



MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS TUBULARES DE AÇO PREENCHIDAS COM CONCRETO

Jacqueline M. Flor

Ricardo H. Fakury

Rodrigo B. Caldas

Francisco C. Rodrigues

Ricardo M. F. Neves

Ana C. V. C. Faria

flor@dees.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Antônio Carlos, 6627, 31270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil

Afonso H. M. Araújo

Vallourec Research Center Brasil

Av. Olinto Meireles 65, 30640-010, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil

Resumo. O artigo apresenta a modelagem numérica para investigar o comportamento de vigas mistas constituídas de perfil de aço tubular retangular preenchido com concreto, utilizando o software comercial Abaqus para análise não linear via método dos elementos finitos. O estudo é parte de uma ampla pesquisa teórico-experimental em desenvolvimento na Universidade Federal de Minas Gerais que visa a investigar o comportamento estrutural dessa nova concepção de vigas mistas aço-concreto, comparando-se diferentes configurações da seção transversal mista. Neste artigo, são descritos os aspectos gerais do desenvolvimento do modelo numérico tridimensional, entre eles, o modelo constitutivo dos materiais, a modelagem das interfaces entre o aço e o concreto, a discretização dos componentes da viga mista, bem como a simulação do carregamento e das condições de contorno. Numa etapa subsequente, o modelo numérico será inicialmente validado a partir de resultados experimentais encontrados na literatura e, em seguida, calibrado com base em resultados experimentais obtidos através de ensaios laboratoriais em protótipos de vigas mistas em escala real realizados pelos autores.

Palavras-chave: Viga mista, Perfil tubular de aço preenchido com concreto, Modelagem numérica

1 INTRODUÇÃO

Perfis de aço tubulares retangulares têm sido frequentemente empregados na construção civil em função, principalmente, de suas vantagens estéticas se comparados aos perfis de aço de seção aberta. As novas coberturas dos aeroportos de Confins, MG, e de Congonhas, SP, ilustradas na Fig. 1, são exemplos da utilização de perfis tubulares retangulares como vigas aparentes no Brasil.



(a) Cobertura do aeroporto de Confins, MG (b) Cobertura do aeroporto de Congonhas, SP

Figura 1. Emprego de perfis de aço tubulares retangulares como vigas aparentes

O comportamento estrutural dos perfis tubulares sob flexão pode ser melhorado com o preenchimento desses perfis com concreto, criando assim uma viga mista. Entre as melhorias pode-se citar o retardamento da falha do perfil de aço por flambagem local (no caso de seções esbeltas), além do aumento da capacidade resistente, da rigidez e a ductilidade da viga mista em consequência do confinamento do núcleo de concreto proporcionado pelo tubo de aço. Adicionalmente, o núcleo de concreto devidamente armado pode proporcionar à viga uma boa capacidade resistente em situação de incêndio. Às vantagens estruturais, somam-se ainda benefícios construtivos, pois o sistema elimina o emprego de fôrmas para a moldagem do concreto uma vez que o tubo de aço desempenha essa função integralmente, diminuindo custos de material e de mão-de-obra, além de reduzir o tempo de execução. Adicionalmente, pode-se obter um aumento significativo de capacidade resistente, quando sobre as vigas preenchidas com concreto for projetada uma laje de concreto para cobertura ou piso, e se fizer a ligação entre a face superior do perfil tubular e a laje por meio de conectores de cisalhamento, da mesma maneira que nas vigas mistas clássicas previstas pelas normas brasileiras ABNT NBR 8800:2008 e ABNT NBR 16239:2013.

As pesquisas experimentais sobre vigas mistas de aço e concreto com perfil tubular preenchido já realizadas são escassas e limitadas a algumas situações específicas (Lu & Kennedy, 1994) (Elchalakani *et al.*, 2001) (Gho & Liu, 2004) (Han, 2004) (Han *et al.*, 2006) (Jiang *et al.*, 2013). Essas pesquisas objetivaram investigar a influência de alguns parâmetros no comportamento estrutural, entre eles: geometria da seção transversal do tubo de aço, características do concreto de preenchimento, relações dimensionais da seção transversal do tubo de aço, tipo de carregamento, etc.. Entretanto, constata-se que os modelos de vigas mistas ensaiados tiveram escala reduzida (comprimento de 1 a 2 metros), não continham armadura no interior do núcleo de concreto, não apresentaram laje de concreto sobreposta ao tubo e os tubos foram preenchidos na posição vertical. Particularmente no Brasil, essas vigas são desconhecidas da maioria dos projetistas e não são utilizadas.

Apesar de elucidarem diferentes aspectos do comportamento estrutural das vigas mistas, os estudos experimentais são dispendiosos por natureza e, conseqüentemente, tornam-se inviáveis para se investigar um amplo espectro de parâmetros de projeto. A modelagem numérica possibilita a complementação dos resultados experimentais e permite ampliá-los através de simulações nas quais parâmetros podem ser modificados e a sua influência no comportamento da viga mista pode ser avaliada. Softwares comercialmente disponíveis para análise via Método dos Elementos Finitos (MEF), tais como *Abaqus* e *Ansys*, possibilitam analisar mais efetivamente problemas mais complexos. Entretanto, questões como a caracterização dos materiais e das interfaces entre materiais, bem como a definição do tipo de elemento finito para discretização dos componentes devem ser criteriosamente investigadas.

Alguns modelos numéricos de vigas mistas de aço e concreto constituídas de perfil de aço tubular preenchido com concreto foram desenvolvidos para subsidiar a melhor compreensão do comportamento dessas vigas. Al-Rodan e Al-Tarawnah (2003) e Wang *et al.* (2014) realizaram estudos de modelagem numérica de vigas constituídas de tubo de aço retangular preenchido com concreto. O comportamento à flexão de tubos de aço circulares preenchidos com concreto foi investigado numericamente por Lu *et al.* (2009) e Moon *et al.* (2012). Nesses estudos foi empregado o software *Abaqus*. Para a discretização do núcleo de concreto, foi empregado o elemento sólido tridimensional hexaédrico de primeira ordem (8 nós) com opção de integração reduzida (elemento tipo C3D8R no *Abaqus*). Para a modelagem do perfil de aço, foi empregado elemento de casca, quadrilátero de primeira ordem (4 nós) com opção de integração reduzida (elemento tipo S4R no *Abaqus*), com exceção apenas para o modelo de Al-Rodan e Al-Tarawnah (2003), no qual foi usado indistintamente o elemento tipo C3D8R para modelar ambos os componentes da viga mista. Na modelagem da interface entre o tubo de aço e o núcleo de concreto, duas diferentes abordagens foram utilizadas: (i) interação do tipo contato entre superfícies (Al-Rodan e Al-Tarawnah, 2003) (Lu *et al.*, 2009) (Wang *et al.*, 2014) e (ii) introdução de elementos de contato (elemento tipo GAP no *Abaqus*) entre a superfície externa do núcleo de concreto e a superfície interna do tubo de aço (Moon *et al.*, 2012). Quanto à modelagem constitutiva do concreto, o modelo de dano com plasticidade, incorporado à biblioteca do *Abaqus*, foi o mais comumente empregado pelos autores (Lu *et al.*, 2009) (Moon *et al.*, 2012) (Wang *et al.*, 2014), diferindo quanto à modelagem das curvas tensão-deformação referentes ao comportamento do concreto à compressão e à tração. Modelos constitutivos de três estágios (elástico, elastoplástico e plástico) ou de cinco estágios (elástico, elastoplástico, plástico, encruamento e ruptura) foram empregados para simular o comportamento mecânico do aço dos perfis tubulares. Os modelos numéricos foram validados com base em resultados experimentais anteriormente publicados pelos próprios autores ou por outros pesquisadores.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar os principais aspectos da modelagem numérica que visa a investigar o comportamento de vigas mistas constituídas de perfil de aço tubular retangular preenchido com concreto, utilizando o software *Abaqus*. O estudo é parte de uma ampla pesquisa teórico-experimental em desenvolvimento na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) que visa a estudar o comportamento estrutural dessa nova concepção de vigas mistas de aço e concreto, comparando-se diferentes configurações da seção transversal mista.

2 ESTUDO EXPERIMENTAL

O estudo experimental compreenderá ensaios de flexão em 15 protótipos de vigas mistas constituídas por um perfil tubular retangular de aço, em escala real, preenchido com concreto armado ou não, com ou sem laje de concreto maciça sobreposta ao perfil de aço, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia e sempre biapoiadas. Os protótipos serão agrupados em 5 séries com diferentes configurações da seção transversal mista, visando à investigação comparativa do comportamento estrutural em termos da capacidade resistente ao momento fletor, da rigidez à flexão e da ductilidade. Os resultados obtidos experimentalmente serão posteriormente utilizados para aferir e calibrar o modelo numérico. A Fig. 2 ilustra as duas categorias de vigas mistas tubulares preenchidas com concreto a serem investigadas: sem laje colaborante (VMPC-SL) e com laje colaborante (VMPC-CL).

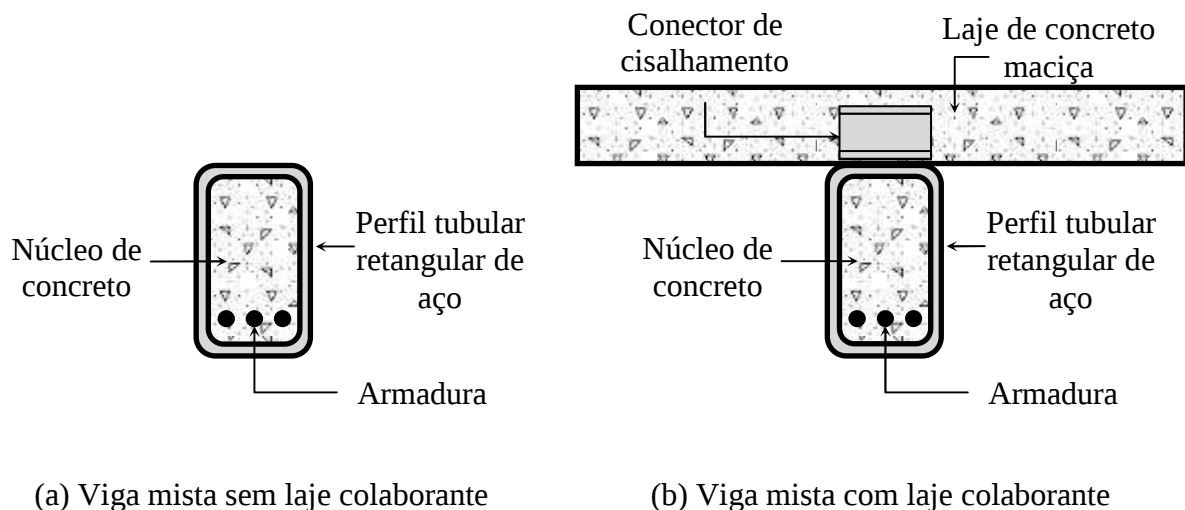


Figura 2. Vigas mistas tubulares de aço preenchidas com concreto

Os protótipos serão ensaiados à flexão sob a ação de duas cargas concentradas (P) aplicadas em pontos equidistantes dos apoios. O vão de cisalhamento (a) será adotado igual a um terço do vão livre (L_0) da viga mista. O esquema do ensaio de flexão e da instrumentação de um protótipo de viga mista VMPC-SL é ilustrado na Fig. 3. Serão monitorados deslocamentos lineares (flechas no meio do vão e sob os pontos de aplicação das cargas e deslocamentos relativos entre o aço e o concreto nas extremidades) através de transdutores de deslocamentos (DT), deformações específicas no aço, no concreto e nas armaduras através de extensômetros elétricos de resistência (EER) e força através de célula de carga.

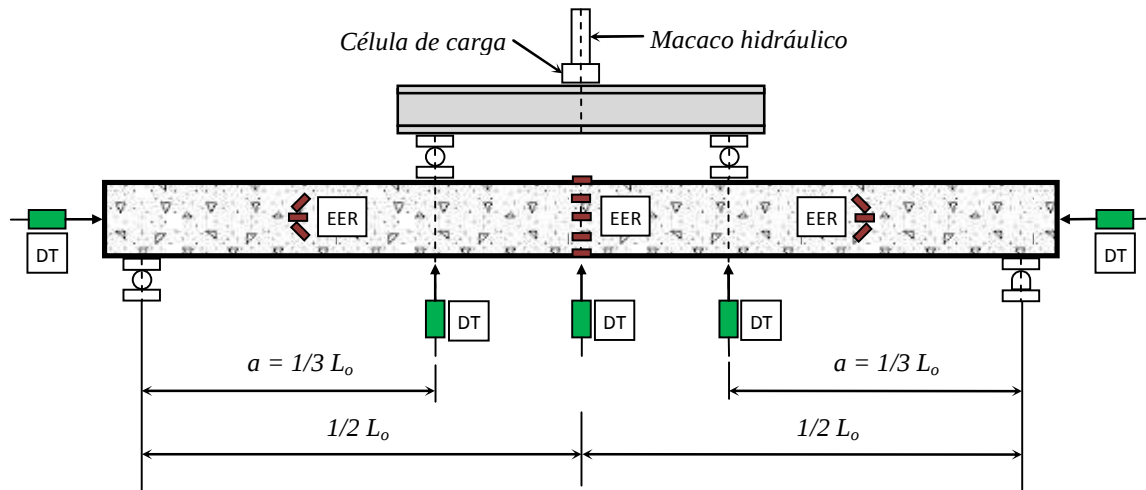


Figura 3. Esquema do ensaio de flexão

2.1 Materiais

Nos protótipos a serem ensaiados em laboratório e modelados numericamente, serão empregados perfis de aço tubulares retangulares, fabricados pela empresa do setor siderúrgico Vallourec Tubos do Brasil S.A. Os perfis tubulares retangulares fabricados pela Vallourec são produzidos a partir da conformação a frio de perfis tubulares circulares laminados a quente. No estudo, serão empregados os tubos VMB 250×150×6,4, fabricados com aço VMB 300. Na designação do tubo, os valores referem-se às dimensões nominais expressas em milímetros (mm): altura (h), largura (b) e espessura da parede (t), respectivamente (Fig. 4). O valor nominal do raio de concordância externo (r_e) entre a mesa e alma será adotado igual a 2,5 vezes a espessura da parede do tubo, conforme especificação da norma europeia EN 10219-2:2006, para tubos conformados a frio. Os tubos de aço apresentam comprimento total de 6 m. Na designação do aço, o valor refere-se à resistência característica ao escoamento (f_y), expressa em megapascal (MPa). O valor da resistência característica à ruptura (f_u) é 415 MPa, do módulo de elasticidade (E_a) é 200 GPa, e do coeficiente de Poisson (ν_a) é 0,3.

No preenchimento dos perfis tubulares, bem como na concretagem da laje maciça colaborante das vigas mistas, será empregado concreto autoadensável usinado, de densidade e resistência normais. Testes de concretagem em dois protótipos de mesma seção transversal apresentando comprimento total de 12 m foram realizados pelos autores (Flor *et al.*, 2015). Os tubos de aço foram preenchidos na posição horizontal empregando-se dois diferentes dispositivos acoplados ao perfil tubular para o lançamento do concreto autoadensável no interior do tubo: (i) funil de PVC para preenchimento sem pressão e, (ii) dispositivo metálico para preenchimento com pressão. Ambos os métodos mostraram-se eficientes quanto ao processo de concretagem. Entretanto, descontinuidades na face superior do núcleo de concreto foram observadas após desforma dos protótipos. Os autores atribuíram essas imperfeições iniciais à presença de ar aprisionado associada ao próprio assentamento do concreto no interior do tubo.

O valor da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) será de 30 MPa. O valor médio da resistência à compressão do concreto (f_{cm}) na idade de 28 dias será estimado igual ao valor do f_{ck} acrescido de 8 MPa, conforme a norma europeia EN 1992-1-1:2004. O

valor do coeficiente de Poisson (ν_c) será tomado igual a 0,2. Nas vigas mistas sobrepostas por uma laje de concreto maciça, a espessura (t_c) da laje colaborante será adotada igual a 100 mm e a largura efetiva (b_c) será adotada igual a 800 mm (Fig. 4).

Na ligação mecânica entre o perfil de aço tubular retangular e a laje de concreto maciça colaborante das vigas mistas, serão utilizados conectores de cisalhamento em perfil U 76,2×6,10 laminado, fabricado pela Gerdau S.A.. As vigas mistas com laje colaborante serão projetadas de forma a estabelecer interação completa entre o perfil de aço e a laje maciça. Portanto, o número de conectores de cisalhamento será suficiente para resistir integralmente à força de cisalhamento longitudinal e tornar desprezável qualquer deslizamento relativo na superfície de contato na interface aço-concreto.

Para a armadura passiva tracionada longitudinal disposta no interior do núcleo de concreto será empregado aço de categoria CA-50, apresentando valores característicos da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade iguais a 500 MPa e 210 GPa, respectivamente.

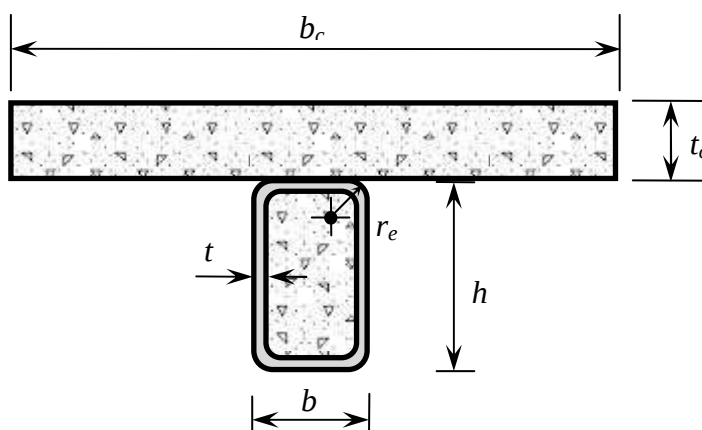


Figura 4. Dimensões nominais da seção transversal mista

2.2 Configurações da seção transversal

As configurações da composição da seção transversal que serão investigadas estão apresentadas na Tab. 1. As configurações C2 a C4 referem-se às vigas mistas tubulares de aço preenchidas com concreto sem laje colaborante (VMPC-SL), sendo que a configuração C1, referente à viga tubular de aço sem preenchimento de concreto, será tomada como referência para fins comparativos do comportamento estrutural. A configuração C6 refere-se à viga mista tubular de aço preenchida com concreto armado com laje colaborante (VMPC-CL) e será comparada com a configuração C5, referente à viga mista convencional, constituída do perfil de aço tubular sem preenchimento de concreto com laje colaborante sobreposta.

2.3 Estimativas teóricas

Uma análise teórica preliminar, com base nas normas brasileiras ABNT NBR 8800:2008 e ABNT NBR 16239:2013, foi realizada objetivando-se determinar a capacidade resistente nominal ao momento fletor e estimar a rigidez à flexão das vigas mistas tubulares de aço preenchidas com concreto, objeto deste estudo. Cabe mencionar que as seções transversais

das vigas mistas a serem investigadas são classificadas como “compactas”, com base nas normas brasileiras supracitadas. Por se tratar de vigas compactas, a capacidade resistente ao momento fletor é governada pelo colapso da viga mista caracterizado pela plastificação total da seção transversal na qual o momento fletor é máximo.

Para a determinação do momento fletor resistente nominal (M_{Rk}), foram utilizados os diagramas retangulares de tensões plásticas em vigas mistas de alma cheia compactas com interação completa sob momento positivo incluindo, conforme o caso, os diagramas de tensões plásticas correspondentes à região comprimida do núcleo de concreto e à região tracionada da armadura passiva inserida no interior do núcleo de concreto. A rigidez à flexão (K) e a flecha elástica máxima ($\delta_{máx}$) de cada configuração da viga mista foram determinadas através da rigidez à flexão e da flecha máxima para a viga com seção homogeneizada em aço do perfil correspondente. A Tab. 2 apresenta o momento fletor resistente nominal (M_{Rk}), a carga última no atuador (P_U) correspondente (igual a duas vezes o valor da carga concentrada P), a rigidez à flexão (K) e a flecha elástica máxima ($\delta_{máx}$) para as diferentes configurações da seção transversal.

Tabela 1. Configurações da seção transversal

Configuração	Descrição
C1	Perfil de aço tubular retangular sem preenchimento do núcleo.
C2	Perfil de aço tubular retangular com preenchimento do núcleo com concreto.
C3	Perfil de aço tubular retangular com preenchimento do núcleo com concreto armado com armadura passiva tracionada em uma camada ($A_{s1}=2\varnothing 16$ mm).
C4	Perfil de aço tubular retangular com preenchimento do núcleo com concreto armado com armadura passiva tracionada em duas camadas ($A_{s1}=2\varnothing 16$ mm e $A_{s2}=2\varnothing 16$ mm).
C5	Perfil de aço tubular retangular sem preenchimento do núcleo e laje maciça colaborante ($t_c=100$ mm e $b_c=800$ mm).
C6	Perfil de aço tubular retangular com preenchimento do núcleo com concreto armado com armadura passiva tracionada em duas camadas ($A_{s1}=2\varnothing 16$ mm e $A_{s2}=2\varnothing 16$ mm) e laje maciça colaborante ($t_c=100$ mm e $b_c=800$ mm).

3 MODELAGEM NUMÉRICA

Na fase inicial da análise numérica das vigas mistas, foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional preliminar para as vigas mistas, empregando-se o software comercial *Abaqus*, versão 6.13 (Simulia Corp., 2013), para análise não linear via Método dos Elementos Finitos (MEF).

Tabela 2. Estimativas teóricas

Configuração	M_{Rk} (kN.m)	P_U (kN)	K (kN.m ²)	$\delta_{máx}$ (mm)
C1	118,93	125,19	8.545,14	41,52
C2	142,73	150,24	10.295,66	35,65
C3	166,31	175,06	11.112,87	37,10
C4	179,52	188,97	11.397,63	37,95
C5	290,72	306,02	32.272,06	20,77
C6	384,69	404,85	37.992,35	21,52

3.1 Modelos constitutivos dos materiais

Para o comportamento mecânico do aço do perfil tubular foi empregado um modelo constitutivo elastoplástico trilinear ilustrado esquematicamente na Fig. 5a. Trata-se de um modelo elástico-linear até a resistência ao escoamento f_y , quando se inicia o comportamento plástico. A tensão permanece constante em f_y entre a deformação correspondente ao início do escoamento ϵ_y até um valor de deformação aproximado em $10 \epsilon_y$, caracterizando o comportamento perfeitamente plástico. A partir dessa deformação, considera-se o regime de encruamento, no qual a tensão cresce linearmente até a resistência à ruptura f_u . A deformação correspondente à ruptura é aproximada em $100 \epsilon_y$.

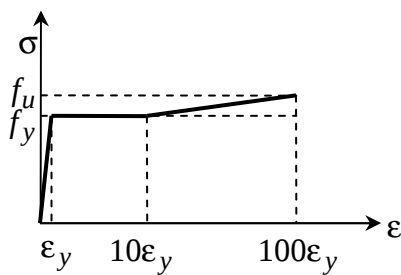
Para a modelagem do comportamento mecânico do concreto, foi utilizado o modelo de dano com plasticidade (*Concrete Damaged Plasticity Model*) incorporado ao *Abaqus*, que permite a modelagem do comportamento frágil do concreto sob baixas tensões de confinamento. Nessas condições, os principais mecanismos de falha são fissuração sob tração e esmagamento sob compressão. O modelo assume que o comportamento do concreto sob tração e compressão uniaxiais é caracterizado pela degradação da rigidez no caso de descarregamento. Entretanto, no caso de carregamento estático, o efeito da degradação da rigidez pode ser desconsiderado.

O comportamento do concreto sob compressão uniaxial foi modelado com base na relação tensão-deformação uniaxial da norma europeia EN 1992-1-1:2004. Foi adotado um modelo multilinear para a relação constitutiva ilustrada na Fig. 5b. Foi admitido comportamento elástico linear até a tensão correspondente a $0,40 f_c$. O comportamento plástico não linear inicia-se a partir da tensão correspondente a $0,40 f_c$ até a tensão máxima de compressão f_c . Finalmente, para o comportamento pós-pico, foi adotado um trecho linear com tensão constante em f_c entre ϵ_{c1} e 10‰ .

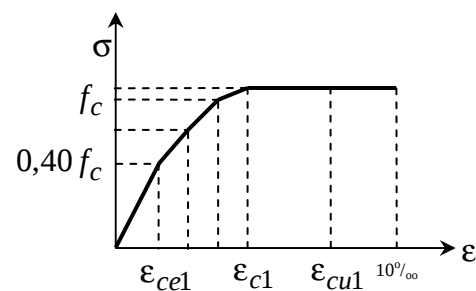
Na modelagem do comportamento do concreto sob tração uniaxial, considerou-se a contribuição do concreto entre fissuras (efeito conhecido na literatura como *Tension Stiffening*) na fase pós-pico por meio de uma relação tensão-deslocamento referente ao comportamento pós-ruptura do concreto, conforme ilustrado na Fig. 5c. Segundo a documentação do *Abaqus*, em casos do concreto apresentar pouco ou nenhum reforço de

armadura passiva, a especificação da relação tensão-deformação na fase pós-pico do comportamento à tração introduz sensibilidade de malha nos resultados. Nesse caso, o deslocamento é determinado pela abertura da fissura. A tensão máxima de tração f_{ct} foi considerada igual a 10% da tensão máxima de compressão f_c . Adotou-se um deslocamento máximo na ruptura igual a 0,50 mm.

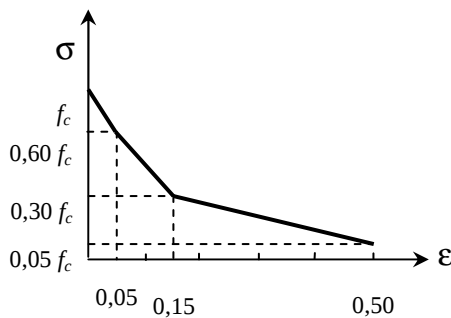
Para o comportamento do aço da armadura passiva foi adotado um modelo constitutivo elastoplástico perfeito conforme ilustrado na Fig. 5d. Trata-se de um modelo elástico-linear até a resistência ao escoamento f_{ys} , quando se inicia o comportamento plástico. A tensão permanece constante em f_{ys} entre a deformação correspondente ao início do escoamento ϵ_{ys} até um valor de deformação aproximado em $100 \epsilon_{ys}$, caracterizando o comportamento perfeitamente plástico.



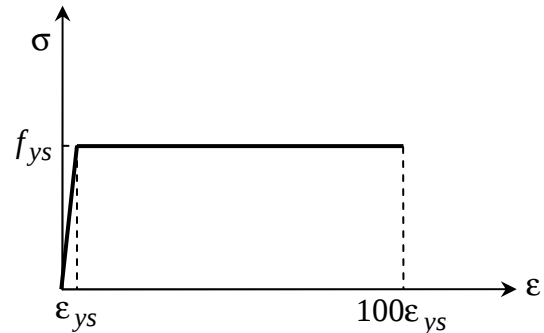
(a) Aço do perfil tubular



(b) Concreto sob compressão



(c) Concreto sob tração



(d) Aço da armadura passiva

Figura 5. Modelos constitutivos dos materiais

3.2 Discretização da malha de elementos finitos

Para a modelagem do perfil de aço, foi usado o elemento plano de casca, quadrilátero de primeira ordem (4 nós), com opção de integração reduzida, designado S4R. Cada nó tem 6 graus de liberdade: 3 translações e 3 rotações. Devido às características geométricas do tubo de aço, o elemento de casca apresenta-se mais adequado se comparado ao elemento sólido. O núcleo de concreto e a laje maciça de concreto foram discretizados empregando-se o elemento sólido tridimensional, hexaédrico de primeira ordem (8 nós), com opção de integração reduzida, designado C3D8R. Cada nó tem 3 graus de liberdade (3 translações). O elemento designado T3D2 foi utilizado na modelagem das barras da armadura passiva inserida no interior do núcleo de concreto. Trata-se de um elemento tridimensional de treliça, linear de

primeira ordem (2 nós) capaz de suportar apenas carregamentos axiais. Finalmente, na discretização da malha do perfil de aço, do núcleo de concreto, da laje colaborante e das barras da armadura passiva, foram utilizadas sementes de 20 mm na direção longitudinal.

3.3 Interfaces aço-concreto

Para a modelagem da interface aço-concreto entre o tubo de aço e o núcleo de concreto foi empregado o modelo de interação do tipo “*contact*” entre duas superfícies, que permite modelar os comportamentos normal e tangencial na interface entre os dois materiais. Considerou-se contato do tipo “*hard*” para o comportamento normal. Foi adotado o valor 0,5 para o coeficiente de atrito na simulação do comportamento tangencial através do modelo de atrito isotrópico de Coulomb, incorporado ao *Abaqus*.

Com relação à interação entre o aço da armadura passiva e o concreto no interior do tubo, considerou-se perfeita aderência entre os dois materiais descartando-se, portanto, qualquer possibilidade de ocorrência de fenômenos decorrentes da perda de aderência na interface.

Na simulação da interação completa entre a laje maciça de concreto e o perfil tubular de aço, utilizou-se a opção de restrição ao deslocamento do tipo “*tie*” entre superfícies. Essa opção permite vincular duas superfícies que estejam em contato no modelo geométrico e impor que os deslocamentos de todos os nós da malha de elementos finitos de ambas as superfícies em contato sejam iguais.

3.4 Condições de contorno e carregamento

Visando economia de esforço computacional e eficiência da análise, o modelo numérico foi desenvolvido fazendo-se uso das simetrias de geometria e carregamento em relação ao plano transversal localizado a meio vão, perpendicular ao plano de flexão. Portanto, somente metade da viga mista foi considerada para fins de simulação. Nas descrições a seguir, a direção *z* corresponde à direção do eixo longitudinal da viga mista, o plano *xy* corresponde ao plano da seção transversal e o plano *yz* corresponde ao plano de flexão. As condições de contorno referentes ao apoio foram definidas em uma região localizada na face inferior do tubo de aço, utilizando-se a opção MPC (*Multiple Point Constraint*) disponível no *Abaqus*. Essa opção permite restringir os graus de liberdade dos nós tipo “*slave*” de uma região aos graus de liberdade de um único ponto. Esse ponto foi definido no ponto médio da linha de centro do apoio. Foram restringidos os deslocamentos lineares nas direções *x* e *y* e a rotação em torno do eixo *z*. As condições de contorno referentes à seção localizada no plano transversal de simetria foram estabelecidas de forma a restringir o deslocamento linear na direção longitudinal *z* (perpendicular ao plano de simetria) e as rotações em torno dos eixos *x*, *y* e *z*. Finalmente, a carga concentrada foi modelada através de um carregamento uniformemente distribuído do tipo “*pressure*” aplicado na mesa superior do tubo de aço, atuando numa região de área quadrada, centralizada a um terço do vão da viga.

A Fig. 6 ilustra a discretização da malha estruturada de elementos finitos para os componentes do modelo numérico da viga mista: perfil tubular de aço, núcleo de concreto e laje colaborante.

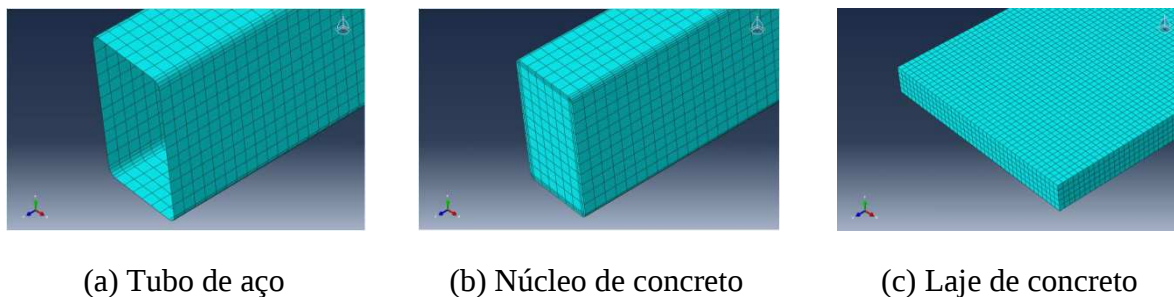
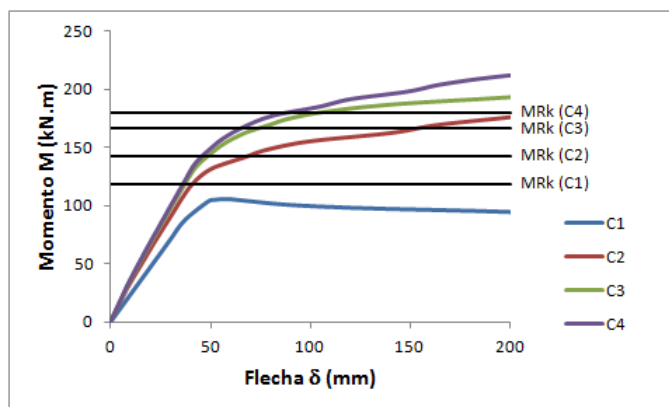


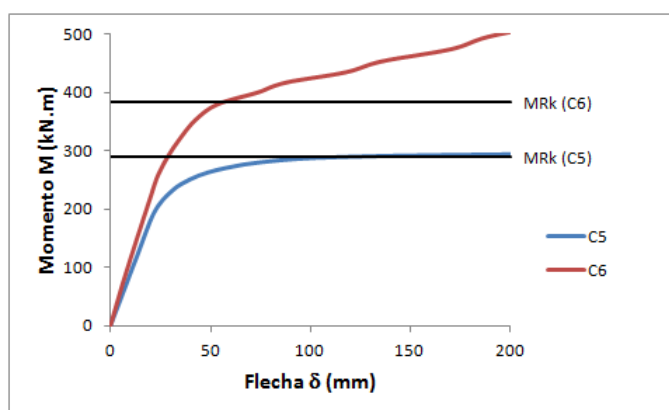
Figura 6. Discretização da malha de elementos finitos

3.5 Resultados e discussão

As Figs. 7a e 7b apresentam as curvas momento-flecha na seção a meio vão obtidas através do processamento do modelo numérico para as vigas mistas sem laje colaborante (configurações C1 a C4) e para as vigas mistas com laje colaborante (configurações C5 e C6), respectivamente. Para fins comparativos, são apresentados, em linhas horizontais, os valores do momento fletor resistente nominal (M_{Rk}), para as diferentes configurações.



(a) Vigas mistas sem laje colaborante



(b) Vigas mistas com laje colaborante

Figura 7. Curvas momento vs. flecha

As Tabs. 3 e 4 apresentam os resultados teóricos do momento fletor resistente e da rigidez à flexão obtidos para as diferentes configurações das vigas mistas sem laje colaborante (configurações C1 a C4) e com laje colaborante (configurações C5 e C6), respectivamente. Nessas tabelas são apresentados também os valores da rigidez à flexão obtidos através do processamento do modelo numérico. O valor numérico do momento fletor resistente não foi determinado nessa etapa do estudo. Para tanto, seria necessário estabelecer uma condição para o término da análise do modelo numérico com base, por exemplo, na especificação de um deslocamento vertical máximo na seção a meio vão da viga. A flecha máxima para cada configuração de viga mista será obtida após a execução dos ensaios de flexão do programa experimental. Alternativamente, poder-se-ia definir a capacidade resistente ao momento fletor com base no valor do momento fletor correspondente a uma deformação específica máxima no aço tracionado do tubo.

Tabela 3. Resultados das vigas mistas sem laje colaborante

Configuração	Momento Resistente (teórico) $M_{Rk,t}$ (kN.m)	Razão $\frac{M_{Rk,t}}{M_{Rk,t,ref}}$	Rigidez à Flexão (teórico) K_t (kN.m ²)	Razão $\frac{K_t}{K_{t,ref}}$	Rigidez à Flexão (numérico) K_n (kN.m ²)	Razão $\frac{K_n}{K_t}$
C1 ^(*)	118,93	1,00	8.545,14	1,00	8.148,15	0,95
C2	142,73	1,20	10.295,66	1,20	10.514,50	1,02
C3	166,31	1,40	11.112,87	1,30	11.702,28	1,05
C4	179,52	1,51	11.397,63	1,33	11.632,61	1,02

(*) configuração de referência

Tabela 4. Resultados das vigas mistas com laje colaborante

Configuração	Momento Resistente (teórico) $M_{Rk,t}$ (kN.m)	Razão $\frac{M_{Rk,t}}{M_{Rk,t,ref}}$	Rigidez à Flexão (teórico) K_t (kN.m ²)	Razão $\frac{K_t}{K_{t,ref}}$	Rigidez à Flexão (numérico) K_n (kN.m ²)	Razão $\frac{K_n}{K_t}$
C5 ^(*)	290,72	1,00	32.272,06	1,00	30.894,74	0,96
C6	384,69	1,32	37.992,35	1,18	38.402,00	1,01

(*) configuração de referência

Para as VMPC-SL pode-se observar que o preenchimento do tubo de aço com concreto sem reforço de armadura (configuração C2) apresenta um relativo aumento (20%) na capacidade resistente ao momento fletor. Entretanto, reforçando o núcleo de concreto com armadura (configurações C3 e C4), o aumento é mais significativo (40 a 51%). Observa-se também que o preenchimento do tubo com concreto proporcionou um aumento da rigidez à flexão (20 a 33%). Para as VMPC-CL, observa-se que o preenchimento do tubo com concreto armado (configuração C6) resultou em um aumento da capacidade resistente ao momento fletor de 32% e acarretou em um aumento da rigidez à flexão de 18%. As curvas momento-flecha obtidas através da simulação numérica refletem qualitativamente as vantagens estruturais obtidas com o preenchimento do perfil tubular com concreto armado.

Nas Figs. 7a e 7b pode-se constatar qualitativamente que as curvas momento-flecha obtidas numericamente para as vigas mistas preenchidas com concreto, com ou sem laje colaborante, ultrapassam os valores teóricos do respectivo momento fletor resistente, exceto para as configurações de referência C1 (viga tubular puramente de aço) e C5 (viga mista convencional constituída do perfil de aço tubular com laje sobreposta). Tal fato reforça a necessidade da calibração do modelo numérico com base em resultados experimentais, bem como do ajuste de parâmetros relacionados aos modelos constitutivos dos materiais.

Finalmente, comparando-se os valores obtidos teórica e numericamente para a rigidez à flexão das vigas mistas, observa-se uma satisfatória concordância, sendo que os valores numéricos superam os teóricos entre 1 a 5%. Os valores a serem obtidos através dos ensaios experimentais servirão para calibrar o modelo numérico e aferir os procedimentos normativos empregados na determinação do valor teórico da rigidez à flexão.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem numérica via MEF apresenta-se uma ferramenta promissora para se obter dados que subsidiarão o desenvolvimento de um modelo teórico para o projeto de vigas mistas tubulares de aço preenchidas com concreto armado. Na subsequente etapa de modelagem numérica, será realizada a validação do modelo a partir de resultados experimentais encontrados na literatura. Paralelamente, o modelo será calibrado com base nos resultados experimentais obtidos através dos ensaios laboratoriais de flexão dos 15 protótipos de vigas mistas. Finalmente, será desenvolvido um estudo paramétrico visando a elucidar a influência de parâmetros específicos no projeto das vigas mistas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Vallourec Tubos do Brasil S.A. e à LafargeHolcim pelo fornecimento dos perfis tubulares e do concreto, respectivamente, utilizados no programa experimental deste projeto de pesquisa. Os autores também agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte financeiro dado ao desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 16239:2013, 2013. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

- ABNT NBR 8800:2008, 2008. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Al-Rodan, A; Al-Tarawnah, S., 2003. FE analysis of the flexural behavior of rectangular tubular sections filled with high-strength concrete. *Emirates Journal for Engineering Research*, vol. 8, no. 1, pp. 71-77.
- Elchalakani, M.; Zhao, X. L.; Grzebieta, R. H., 2001. Concrete-filled circular steel tubes subjected to pure bending. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 57, pp. 1141-1168.
- EN 10219-2:2006, 2006. Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels. Part2: Tolerances, dimensions and sectional properties. European Committee for Standardization.
- EN 1992-1-1:2004, 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: general rules and rules for buildings. European Committee for Standardization.
- Flor, J. M.; Fakury, R. H.; Caldas, R. B.; Rodrigues, F. C.; Araújo, A. H. M., 2015. Casting of composite concrete-filled steel tube beams with self-consolidating concrete. In Batista, E.; Vellasco, P. & Lima, L., eds, *15th International Symposium on Tubular Structures (ISTS15)*, pp. 111-116.
- Gho, W.-M.; Liu, D., 2004. Flexural behaviour of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 60, pp. 1681-1696.
- Han, L.-H., 2004. Flexural behaviour of concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 60, pp. 313-337.
- Han, L.-H.; Lu, H.; Yao, G.-H.; Liao, F.-Y., 2006. Further study on the flexural behaviour of concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 62, pp. 554-565.
- Jiang, A.; Chen, J.; Jin, W., 2013. Experimental investigation and design of thin-walled concrete-filled steel tubes subject to bending. *Thin-walled Structures*, vol. 63, pp. 44-50.
- Lu, H.; Han, L.-H.; Zhao, X.-L., 2009. Analytical behavior of circular concrete-filled thin-walled steel tubes subjected to bending. *Thin-walled Structures*, vol. 47, pp. 346-358.
- Lu, Y.Q.; Kennedy, D. J. L., 1994. The flexural behaviour of concrete-filled hollow structural sections. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 21, n. 1, pp. 111-130.
- Moon, J.; Roeder, C.W.; Lehman, D.E.; Lee, H.-E., 2012. Analytical modeling of bending of circular concrete-filled steel tubes. *Engineering Structures*, vol. 42, pp. 349-361.
- Simulia Corp., 2013. *Software Abaqus 6.13*. Dassault Systèmes.
- Wang, R.; Han, L.-H.; Nie, J.-G.; Zhao, X.-L., 2014. Flexural performance of rectangular CFST members. *Thin-walled Structures*, vol. 79, pp. 154-165.