Revista da Estrutura de Aço
CBCA Centro Brasileiro da Construção em Aço
recebido: 16/04/2015
aprovado: 24/06/2015
Volume 4. Número 3 (dezembro/2015). p. 220-238 ISSN 2238-9377
Revista indexada no Latindex e Diadorim/IBICT

Análise numérica de vigas mistas de aço e concreto protendidas

Alex Sander Clemente de Souza[1*], Wanderson Fernando Maia[1], Silvana De Nardin[1]
[1] Prof. Dr. do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, alex@ufscar.br

NUMERICAL ANALYSIS OF PRESTRESSED STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAMS

Resumo
O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para análise numérica de vigas mistas de aço e concreto protendidas. Para modelagem numérica foi utilizado o pacote computacional Ansys, o qual permite modelagens via método dos elementos finitos. São discutidos os aspectos condicionantes para a escolha dos tipos de elementos finitos, malha, condições de vinculação, interação entre os materiais e procedimentos de aplicação do carregamento de modo a reproduzir adequadamente o comportamento estrutural. O modelo númerico foi validado utilizando resultados experimentais disponíveis na literatura e mostrou-se adequado para prever deslocamentos, deformações, tensões e forças de protenção nos cabos. A correlação entre resultados numéricos e experimentais foi satisfatória permitindo que o modelo numérico possa ser utilizado para outras configurações de vigas mistas de aço e concreto protendidas. Além disso, foi possível avaliar também os efeitos localizados como concentrações de tensões e deformações nas ancoragens.
Palavras-chave: *viga mista protendida, protensão, estruturas mistas*

Abstract
This paper reports the methodology adopted to represent the behavior of prestressed steel-concrete composite beam by finite element models using software ANSYS. Aspects as choice of finite element types and mesh, boundary conditions, steel-concrete interaction and sequence of loading are discussed in present paper. The non-linear 3D finite model was constructed and calibrated from experimental results of other researchers and the model was considered adequate to represents displacements, strains, stress and loads on steel tendons. Based on the good agreement between numerical and experimental results, the numerical model can be used to parametric analysis including others prestressed composite beam configurations. Besides, using the finite element model it was possible evaluated the localized effects as stress and strains concentration in the anchorages of prestressed composite beams.

Keywords: *prestressed composite beam, prestressed structures, composite structures*

* autor correspondente

1 Introdução

Vigas mistas de aço e concreto podem ser utilizadas como uma alternativa bastante vantajosa para vencer grandes vãos e elevados carregamentos como, por exemplo, em pontes, viadutos, ancoradouros e etc. No entanto, em geral a combinação de grandes vãos e carregamentos elevados resulta em alguns fatores indesejáveis do ponto de vista estrutural como: fissuração intensa na laje de concreto, redução da rigidez e aumento das deformações e deslocamentos. Nestes casos, para satisfazer aos requisitos de projeto tanto no tocante aos estados limites de serviço quanto aos estados limites últimos, a técnica da protensão mostra-se uma alternativa eficiente, originando o sistema estrutural aqui denominado *viga mista de aço e concreto protendida*.

Desde a década de 1950, diversas pesquisas têm tratado desse tema e o interesse por tal sistema estrutural e construtivo vem ganhando adeptos, gerando pesquisas teóricas e experimentais no sentido de entender o comportamento estrutural de vigas de aço e mistas de aço e concreto com protensão externa. Entre as pesquisas mais recentes abordando o comportamento de vigas de aço e mistas protendidas destacam-se os seguintes autores: Brandford (1991); Nunziata (1999); Nunziata (2003); Nunziata (2004), Belletti & Gasperi (2010), Safan & Kohoutková (2001), Chen (2005) e Chen & Jia (2010).

Os primeiros estudos envolvendo a protensão em vigas de aço e mistas investigaram experimentalmente o comportamento destes elementos com protensão externa, inicialmente considerando vão simples e, posteriormente, avaliando a influência da continuidade. Neste contexto podem ser destacados os estudos de Belenya (1977), Klaiber et al (1982), Nouraeyan (1987), Saadatmanesh et al (1989), Nunziata (1999) Safan & Kohoutková (2001), Chen & Gu (2005), Chen (2005) e Lorenc & Kubica (2006).

Entre as décadas de 1980 e 1990 as pesquisas evoluíram no sentido do desenvolvimento de modelos analíticos que permitissem fomentar códigos normativos, critérios de projeto e detalhes construtivos para vigas de aço e mistas de

aço e concreto protendidas (Nie et al. (2009), Nie et al. (2011), Ronghe & Gupta (2002)).

A partir da década de 1990 a análise numérica torna-se uma ferramenta importante e robusta para o avanço das pesquisas e a melhor compressão e reprodução do comportamento destas estruturas. A maior parte destes estudos tem como objetivo principal o desenvolvimento de formulações numéricas com base no método dos elementos finitos incluindo efeitos não-lineares, distorções e instabilidade dos elementos de aço. Em outra frente de estudos, diversas pesquisas investigam o comportamento de vigas mistas de aço e concreto protendidas utilizando pacotes computacionais comerciais também baseados no método dos elementos finitos. Neste caso, o desafio reside na modelagem e calibração dos resultados teóricos frente aos resultados experimentais; esta calibração permite a posterior extrapolação do modelo numérico para situações não analisadas experimentalmente. Nesta linha destacam-se os estudos de Brandford (1991), Dall'Asta & Zona (2005), Dall'Asta & Dezi (1998), Dabaon, Sakr & Kharoub (2005), Gara & Leoni (2006), Mahmoud et al. (2009), Belletti & Gasperi (2010) e Chen & Jia (2010).

No Brasil, o tema ainda é bastante incipiente e há um campo vasto para estudo. Dentre os estudos brasileiros destacam-se Sampaio Júnior (1976) e Gonçalves (1992) que desenvolveram procedimentos analíticos para dimensionamento de vigas de aço com protensão externa visando sua aplicação no reforço de pontes. Mais recentemente, Ferreira (2007) e Rezende (2007) analisaram, via modelagem numérica, o comportamento estrutural de vigas de aço com seção transversal tipo I protendidas externamente. Nelsen (2012) apresentou um estado da arte sobre o comportamento estrutural, critérios de projeto e construção de vigas mistas de aço e concreto protendidas, além de procedimentos para dimensionamento com base em adaptações na formulação da NBR 8800:2008 para vigas mistas convencionais. Um estudo paramétrico avaliando a influência da intensidade e da excentricidade da força de protensão, e do instante de aplicação desta força (antes ou após a cura do concreto da laje) foi apresentado por Souza et al. (2013).

Tendo em mente o panorama apresentado, o presente estudo se destina ao desenvolvimento de uma metodologia de análise numérica, para vigas mistas de aço

e concreto protendidas, utilizando o pacote computacional ANSYS e a validação deste modelo numérico por meio de resultados experimentais encontrados na literatura. Como desdobramento, uma vez validado o modelo numérico, será possível avançar para um estudo paramétrico no qual será avaliada a influência de aspectos geométricos como o traçado do cabo, dentre outros, além da análise de efeitos localizados como os que ocorrem na região de ancoragem e nos desviadores dos cabos de protensão.

2 Configuração e comportamento estrutural da viga mista protendida

O elemento estrutural aqui tratado é formado por um perfil de aço conectado por meio de conectores de cisalhamento a uma laje de concreto moldada *in loco*, e cabos de protensão. Os cabos de protensão podem ser posicionados fora da seção transversal ou no interior da mesma (Figura 1).

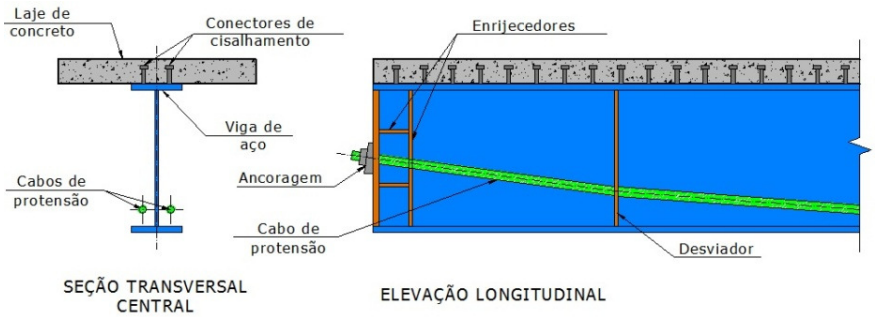


Figura 1 – Configuração usual de viga mista de aço e concreto protendida

Além da configuração apresentada na Figura 1, outras configurações e associações dos materiais aço, concreto e cabos de protensão são possíveis para formar as seções mistas protendidas. Algumas dessas possibilidades são apresentadas esquematicamente na Figura 2.

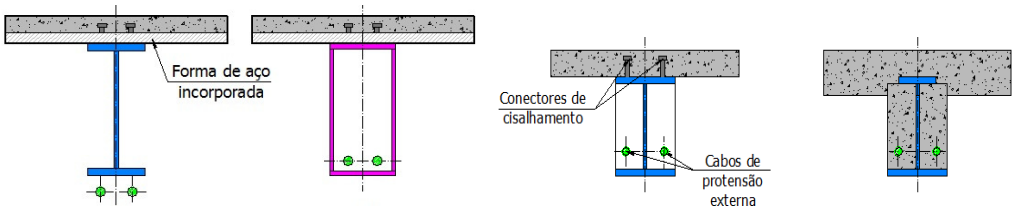


Figura 2 – Outras configurações de vigas mistas de aço e concreto protendidas

A forma de aplicação da protensão, bem como o traçado dos cabos, os acessórios de ancoragem e desviadores são basicamente aqueles já largamente utilizados nas estruturas de concreto protendido.

Quanto ao traçado dos cabos, a configuração retilínea é a mais utilizada; embora não seja a mais eficiente do ponto de vista estrutural, trata-se da mais simples do ponto de vista construtivo e de manutenção. Em Nelsen & Souza (2012), Nelsen (2012) e Nelsen & Souza (2013) são apresentadas discussões sobre o traçado e posicionamento dos cabos de protensão bem como de detalhes construtivos usuais para ancoragem e desviadores.

3 Análise numérica: metodologia

A análise numérica aqui apresentada e discutida foi desenvolvida com base no método dos elementos finitos utilizando o pacote computacional ANSYS versão 14.0 que, a partir deste ponto será referenciado apenas como ANSYS. Para o desenvolvimento desta modelagem numérica tomou-se como referência o estudo de Kotinda (2006) no qual foram desenvolvidos modelos numéricos para vigas mistas convencionais fazendo uso do mesmo pacote computacional. Também foram consideradas as estratégias de modelagem apresentadas por Ferreira (2007), Mahmoud et al. (2009), Dabaon, Sakr & Kharoub (2005) desenvolvidas para o estudo de vigas de aço e mistas de aço e concreto, ambas protendidas.

Para análise e validação do modelo numérico fez-se uso de resultados experimentais apresentados em Chen & Gu (2005) que, devido à sua importância para o presente estudo, são detalhadamente descritos a seguir.

3.1 Modelo experimental de Chen & Gu (2005)

Trata-se de uma viga mista de aço e concreto com vão de 5,0m, formada por um perfil de aço com seção transversal tipo I, laje de concreto e dois cabos de protensão. Os cabos de protensão têm configuração retilínea ao longo de todo o comprimento da viga e são formados por 7ϕ5mm com área nominal de 137,4 mm². Para constituir o comportamento conjunto, a ligação laje-perfil de aço foi executada com duas linhas

de conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça com ϕ 16 x 65 mm soldados ao longo da extensão da mesa superior do perfil considerando espaçamento longitudinal de 200 mm. Na laje de concreto foi utilizada taxa de armadura de 1%. Alguns detalhes da geometria do modelo físico são apresentados na Figura 3, enquanto na Tabela 1 são dadas as propriedades mecânicas dos materiais constituintes da viga msita.

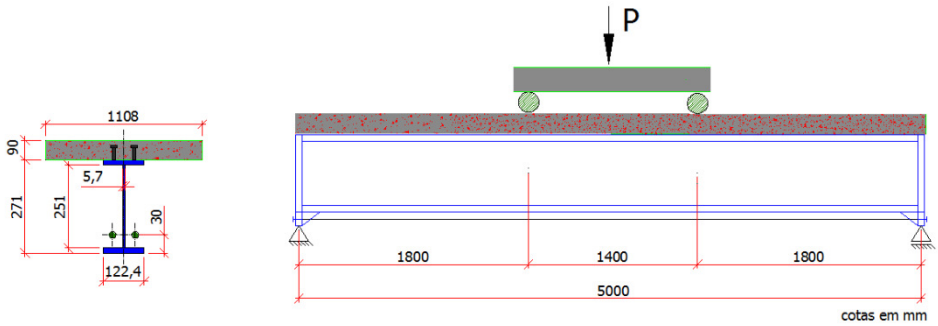


Figura 3 – Geometria da viga do protótipo analisado (Chen & Gu 2005)

Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados (Chen & Gu 2005)

Elemento	f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_c (MPa)	f_t (MPa)
Mesas do perfil de aço	492,6	593,6	-	-
Alma do perfil de aço	327,7	406,5	-	-
Concreto	-	-	41,0	3,00
Cabo de protensão	1680	1860	-	-

f_y = Resistência ao escoamento do aço
f_u = Resistência a ruptura do aço
f_c = Resistência à compressão do concreto
f_t = Resistência à tração do concreto

Estas propriedades mecânicas e características geométricas foram utilizadas no desenvolvimento da modelagem numérica descrita a seguir.

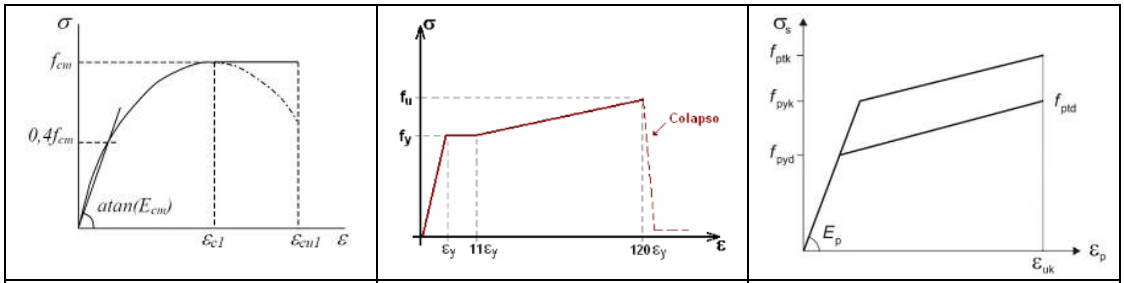
3.2 Elementos finitos

Para modelagem do perfil de aço e dos enrijecedores foi utilizado o elemento finito de casca *SHELL43* disponível na biblioteca do pacote computacional Ansys. A laje de concreto foi modelada com o elemento sólido *SOLID65*, o qual permitiu introduzir as armaduras com taxa de 1% representando as armaduras de flexão do modelo

experimental. Para modelar os cabos de protensão foi selecionado o elemento de barra denominado *LINK10*, que permite simular a protensão por meio de deformações iniciais. E, finalmente, os conectores de cisalhamento que fazem a ligação entre o perfil de aço e a laje de concreto foram modelados com o elemento de viga *BEAM 189*. Detalhes da formulação destes elementos finitos podem ser encontrados na documentação do pacote computacional ANSYS (2014).

3.3 Modelos constitutivos para os materiais

Para representar o comportamento dos materiais envolvidos neste estudo, foram utilizados três modelos constitutivos distintos respectivamente para o concreto, o aço estrutural e o aço dos cabos de protensão (Figura 4).



a) Concreto	b) aço estrutural	c) cabos de protensão

Figura 4 – Modelos constitutivos para os materiais

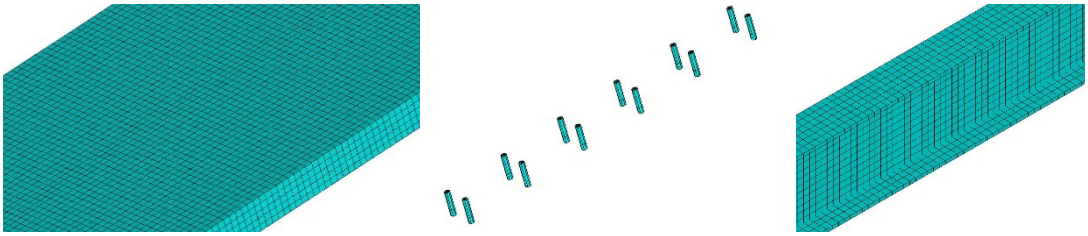
O comportamento do concreto na compressão foi representado por um modelo constitutivo multilinear com encruamento isotrópico, comportamento este apresentado no Eurocode 2 (2002 draft of prEN 1992-1-1). Para o aço estrutural foi adotado um diagrama tensão x deformação multilinear com encruamento isotrópico e consideradas as tensões equivalentes de Von Mises como critério de plastificação. Para o aço de protensão foi adotado o diagrama tensão x deformação bilinear com encruamento positivo recomendado pela norma brasileira ABNT NBR 6118:2007.

As características mecânicas necessárias aos modelos dos materiais foram extraídas de Chen & Gu (2005) - Tabela 1.

3.4 Geometria e malha de elementos finitos

Para representar, na modelagem numérica, a geometria e os componentes do modelo físico investigado experimentalmente foram modelados a laje de concreto

com as armaduras de flexão (com taxa de 1%), o perfil de aço, enrijecedores de borda, enrijecedores intermediários, cabos de protensão e conectores de cisalhamento. A Figura 5 e a Figura 6 apresenta, de forma esquemática, a geometria do modelo e seus componentes.



a) laje de concreto b) conectores de cisalhamento c) perfil de aço

Figura 5 – Geometria e componentes do modelo numérico

A viga mista foi modelada com seu comprimento total e cada conjunto discretizado separadamente, mas de maneira a coincidir os nós de cada um nas interfaces, como ilustrado na Figura 6, facilitando assim a vinculação entre os vários componentes no modelo numérico.

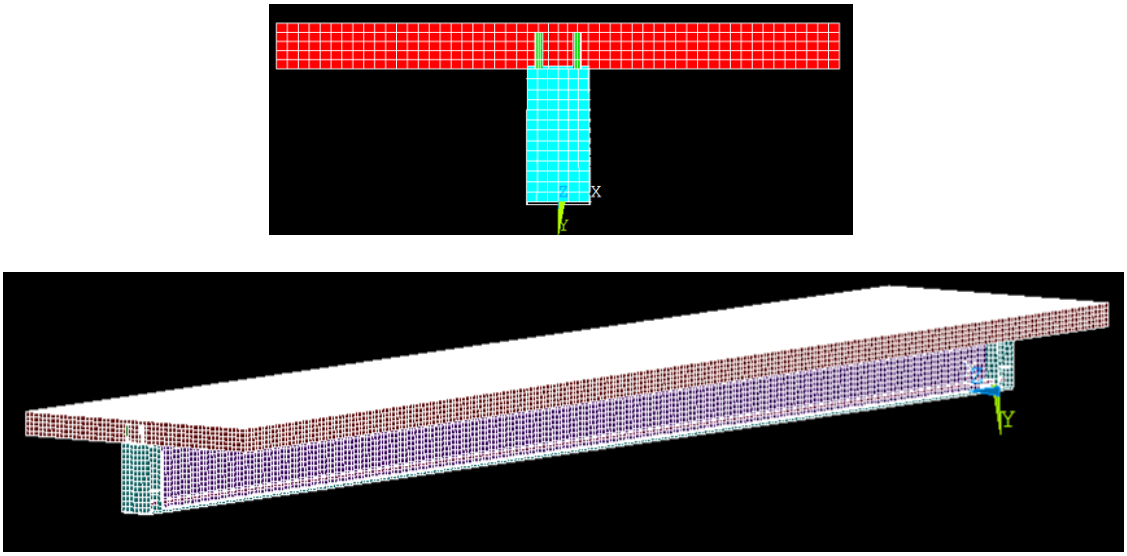


Figura 6 – Discretização da malha de elementos finitos

3.5 Vínculos e aplicação de carga

Para os vínculos internos, ou seja, entre os elementos que compõem o modelo, inicialmente foram acoplados os nós de cada grupo de elementos observando os seguintes critérios:

- perfil de aço-conectores: o nó da base de cada conector foi acoplado ao nó correspondente da mesa superior do perfil de aço e em outros quatro nós no seu entorno; acoplamento este para todos os graus de liberdade. Essa estratégia evita concentrações de tensões pontuais e permite a evolução da solução numérica tornando o modelo numérico mais representativo da ligação real entre conector e perfil de aço.
- laje–conectores: foram compatibilizados os três graus de liberdade correspondentes às translações do nó na cabeça do conector e do nó coincidente da laje de concreto. Na base do conector o acoplamento dos graus de liberdade foi feito para os nós coincidentes a 1/5 da altura do conector, medido em relação à sua base. Nesta altura as malhas do conector e da laje são coincidentes. A rigor, esse acoplamento deveria ser na base do conector, mas nesta região já há o acoplamento entre o conector e a mesa do perfil de aço, razão pela qual o acoplamento foi levemente deslocado para cima.
- Perfil-Laje: foram deixados livres os nós coincidentes, sendo o vínculo laje-viga obtido pela vinculação laje-conectores. Para evitar problemas de contato foi criada uma folga de 1mm entre laje e perfil de aço. Com essa estratégia a interação entre laje e perfil é representada pela rigidez dos conectores de cisalhamento. Assim, o atrito e/ou contato entre laje e perfil são desconsiderados.
- Cabo de protensão-perfil: Para simular os pontos de ancoragem optou-se por criar acoplamentos restringindo todos os graus de liberdade dos elementos de barra e de casca das extremidades, transmitindo assim os esforços solicitantes devido à atuação do cabo nas extremidades do perfil de aço. Para representar os desviadores foram impedidos os deslocamentos vertical e transversal nos nós coincidentes dos elementos do perfil e do cabo nas respectivas posições dos desviadores, deixando livre a translação ao longo do comprimento da viga. Na Figura 7 apresentam-se alguns detalhes das vinculações internas e externas aqui descritas.

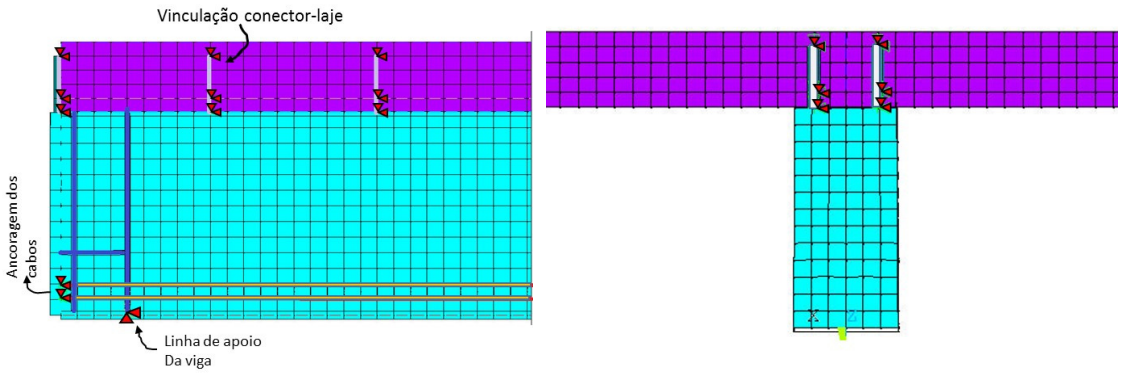


Figura 7 – Detalhes de alguns vínculos internos e externos

Externamente, a vinculação utilizada no modelo numérico procurou representar as condições do ensaio experimental, portanto os vínculos externos foram localizados somente na mesa inferior da seção de aço.

O carregamento foi aplicado em duas etapas: primeiro, por meio de deformações no cabo e, depois, do deslocamento na estrutura. Na primeira etapa, o cabo foi protendido e posteriormente foi aplicado o carregamento externo na viga, na forma de deslocamento, nos pontos correspondentes ao modelo experimental (Figura 3).

4 Resultados numéricos x experimentais

4.1 Observações do ensaio experimental

Durante a realização do ensaio experimental foi aplicada inicialmente uma força de protensão de 112,6 kN em cada cabo e este procedimento foi realizado após a cura do concreto, ou seja, na seção mista. Decorrente da aplicação desta força de protensão foi observado um deslocamento de 5,7 mm no meio do vão. O início do escoamento na mesa inferior do perfil de aço foi observado para um momento fletor de 248,6 kN.m e força de protensão de 148,7 kN em cada cabo. As primeiras fissuras na laje foram observadas para momento no meio do vão de 367,1 kN.m e o momento máximo desenvolvido no modelo experimental foi de 373,2 kN.m com flecha de 82,1mm e 218,5 kN de força axial em cada cabo de protensão.

4.2 Capacidade resistente, deslocamentos e configuração deformada

A capacidade resistente ao momento fletor obtida experimentalmente foi de 373,2 kN.m com deslocamento vertical correspondente, no meio do vão, de 82,1 mm. Na modelagem numérica o momento último foi de 415,0 kN.m que representa uma diferença de 11% em relação ao experimental. Uma síntese dos principais resultados é apresentada na Tabela 2.

O gráfico da Figura 8 permite comparar os comportamentos Momento x Deslocamento no meio do vão obtidos experimentalmente e via modelagem numérica. No caso da modelagem numérica, também foi analisada uma viga sem protensão, ainda que este modelo não tenha correlato experimental.

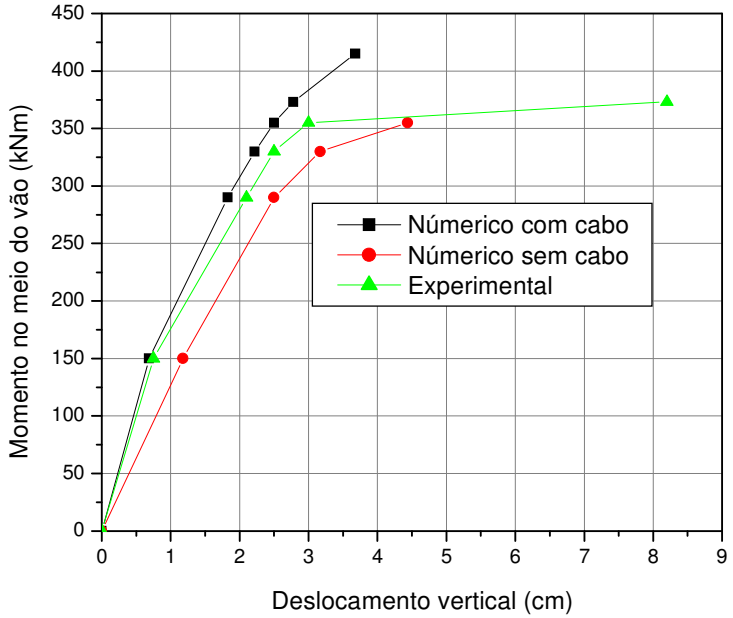


Figura 8 – Comportamento Momento aplicado x Deslocamento no meio do vão

Da comparação entre resultados numéricos e experimentais (Figura 8) verifica-se que, de modo geral, há uma boa correlação de resultados e o modelo numérico consegue reproduzir o comportamento experimental com bastante representatividade, sobretudo na fase inicial de carregamento. Até momentos fletores de aproximadamente 350 kN.cm os dois modelos (numérico e experimental) seguem juntos, sendo que o modelo experimental apresenta deslocamentos levemente superiores. A partir deste ponto, o modelo experimental apresenta redução acentuada de rigidez, aumentos consideráveis de deslocamento para pequenos incrementos no valor do momento fletor. Por outro lado, o modelo

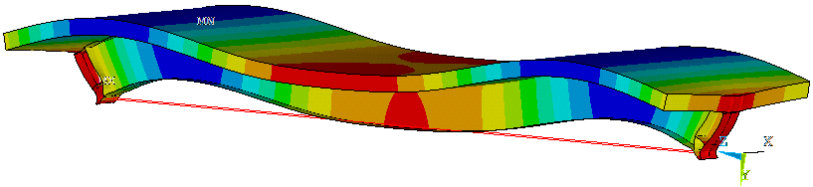
numérico segue com aumentos nos valores de momento fletor e correspondentes aumentos nos deslocamentos. Mas, neste caso, foi observada convergência até deslocamento igual a 36 mm de deslocamento, ao passo que o modelo experimental segue se deformando.

A avaliação da influência da protensão e as mudanças decorrentes desta foi possível apenas com os modelos numéricos. Neste caso, não são observadas mudanças significativas no comportamento *Momento vs. Deslocamento vertical* (Figura 8) pois as duas curvas numéricas seguem paralelas até aproximadamente 300 kN.m. Em relação às flechas, a protensão reduz os valores de flecha tornando o modelo com protensão menos deformável se comparado ao modelo sem a protensão dos cabos. Quanto à capacidade resistente (Tabela 2), também é observado o efeito benéfico da protensão, que aumenta a capacidade resistente da viga mista.

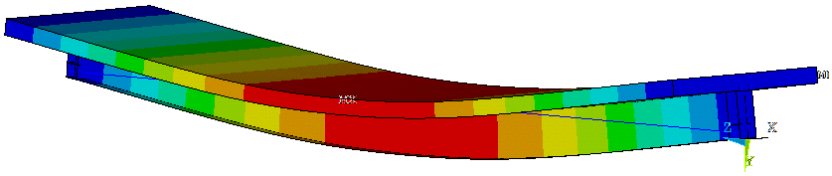
Tabela 2 – Síntese dos resultados numéricos e experimentais

Experimental		**Numérico sem protensão**		**Numérico com protensão**	
Momento Último (kN.m)	Flecha (mm)	Momento Último (kN.m)	Flecha (mm)	Momento Último (kN.m)	Flecha (mm)
373,2	82,1	355,0	44,0	415,0	36,8

A modelagem numérica também permite analisar a configuração deformada dos modelos e a Figura 9 apresenta uma visão geral desta configuração para duas situações: aplicação da força inicial de protensão (Figura 9a) e configuração final (Figura 9b).



a) Configuração deformada para força inicial de protensão

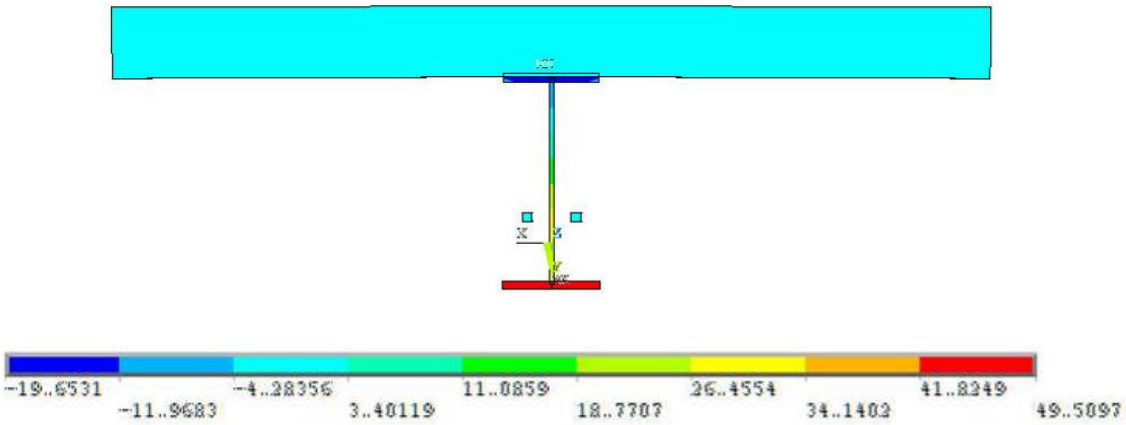


b) Configuração deformada final para 461,3 kN de força aplicada à viga

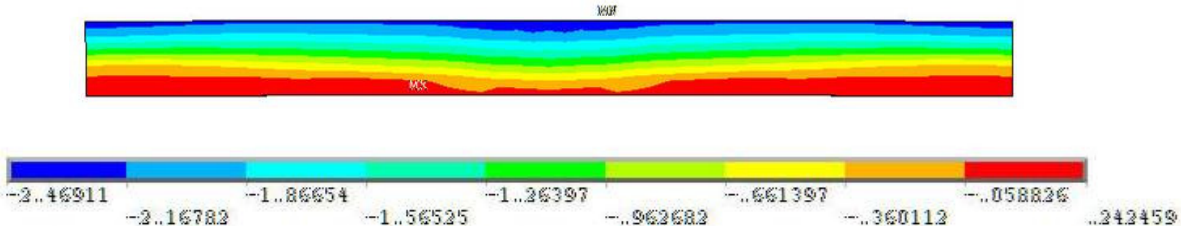
Figura 9 – Configuração deformada da viga mista com cabos protendidos

4.3 Distribuição de tensões e deformações

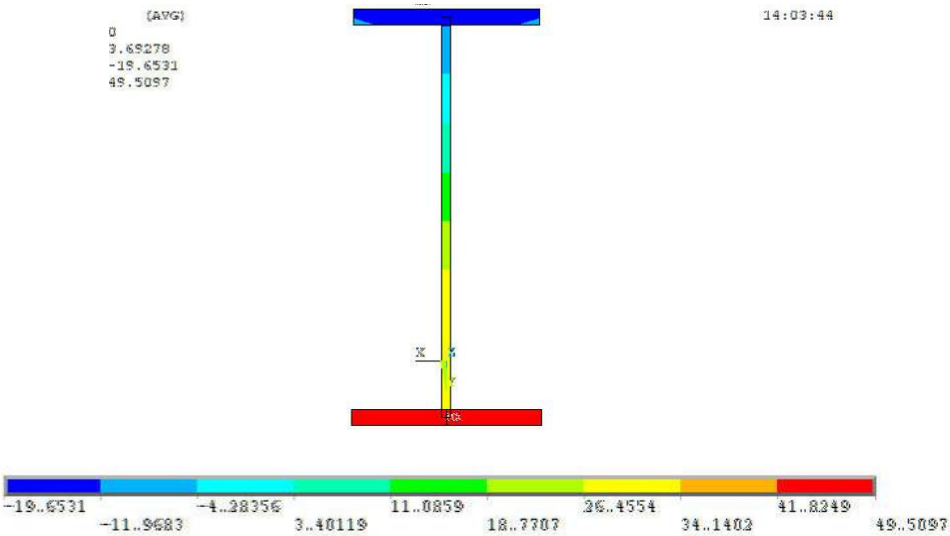
A distribuição de tensões no meio do vão para o estágio final de carregamento (Figura 10) mostra tensões elevadas na mesa inferior do perfil (Figura 10c) e na laje de concreto (Figura 10b).



a) Tensões normais na seção mista (kN/cm^2)



b) Tensões normais na laje de concreto (kN/cm^2)

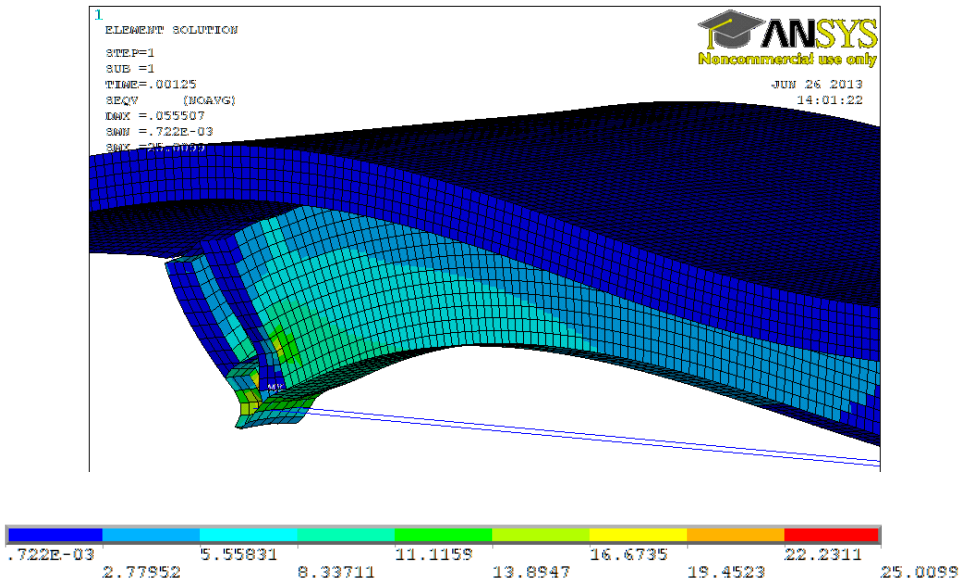


c) Tensões normais no perfil de aço (kN/cm^2)

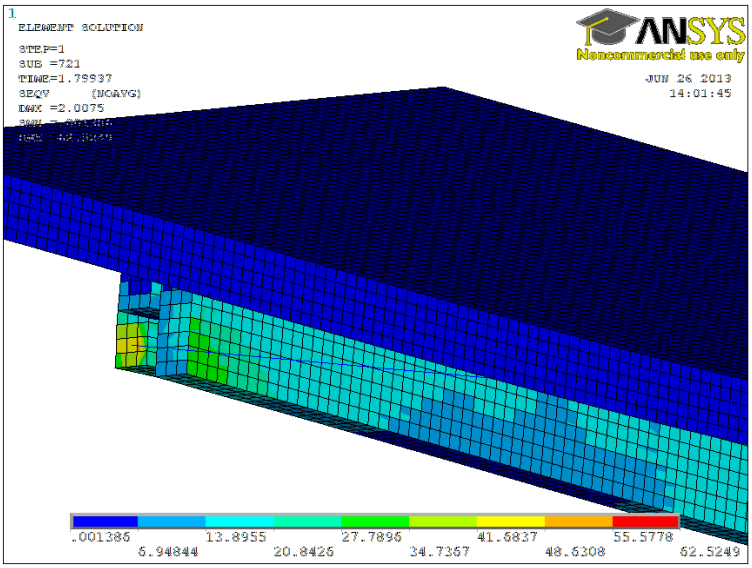
Figura 10 – Panorama de tensões normais na seção central da seção mista

Pela distribuição de tensões na seção transversal e os detalhes destas tensões na laje e no perfil é possível identificar a posição da linha neutra plástica; esta encontra-se na alma, na porção superior.

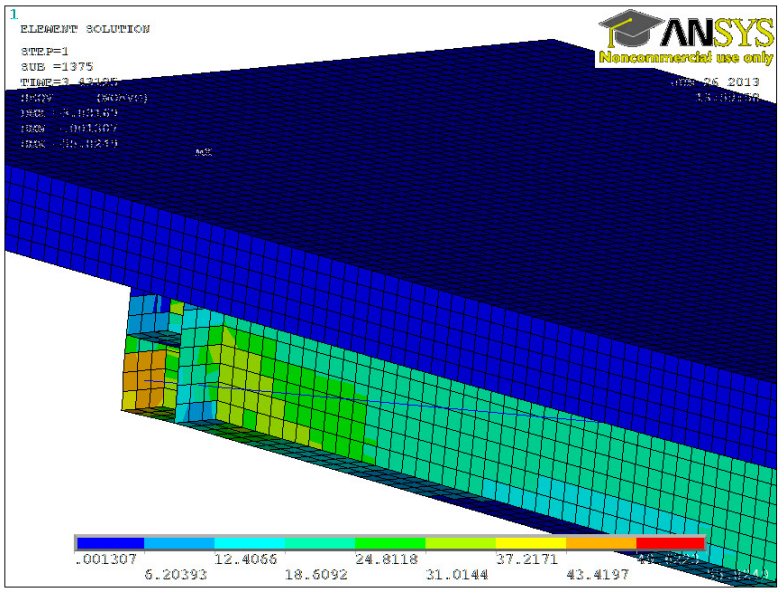
A modelagem numérica também pode subsidiar aspectos voltados ao projeto de vigas mistas protendidas. Neste sentido, um dos aspectos importantes na fase de projeto é a verificação dos elementos na região das ancoragens. A Figura 11 apresenta a distribuição de tensões nas placas de ancoragem, localizadas nas extremidades da viga mista, para alguns estágios de carregamento.



a) Protensão inicial



b) Força aplicada na viga igual a 336 kN



c) Força máxima aplicada (461,3 kN)

Figura 11 – Tensões de Von Mises nas placas de ancoragem (kN/cm^2)

Percebem-se concentrações de tensões importantes no início do processo de protensão, ou seja, na aplicação da protensão inicial nos cabos. No entanto, no decorrer do carregamento, mesmo com o incremento da força de protensão, as tensões tornam-se menos concentradas na região das ancoragens.

4.4 Força nos cabos de protensão

O gráfico da Figura 12 apresenta a variação da força de protensão no cabo em função do momento fletor no meio do vão da viga. Obviamente, a força de protensão sofre incrementos com a aplicação de carregamento na estrutura. Como pode ser visto na Figura 12, o modelo numérico representa, de forma satisfatória esse comportamento.

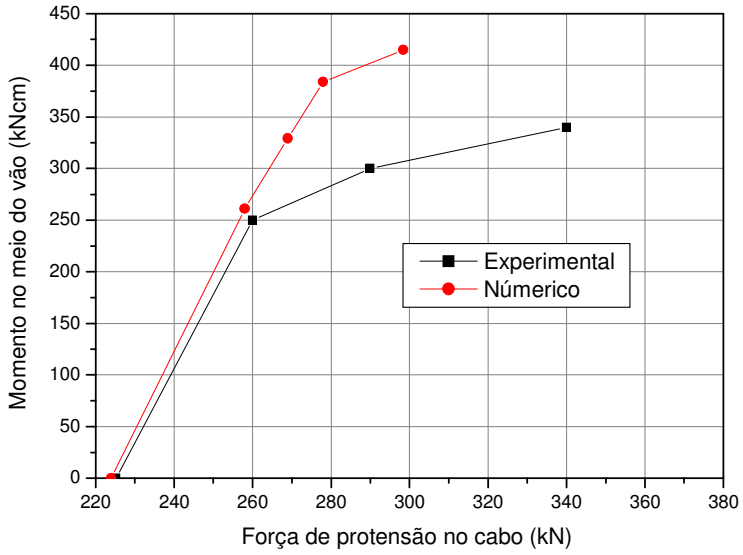


Figura 12 – Comportamento Momento fletor x Força de protensão

5 Conclusões

Pelos resultados expostos aqui é possível afirmar que a metodologia para modelagem numérica desenvolvida é satisfatória para representar o comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto com protensão externa, ensaiadas experimentalmente, cumprindo, portanto, o objetivo inicialmente proposto. Obviamente, o modelo numérico desenvolvido deverá evoluir com o desenvolvimento de pesquisas futuras mas já permite análises bastante interessantes. Um dos pontos que merecerão atenção em estudos futuros será a melhoria da representação da interface entre aço e concreto e entre o cabo de protensão e o perfil de aço. Imagina-se que a diferença entre resultados teóricos e experimentais, sobretudo no que se refere à ductilidade e rigidez, tenha sido influenciada pelo comportamento da interface aço-concreto. A despeito deste fato, a metodologia para modelagem numérica se mostrou bastante satisfatória, além disso,

com o arquivo de entrada de dados parametrizado é possível gerar modelos numéricos com geometrias diversas facilitando a continuidade das pesquisas.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

7 Referências bibliográficas

ANSYS. Ansys reference manual, version 14.0, 2013.

BELENYA, E. **Prestressed load-bearing metal structures.** 1a ed. Moscow: MIR Publishers, English translation, 1977. 463 p.

BELLETTI, B.; GASPERI, A. Behavior of prestressed steel beams. **Journal of Structural Engineering, [S.I.],** 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.I.]**, 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.I.]**, 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.I.]**, v. 48, p. 233-242, Nov. 2010.

CHEN, S.; GU, P. Load carrying capacity of composite beams prestressed with external tendons under positive moment. Journal of Constructional Steel Research, [S.I.], v. 61, p. 515-530, Apr. 2005.

DABAON, M. A.; SAKR, M. A; KHAROUB, O. Long-term behavior of externally prestressed composite beams with partial shear connection. In: ELEVENTH INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON STRUCTURAL AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 11th, 2005, Cairo. Proceedings... Cairo: Ain Shams University, Faculty of Engineering, Department of Structural Engineering, 2005. p. 1-10.

DALL'ASTA, A.; DEZI, L.; LEONI, G. Flexible connection influence on the ultimate capacity of externally prestressed composite beams. Advances in steel structures - ICASS'99. Proceedings… THE SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN STEEL STRUCTURES 15-17 December 1999, Hong Kong, China. Edited by S.L. Chan and J.G. Teng. Elsevier. p.939-946. Dec. 1999.

DALL'ASTA, A.; ZONA, A. Finite element model for externally prestressed composite beams with deformable connection. **Journal of Structural Engineering**, [S.I.], v. 131, n. 5, p. 706-714, May 2005.

FERREIRA, A. C. **Vigas metálicas protendidas: análise estática, modal e de ruptura do cabo de protensão e aplicativo computacional para projetos.** 2007. 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**. 1992. 309 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

KLAIBER, F.W.; DUNKER, K.F. ; SANDERS, W.W. Strengthening of single span steel beam bridge. ***Journal Structural Division.*** V.108, n.12 , p2766-2780, 1982.

KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas de aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase no estudo da interface laje-viga.** 2006. 116 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

LORENC , W.; KUBICA, E. Behavior of composite beams prestressed with external tendons: experimental study. ***Journal of Constructional Steel Research***, [S.I.], v.62, n.12, p. 1353-1366, Dec. 2006.

MAHMOUD, N. S.; BADR, A.; SALEM, F. A.; GHANNAM, M. Strengthening of multi-story and double bay steel frames using post tensioned cables. In: THIRTEENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 13th ICSGE, 2009, Cairo. Proceedings... Cairo, Egypt: Ain Shams University, 2009. p. 666-675.

NELSEN, A. C. H. **Comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto com protensão externa**. 195f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2012.

NELSEN, A. C. H. ; SOUZA, A. S. C. . Vigas mistas de aço e concreto com protensão externa: conceitos e aplicações. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 2012, São Paulo. Congresso Latinoamericano da Construção Metálica. São Paulo: Congresso Latinoamericano da Construção Metálica, 2012. v. 1. p. 1-10.

NELSEN, A. C. H. ; SOUZA, A. S. C. . Dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto protendidas. **Construção Metálica,** v. 119, p. 38-43-43, 2013.

NIE, J.; TAO, M.; CAI, C. S.; LI, S. Deformation analysis of prestressed continuous steel-concrete composite beams. **Journal of Structural Engineering,** [S.I.], v. 135, n. 11, p. 1377-1389, Nov. 2009.

NIE, J.; TAO, M.; CAI, C. S.; LI, S. Analytical and Numerical Modeling of Prestressed Continuous Steel- Concrete Composite Beams. **Journal of Structural Engineering,** [S.I.], v. 137, n. 12, p. 1405-1418, Dec. 2011.

NOURAEYAN, A. **Analytical and experimental study on the behaviour of prestressed and poststressed composite girders.** 1987. 70 p. Thesis (Degree of Master of Engineering) - Concordia University, Montréal, Québec, Canada, 1987.

NUNZIATA, V. **Prestressed steel structures. Structture in acciaio precompresso**. In. CONGRESSO C.T.A., XVII, 1999. Napoli. Proceedings... Napoli: [s.n.], 1999. p. 6.

NUNZIATA, V. **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.

RONGHE, G. N.; GUPTA, L. M. Parametric Study of tendon profiles in prestressed steel plate girder. Advances in Structural Engineering, [S.I.], v. 5, n. 2, p 75-85, Apr. 2002.

SAADATMANESH, H.; ALBRECHT, P.; AYYUB, B. M. Guidelines for flexural design of prestressed composite beams. **Journal of Structural Engineering**, [S.I.], v. 115, n. 11, p. 2944-2961, Nov. 1989.

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.

TROITSKY, M. S.; ZIELINSKI, Z. A. & NOURAEYAN, A. Pre-tensioned and posttensioned composite girders. **Journal of Structural Engineering, [S.I.]**, v. 115, n. 12, p. 3142-3153, Dec. 1989.

SOUZA, A. S. C. ; NELSEN, A. C. H. ; MAIA, W. F. ; De NARDIN, Silvana . Estudo paramétrico do comportamento de vigas mistas de aço e concreto protendidas. Revista da Estrutura de Aço, v. 2, p. 186, 2013.