

ESTUDO NUMÉRICO DE VIGAS MISTAS PROTENDIDAS COMPOSTAS POR PERFIS TUBULARES RETANGULARES DE AÇO PREENCHIDOS COM CONCRETO

Cristiane Caroline Campos Lopes

Paula Vilela Moura Leite

Hermes Carvalho

Ariany Cardoso Pereira

Caroline Martins Calisto

Rodrigo Barreto Caldas

cristianecarolinelopes@yahoo.com.br

paulinhamlvilela@gmail.com

hermes@dees.ufmg.br

eng.arianycardoso@gmail.com

carolinemartinscalisto@yahoo.com.br

caldas@dees.ufmg.br

*Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas
Av. Antônio Carlos, 6627, 31.270-901, Belo Horizonte, Brasil*

Resumo: Este artigo apresenta um modelo numérico capaz de representar o comportamento de vigas mistas com protensão externa passiva durante seu processo de fabricação e quando estão submetidas a solicitações de serviço. Essas vigas mistas são constituídas por perfis tubulares retangulares de aço preenchidos com concreto auto adensável. Esse método de aplicação da protensão consiste em duas etapas. Na primeira, o perfil de aço de seção tubular retangular é submetido a duas forças verticais concentradas, localizadas nos quartos do vão; o perfil tubular retangular é, então, preenchido com concreto e, à medida que este adquire resistência, as forças usadas para deformar o perfil metálico são retiradas – segunda etapa. Ao tentar retornar à sua forma inicial, o perfil de aço introduz forças de compressão no núcleo de concreto por meio das superfícies internas tracionadas do tubo que estão em contato com o núcleo – protensão “passiva” no concreto. O modelo numérico proposto foi desenvolvido no programa ABAQUS® com elementos sólidos tridimensionais *C3D8R*. Uma vez que a modelagem numérica do processo de fabricação dessas vigas é bastante complexa nessa fase da simulação foram utilizadas algumas ferramentas avançadas do programa, como “*predefined field*” e “*orphan mesh*”. Finalmente, o modelo numérico de viga mista com protensão externa passiva é submetido a um carregamento distribuído, e os deslocamentos verticais obtidos são comparados com resultados para vigas de aço e mistas de mesma seção transversal sem protensão.

Palavras-chave: Preflex, perfil tubular retangular preenchido com concreto, vigas mistas de aço e concreto, protensão externa passiva.

Abstract. This paper presents a numerical methodology capable of represents the behavior of composite beams with passive external prestress during fabrication and when subjected to service loads. These composite beams consist of concrete-filled steel-tubes (CFST) and the concrete used is self-consolidating. The passive external prestressing method was developed in the beginning of the decade of 1950 by Abraham Lipski and Louis Baes applied to I-shaped steel beams and the name patented was “Preflex”. This method to apply prestress, approached numerically in this paper, has basically two steps: at first, the rectangular steel tube is subjected to two concentrated vertical loads, applied in the beam quarters, so the bottom flange of this profile got tensioned, remained with elastic behavior; and second,

the steel tube is filled with concrete and when the concrete has hardened enough, the vertical loads are removed. When the steel beam tries to come back to his initial position compression stress are introduced in the concrete by the internal tensioned surface of the steel tube that is in contact with the concrete, defined as passive external prestress. The numerical model suggested in this paper was developed in the software ABAQUS® with three-dimensional solid elements C3D8R. Since the numerical modeling of the manufacturing process of these beams is quite complex (in addition to different loading steps, the geometric properties of the beam and the mechanical properties of the concrete core are changing during these stages), in this phase of the simulation some advanced program tools, such as predefined field and orphan mesh are used. The normal stress of the most solicited fibers is compared with analytical results. Finally, the numerical model of the CFST prestressed by the passive external prestress is subjected to live loads and the deflection of the beam is compared with results presented in the literature for composite beams with the same section without prestress.

Keywords: Preflex beams, Concrete-filled steel rectangular tube, steel-concrete composite beam, external passive prestressing

1 Introdução

De acordo com Flor [1], a associação de aço e concreto passou por diferentes concepções ao longo dos anos. Antecedendo os elementos mistos propriamente ditos, para que sua resistência ao fogo aumentasse, os perfis de aço foram completamente envolvidos em concreto não estrutural. Com o passar do tempo, concretos com melhores propriedades começaram a ser utilizados e foi possível considerar sua contribuição para a resistência da estrutura, surgindo assim os conhecidos elementos mistos. A ação conjunta dos dois materiais só era garantida através de aderência e atrito e, atualmente, costuma-se utilizar conectores de cisalhamento para transferir o cisalhamento longitudinal na interface entre os materiais e resistir às forças transversais ao eixo da viga.

Segundo Gunawardena *et. al* [2], o uso de elementos mistos constituídos de tubos de aço preenchidos com concreto tem crescido consideravelmente devido às inúmeras vantagens apresentadas por esses elementos quando comparados a estruturas convencionais de aço e concreto. Pode-se destacar, dentre essas vantagens, o ganho de resistência devido ao confinamento do concreto, o retardo da flambagem local do tubo de aço, a melhora na ductibilidade, além de valores mais elevados de amortecimento estrutural. Inicialmente, tubos de aço preenchidos com concreto, principalmente os circulares, foram utilizados como estruturas submetidas à compressão em pilares de prédios, torres de transmissão e pilares de pontes. O uso desses elementos submetidos primariamente a flexão não é frequente.

Para que fosse possível o aprimoramento do comportamento dos elementos mistos, em especial as vigas mistas, muitos estudos e processos foram desenvolvidos, dentre eles o processo de protensão. A protensão surge para contornar a baixa resistência do concreto quando submetido a tensões de tração. A forma mais comum de protensão de vigas mistas é a protensão por meio de cabos, podendo estes serem posicionados fora ou dentro da seção transversal da viga. Neste trabalho, aborda-se uma outra forma de protensão: a protensão externa passiva, baseada em um método desenvolvido pelo engenheiro belga A. Lipski e pelo professor Louis Baes, mais conhecida como “*Preflex*”.

2 O Método “*Preflex*”

A tecnologia “*Preflex*” surgiu na Bélgica por volta de 1950, sendo também adotada por outros países como Japão, Alemanha, Grã Bretanha e Coreia do Sul (Morano e Mannini [3]). Essa tecnologia tem sido usada eficientemente na Bélgica nos últimos 50 anos para pontes ferroviárias, oferecendo uma alternativa para estruturas que demandam vigas de baixa seção transversal para grandes vãos, ou com fortes restrições quanto aos deslocamentos (estado limite de serviço). Apesar da aplicação ser mais comum em pontes, as vigas “*Preflex*” também são empregadas em estruturas de edifícios, sendo a “*Southern Tower*” e a “*Berlaymont Building*”, ambas localizadas na Bélgica, as mais conhecidas (Staquet *et al.*[4]).

O método “*Preflex*” foi idealizado para perfis de seção I e consiste na aplicação de duas forças concentradas verticais nos quartos do vão da viga de aço, submetendo a mesa inferior desse perfil a tensões de tração, ainda no regime elástico. Posteriormente, a mesa inferior é concretada e, com a cura do concreto, as forças concentradas são retiradas. O perfil de aço, ao tentar retornar à sua posição original, introduz tensões de compressão na seção de concreto que envolve a mesa inferior, gerando, assim, a protensão externa passiva. Finalmente, a alma do perfil e a laje são concretadas. Um esquema com a sequência de construção das vigas “*Preflex*” é apresentado na Fig. 1.

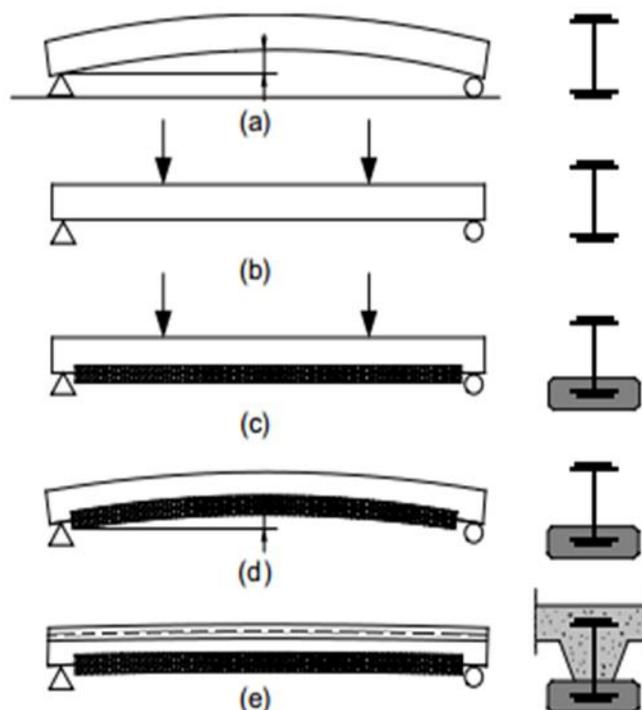


Figura 1. Sequência de fabricação vigas “Preflex”: (a) viga na posição inicial; (b) aplicação das forças verticais; (c) concretagem da mesa inferior; (d) retirada das forças verticais; (e) concretagem da alma do perfil e da laje (Staquet *et al.* [6]).

São inúmeras as vantagens apresentadas pelas vigas “Preflex” quando comparadas a outros sistemas construtivos, a saber: vigas com maior relação vão/altura; ganho de rigidez da estrutura, como destacado por Ahmadullah *et al.* [5]; excelente resistência a fadiga e ao fogo, como ressaltado por Staquet *et al.* [6]; versatilidade no dimensionamento das seções transversais da viga, comparado com outros sistemas protendidos que usam seções transversais normalizadas, menor tempo de aplicação da carga de protensão, em comparação com outros sistemas protendidos e menor pré-compressão necessária em relação às outras vigas protendidas (Valdes *et al.* [7]).

Os primeiros estudos envolvendo vigas “Preflex” foram desenvolvidos por Baes e Lipski [8], que compararam-nas com vigas de mesma seção transversal simplesmente revestidas por concreto. Evans e White [9], Zhang *et al.* [10] e Staquet *et al.* [6] realizaram experimentos envolvendo essas vigas, e avaliaram fatores como: a necessidade de se empregar conectores de cisalhamento na mesa inferior do perfil de aço; a influência dos efeitos de retração e fluência do concreto; o comportamento dessas vigas sob carregamento estático e dinâmico. Previsões analíticas do comportamento dessas vigas podem ser encontradas nos trabalhos de Baes e Lipski [11], que apresentam um exemplo de pré-dimensionamento para os casos mais comuns de aplicação dessas vigas, e de Morani e Mannini [3], que desenvolveram uma formulação relativamente simples para levar em consideração os efeitos de fluência e retração do concreto empregado em vigas com protensão externa passiva.

3 Metodologia numérica

O modelo numérico desse trabalho foi desenvolvido no programa comercial de elementos finitos ABAQUS®. Tanto para o perfil tubular retangular de aço quanto para o núcleo de concreto foram adotados elementos sólidos tridimensionais hexaédricos de oito nós, com integração reduzida (elemento C3D8R da biblioteca do programa). Na modelagem, foram empregados os valores reais das dimensões da seção transversal de um perfil tubular VMB 250x150x6.4, fabricado em aço VMB 300: altura total, H , igual a 249.04 mm; largura total, B , igual a 148.30 mm; espessura, t , igual a 6.53 mm (Fig. 2); e

comprimento total, L , igual a 6000 mm.

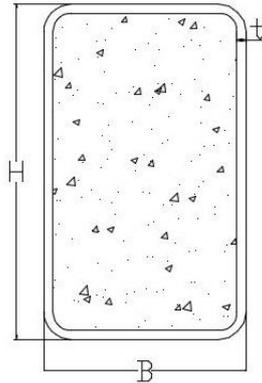


Figura 2. Seção transversal da viga mista.

Para representar o comportamento do aço, foi adotado o modelo trilinear da Fig. 3 na relação tensão *versus* deformação do material. Nesse caso, admite-se que o aço mantém comportamento elástico linear para deformações entre zero e a deformação correspondente ao início do escoamento, ε_y . Para o trecho que representa o escoamento do material, entre a deformação correspondente ao início do escoamento, ε_y , e a deformação que corresponde ao início do encruamento, ε_p (com valor aproximado de $10 \varepsilon_y$), considera-se uma inclinação de 1% para evitar possíveis problemas de convergência. Finalmente, na fase correspondente ao encruamento do material, a tensão cresce linearmente até a tensão de ruptura, f_u , com deformação correspondente igual a $100 \varepsilon_y$.

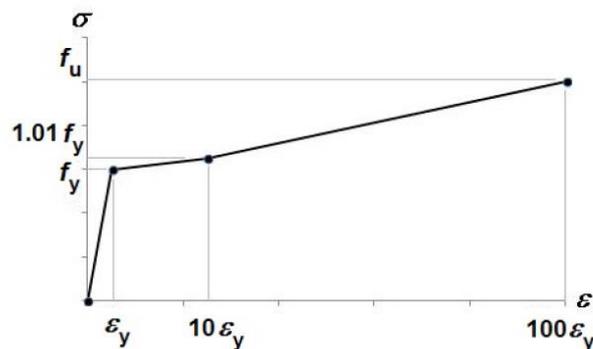


Figura 3. Modelo constitutivo trilinear adotado para o aço (Flor [1]).

Para as propriedades mecânicas do aço, adotou-se resistência ao escoamento, f_y , igual a 373 MPa, resistência a ruptura, f_u , igual a 510 MPa, módulo de elasticidade, E_a , igual a 192500 MPa e coeficiente de Poisson, ν_a , igual a 0.3.

Para representar o comportamento do concreto, foi adotado o modelo de dano “*concrete damaged plasticity*” da biblioteca do ABAQUS®. Tal modelo considera a degradação da rigidez elástica do material quando sujeito a deformações plásticas. Os principais parâmetros desse modelo constitutivo são o ângulo de dilatância, ψ , a razão entre a resistência à compressão biaxial e uniaxial (σ_{b0}/σ_{c0}), excentricidade, viscosidade e o parâmetro k_c . Para as propriedades mecânicas do concreto, adotou-se resistência à compressão característica, f_{ck} , igual a 70 MPa, módulo de elasticidade, E_c , igual a 41128 MPa, e coeficiente de Poisson, ν_c , igual a 0.2.

A curva tensão-deformação adotada para representar o comportamento à compressão do núcleo de concreto (Fig. 4-a) foi idealizada por Han [12], e considera que o efeito do comportamento plástico depende de um fator de confinamento, ζ . Na modelagem do concreto submetido à tração, foi considerada a relação tensão-deslocamento da Fig. 4-b, que refere-se ao comportamento pós pico do concreto e

considera sua contribuição.

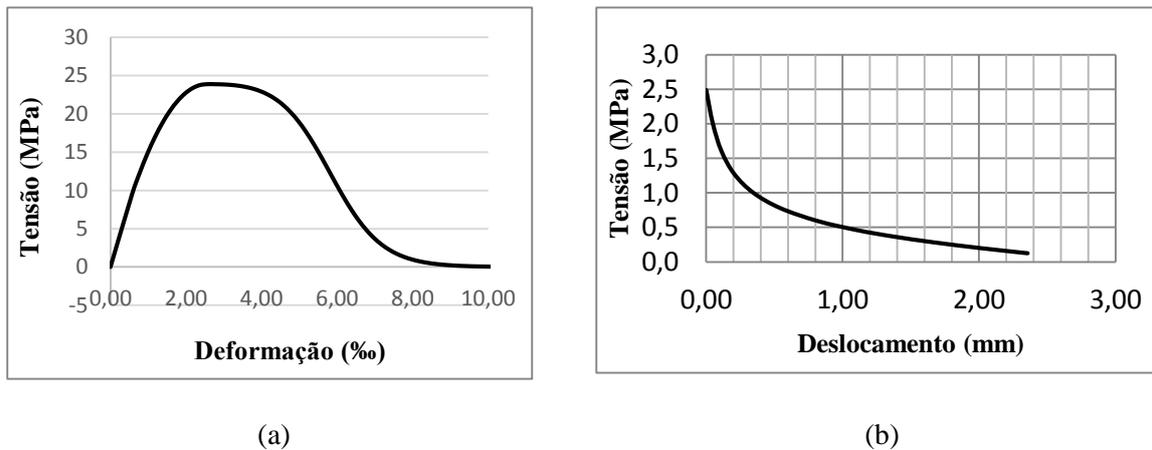


Figura 4. Curva tensão-deformação do concreto: (a) à compressão; (b) à tração.

Utilizando-se da condição de dupla simetria do sistema, apenas um quarto da viga foi modelado. Assim, as restrições nodais de simetria da biblioteca do programa foram aplicadas nos planos xy e yz – Fig.5. Ou seja, no plano xy foram restringidos o deslocamento na direção do eixo longitudinal z (U_3), e as rotações em torno dos eixos x (UR_1) e y (UR_2), enquanto no plano de simetria yz foram restringidos o deslocamento na direção do eixo x (U_1) e as rotações em torno dos eixos y (UR_2) e z (UR_3).

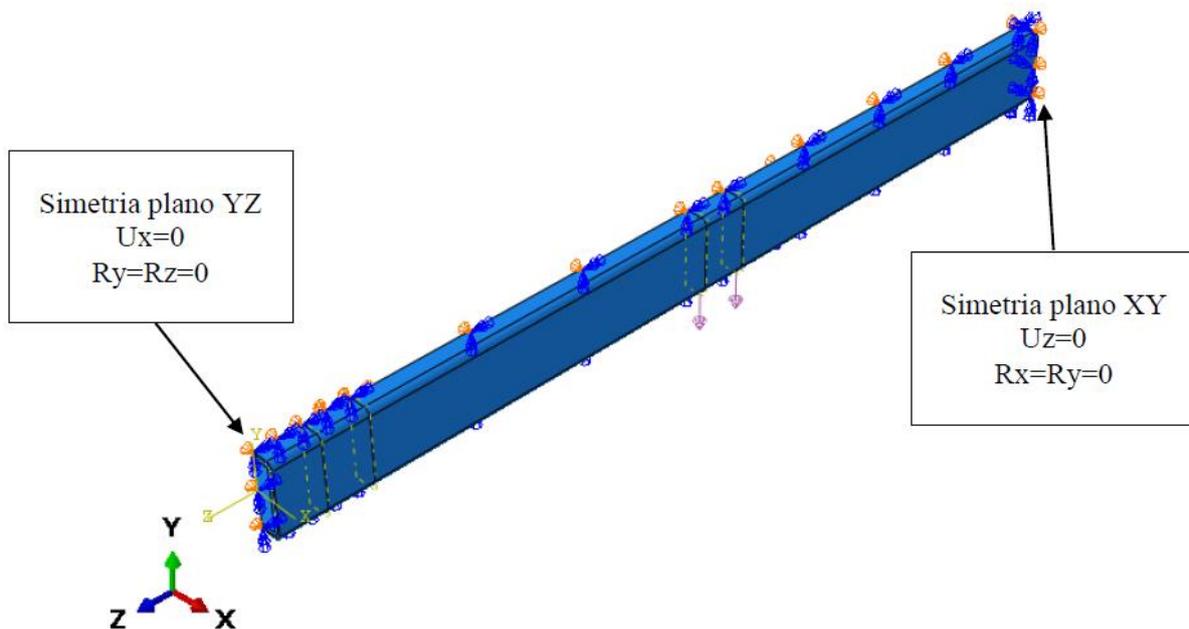


Figura 5. Condições de contorno adotadas no modelo numérico devido à dupla simetria.

Para simular as condições de contorno dos apoios, foi utilizada a opção MPC (“multi-point constraint”) do ABAQUS®: tanto os deslocamentos lineares nas direções x (U_1) e y (U_2) quanto a rotação em torno do eixo z (UR_3) foram restringidas em um ponto de referência criado na mesa inferior do perfil de aço e associado a uma região de 300 mm de comprimento localizada no seu entorno – Fig. 6.

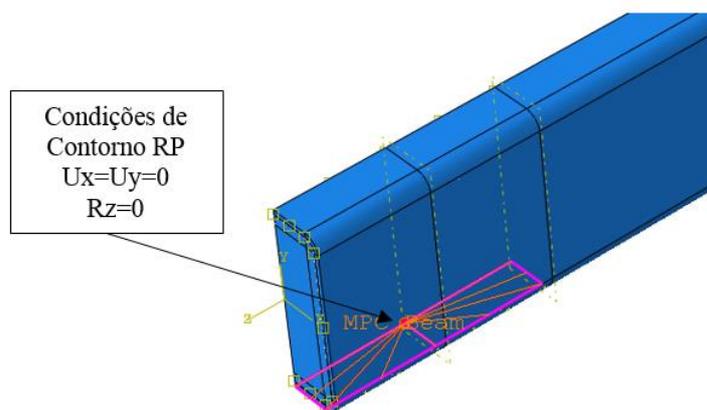


Figura 6. Condições de contorno referentes aos apoios da viga.

A simulação da protensão externa passiva é um dos pontos mais complexos do modelo numérico. Durante esse processo, ocorre a mudança da geometria da viga mista e das propriedades mecânicas do núcleo de concreto. Para simular essas alterações, foram criados dois modelos independentes, sendo o primeiro modelo correspondente à fase 1 do processo de aplicação da protensão externa passiva – perfil tubular retangular de aço submetido a duas forças concentradas (pré-flexão), preenchido por um material extremamente flexível (simulando o concreto no estado fresco). O segundo modelo, correspondente à fase 2 do processo de fabricação, foi criado a partir da importação da configuração deformada final do primeiro modelo, usando a ferramenta do ABAQUS® denominada “*Orphan Mesh*”. Nesse segundo modelo, foram também importadas as tensões geradas pela aplicação das forças concentradas através da ferramenta “*Predefined Field*” do programa. As propriedades mecânicas do concreto com 5 dias de idade foram utilizadas na redefinição do material usado para preenchimento do tubo de aço (idade essa quando da retirada das forças verticais aplicadas na pré-flexão da viga de aço da fase 1). Dessa forma, foi possível a simulação do processo de retirada dessas forças de pré-flexão e consequente geração das tensões de compressão no núcleo de concreto. Finalmente, foi aplicado um carregamento distribuído na viga mista com protensão externa passiva.

O contato entre os materiais foi simulado diferentemente para as diversas etapas que compõem o modelo. No primeiro modelo (criado com o objetivo de simular a aplicação das forças de pré-flexão), o contato entre o perfil de aço e o material de preenchimento flexível foi do tipo *surface-to-surface* com a opção *frictionless*, que permite o deslizamento entre as superfícies. No segundo modelo (onde são importadas as tensões e deformações geradas pela aplicação das forças de pré-flexão), os nós internos do tubo de aço e externos do núcleo de concreto são acoplados um ao outro utilizando a restrição (*constraint*) do tipo *tie*, o que não permite que haja deslizamento entre as partes – isso foi observado experimentalmente por Flor [1].

A descrição das etapas para a construção do modelo numérico final é detalhada a seguir:

- primeira etapa: duas forças verticais $P_{pf} = 58670$ N são aplicadas nos quartos do vão, sendo o valor dessas forças determinado em função do momento elástico do perfil de aço, como mostrado na Fig. 1(b).
- segunda etapa: retirada das forças verticais, como exemplificado na Fig. 1(d).
- terceira etapa: aplicação de um carregamento distribuído igual a 27 N/mm ao longo da viga.

4 Resultados e discussões

Os resultados obtidos em cada uma das três etapas citadas anteriormente (fases 1 e 2, referentes à fabricação da viga mista protendida, e fase 3, correspondente ao carregamento de serviço dessa viga) são apresentados a seguir. Na Fig. 7 e na Fig. 8, tem-se os valores das tensões longitudinais na seção transversal do perfil de aço durante a fase 1, extraídos do modelo numérico e comparados a resultados analíticos. Na Fig. 7 as fibras mais solicitadas do tubo apresentaram tensões com valores iguais a,

aproximadamente, ± 261 MPa, o que corresponde à 70% da resistência ao escoamento do aço, f_y (igual a 373 MPa) – ou seja, as tensões no perfil estão dentro do regime elástico do material. Na Fig. 8, tem-se os valores de tensão longitudinal ao longo da altura da seção transversal do tubo de aço no vão central da viga obtidos numericamente e comparadas a resultados analíticos. Como era de se esperar, a linha neutra elástica coincide com o centro geométrico da seção do tubo; além disso, é possível observar a concordância entre os métodos analítico e numérico.

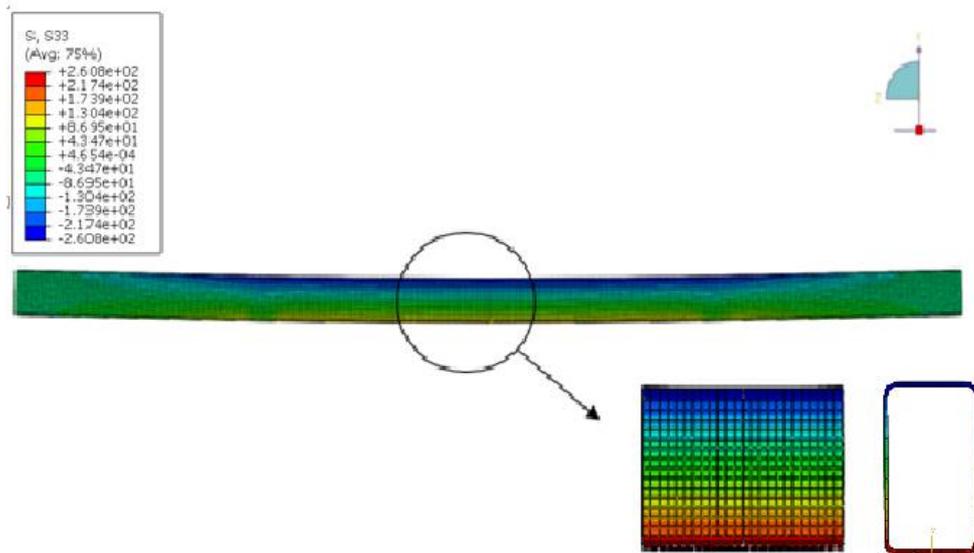


Figura 7. Valores de tensão longitudinal obtidos na seção transversal central do perfil de aço devido à aplicação das forças verticais de pré-flexão.

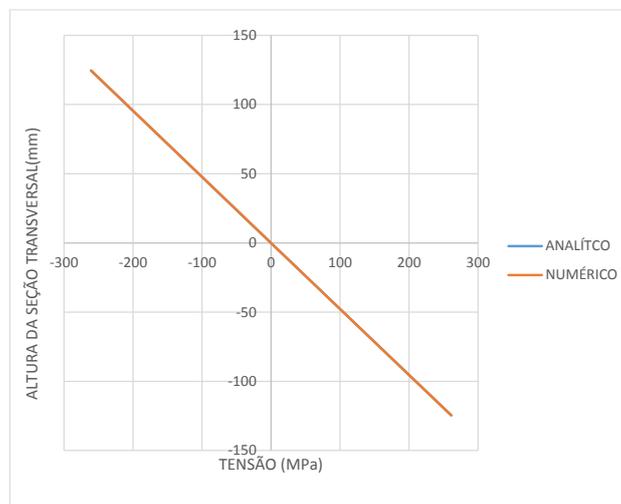


Figura 8. Valores analíticos e numéricos de tensão longitudinal ao longo da altura da seção transversal do tubo de aço no vão central da viga, durante a fase 1.

Na Fig. 9 e na Fig. 10 são apresentados, respectivamente, os valores das tensões longitudinais no perfil de aço e no núcleo de concreto devido à retirada das forças de pré-flexão (extraídos do modelo numérico que corresponde à fase 2) e posteriormente os resultados numéricos das tensões são comparados a resultados analíticos-Fig. 11-a e Fig. 11-b. Como pode ser observado na Fig. 9, a mesa inferior do perfil de aço apresenta tensões remanescentes de tração da ordem de 30% da tensão inicial gerada pela aplicação das forças de pré-flexão. A mesa superior do perfil de aço também apresenta

tensões de compressão remanescentes, porém da ordem de 15% da tensão inicial, antes do descarregamento. No núcleo de concreto-Fig. 10, nota-se que a protensão aplicada na fibra mais solicitada é de 27.46 MPa, cerca de 52% da resistência à compressão do concreto com 5 dias de idade (descarregamento da viga). Na Fig. 11-a e na Fig. 11-b são apresentados, respectivamente, os resultados das tensões longitudinais ao longo da altura da seção transversal do tubo de aço e do núcleo de concreto. As diferenças entre os resultados analíticos e numéricos devem-se, principalmente, às simplificações adotadas no método analítico, como a desconsideração do concreto localizado na região tracionada da viga para o cálculo da linha neutra elástica da seção mista e a consideração da relação tensão-deformação linear do material concreto, mesmo para valores de tensão superiores a 40% da resistência à compressão do concreto, f_{ck} (a força de protensão na fibra inferior de concreto é da ordem de 52% de f_{ck} , como será abordado mais adiante).

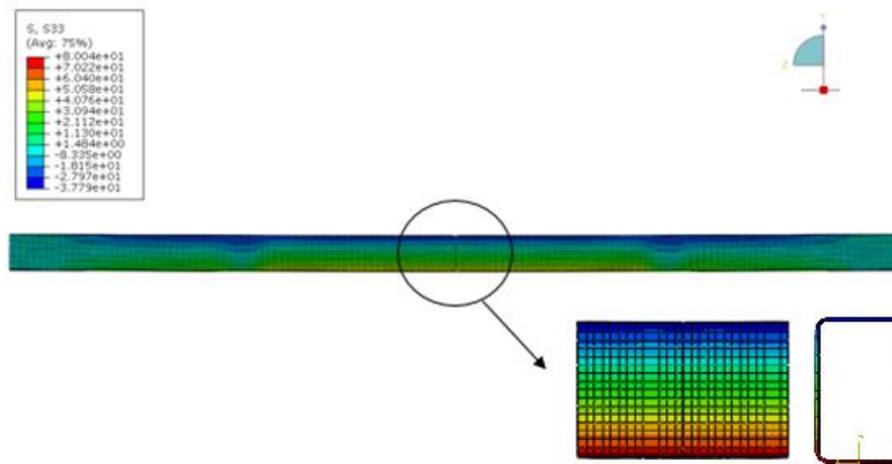


Figura 9. Valores de tensão longitudinal obtidos na seção transversal central do perfil de aço devido à retirada das forças de pré-flexão.

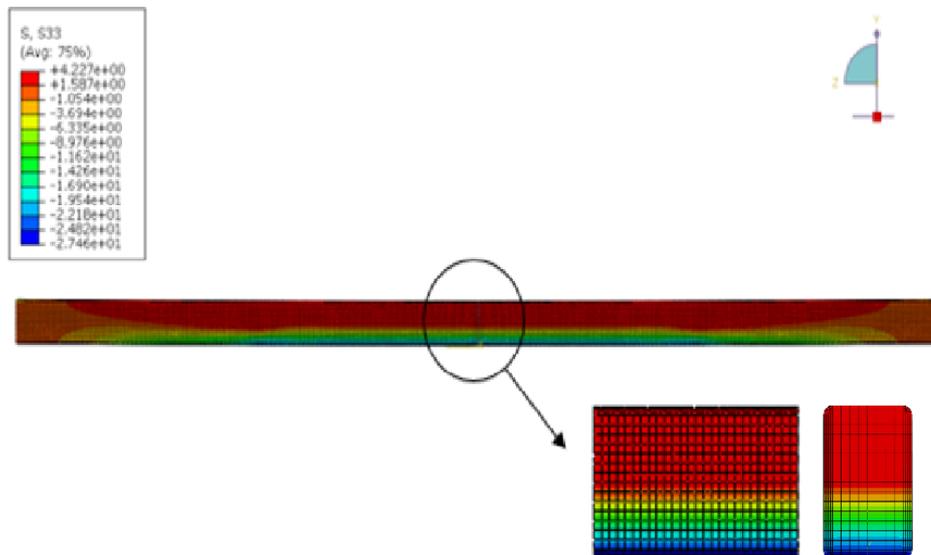
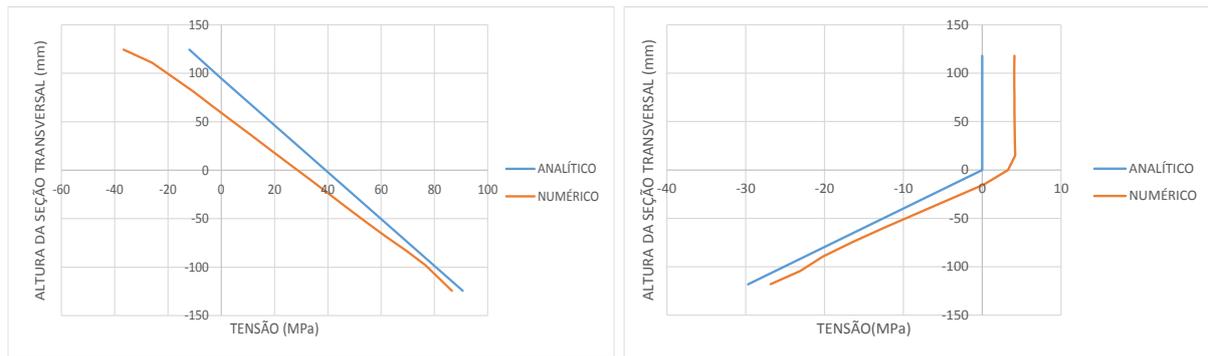


Figura 10. Valores de tensão longitudinal obtidos na seção transversal central do núcleo de concreto devido à retirada das forças de pré-flexão.



(a)

(b)

Figura 11. Valores analíticos e numéricos de tensão longitudinal ao longo da altura da seção transversal do tubo de aço e do núcleo de concreto no vão central da viga mista, durante a fase 2.

Na Fig. 12 e na Fig.13 são apresentados, respectivamente, os valores das tensões no perfil de aço e no núcleo de concreto devido à aplicação de um carregamento distribuído para obtenção da flecha.

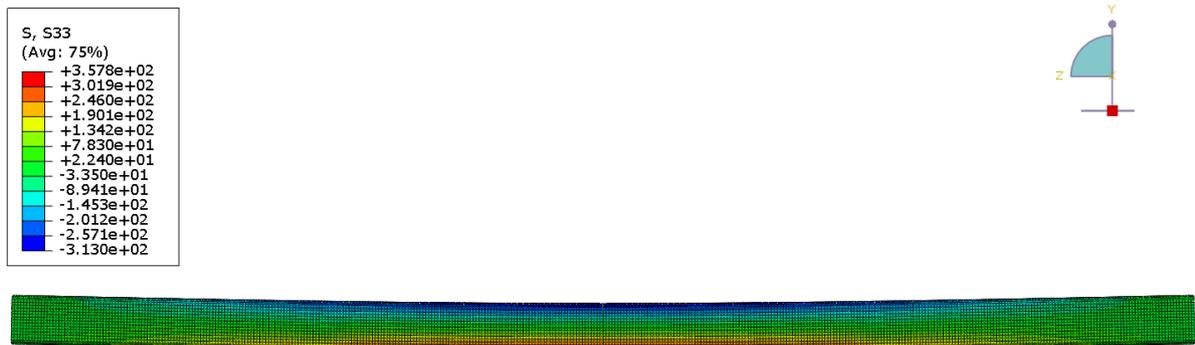


Figura 12. Valores de tensão longitudinal obtidos na seção transversal central do tubo de aço devido ao carregamento distribuído.

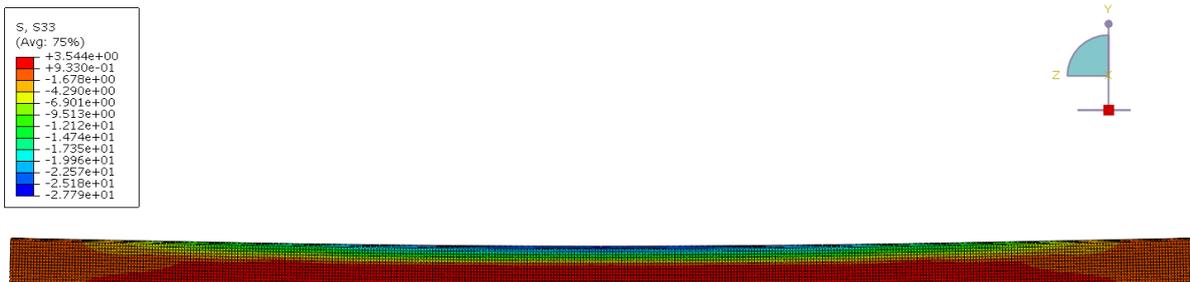


Figura 13. Valores de tensão longitudinal obtidos na seção transversal central do núcleo de concreto devido ao carregamento distribuído

Na Fig. 14 são apresentados os valores dos deslocamentos verticais resultantes da aplicação do mesmo carregamento distribuído em: (a) uma viga constituída por perfil tubular retangular de aço; (b) uma viga constituída por perfil tubular retangular de aço preenchido com concreto; (c) esta mesma viga mista, porém com protensão externa passiva. Observa-se que a viga mista simplesmente preenchida com

concreto apresenta uma flecha 25% menor que a da viga constituída pelo tubo de aço isolado. Já a viga mista com protensão externa passiva apresenta flecha 35% menor que da viga constituída por tubo de aço isolado e 14% menor que a mesma viga mista sem a protensão externa passiva.

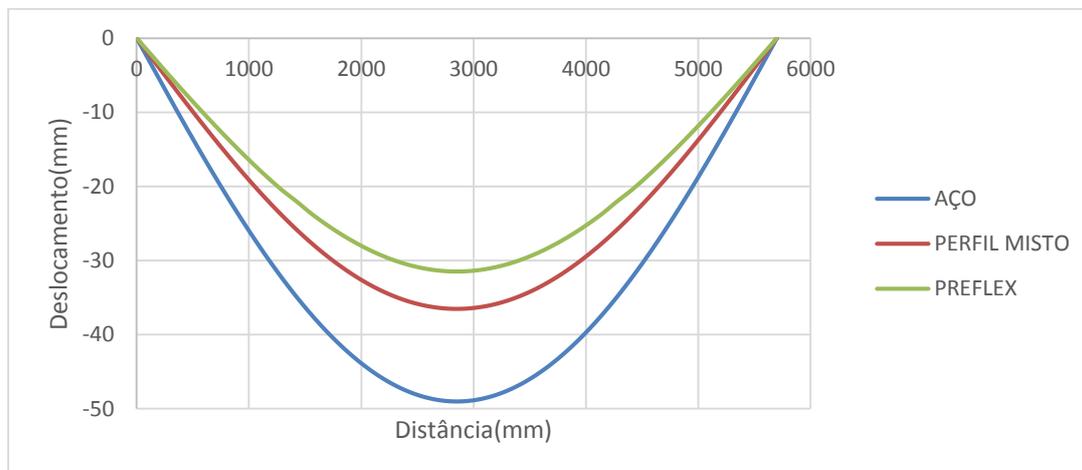


Figura 14. Valores de deslocamento vertical nas vigas devido ao carregamento distribuído.

Os momentos de inércia das vigas mistas são apresentados na Tabela 1. Avaliando a inércia da viga mista sem protensão externa passiva e com essa protensão é possível perceber um aumento de 14% na inércia da viga Preflex, resultado igual ao observado entre as flechas.

Tabela 1. Inércia das vigas mistas

Seção	Inércia (cm ⁴)
Viga mista	31227.95
“Preflex”	36241.07

5 Conclusões

O presente trabalho apresentou a avaliação do comportamento das vigas mistas constituídas por perfis tubulares retangulares preenchidos com concreto com protensão externa passiva durante seu processo de fabricação e em serviço. A construção do modelo foi dividida em três fases: primeiramente duas forças verticais concentradas foram aplicadas no perfil de aço; posteriormente foi simulada a remoção dessas forças pontuais e finalmente a viga foi submetida a um carregamento distribuído.

Como é possível notar através dos resultados obtidos na análise, os resultados numéricos tiveram uma adequada aproximação aos resultados analíticos e o processo de aplicação da protensão foi efetivo, dessa forma para um mesmo vão e mesma seção transversal, a viga com protensão externa passiva resultou em valores menores de flecha, devido ao ganho de rigidez a flexão em virtude da aplicação da protensão. Ainda foi possível destacar o aumento de inércia da seção mista devido à aplicação da protensão.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio da FAPEMIG, que tornou possível a realização deste trabalho (Processo: “Comportamento de vigas mistas com protensão externa passiva constituídas de perfil tubular retangular de aço preenchido com concreto”, APQ-01770-18,) e também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- [1] J.M. Flor. Estudo experimental e numérico de vigas mistas constituídas de perfil de aço tubular retangular e preenchido com concreto autoadensável em escala real, Doctor thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.
- [2] Y.K.R. Gunawardena, F. Aslani, U. Brian, W. Kang and S. Hicks. Review of strength behavior of circular concrete filled steel tubes under monotonic pure bending. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 158, pp. 460-474, 2019.
- [3] S.G. Morano and C. Mannini. Preflex Beams: A Method of Calculation of Creep and Shrinkage Effects. *Journal of Bridge Engineering*, vol. 11, n. 1, pp. 48-58, 2006.
- [4] S. Staquet, G. Rigot, H. Detandt and B. Espion. Innovative Composite Precast Prestressed Precambered U-Shaped Concrete Deck for Belgium's High Speed Railway Trains. *Pci Journal*, vol. 49, n. 6, pp. 94-113, 2004.
- [5] N. Ahmadullah, S. Tetsuhiro and M. Tai. A study on Application of Elastic Theory for Computing Flexural Stresses in Preflex Beam. *International Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 11, n. 10, 2017.
- [6] S. Staquet, G. Kalogiannakis, H. Detandt, D.V. Hemelrijck and B. Espion. Field testing of a 30-year-old composite Preflex railway bridge. *Bridge Engineering*, vol. 160, n. 2, pp. 89-98, 2007.
- [7] U. Valdes, G. Portela, T. Stanton, W. Varela and G. Velázquez. Método de análisis para vigas preflexionadas basado en estándares de Norte América. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, vol. 10, n. 2, pp. 95-105, 2010.
- [8] L. Baes and A. Lipski. La viga "Preflex". *Ultimas noticias sobre hormigón pretensado*, n. 45, 1958.
- [9] R. H. Evans and A. D. White. Characteristics of Preflexed Prestressed-Concrete Beams, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 30, n. 4, pp. 709-729, 1965.
- [10] K. Zhang, S. Li and K. Liu. Experimental Study on Static and Fatigue Behavior of Steel- Concrete Preflex Prestressed Composite Beam. *Advances in Steel Structures*. Elsevier, 1999.
- [11] L. Baes and A. Lipski. La Viga PREFLEX: 1ª parte, *Hormigón y Acero*, n. 85, pp. 23-42, 1967.
- [12] L. H. Han, G. H. Yao and Z. Tao. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion. *Thin-walled structures*, vol. 45, pp. 24-36, 2007.