidas de aço. 1976. 133 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1976.
- **TROITSKY, M. S.** Prestressed steel bridges: theory and design. 16th ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 386 p.

Conselho Editorial Técnico Científico: Eng. Luiz Carlos Caggiano Santos - Presidente da ABCEM e Alex Sander Clemente de Souza - D.S., UFScar, Carlos Eduardo Javaroni - D.Sc., UNESP e Zacarias M. Chamberlain Pravia - D.Sc., UPF

Associe-se à ABCEM

Mão de Obra

Desenvolvimento e Qualificação:
Cursos, Workshops,
Seminários e Palestras

Mercado

Promoção e Disseminação
da Construção Metálica

Visibilidade

Eventos, Feiras e Solenidades

Novas Tecnologias

Comitês Técnicos
Programas de Qualidade

Divulgação

site ABCEM +
Revista Construção Metálica

Espaço ABCEM

Utilização do Auditório e
Salas de Reunião para palestras,
cursos e treinamentos

Informações:
www.abecem.org.br



ABCEM
Associação Brasileira da
Construção Metálica