



ANÁLISE NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS CONSIDERANDO A CONTRIBUIÇÃO DO ATRITO NA INTERFACE AÇO-CONCRETO E DA FLEXIBILIDADE DOS CONECTORES DE CISALHAMENTO

Karen Aparecida Freitas Peroni Maia

Hermes Carvalho

Francisco Carlos Rodrigues

karenperoni@hotmail.com; hermes@dees.ufmg.br; francisco@dees.ufmg.br

Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais

Avenida Antônio Carlos - 6627, Pampulha, CEP 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Resumo. *A resistência e a rigidez da ligação entre o perfil de aço e a laje de concreto em vigas mistas são funções diretas da quantidade e das propriedades dos conectores de cisalhamento utilizados. Caso esses conectores sejam flexíveis, a contribuição do atrito acentua-se tanto para a consideração dos estados limites de serviço quanto para os estados limites últimos. As prescrições das normas brasileiras não contemplam a influência do atrito em vigas mistas, apesar de o considerarem para lajes mistas com fôrma de aço incorporada. Este trabalho faz parte de uma extensa pesquisa teórico-experimental supervisionada por professores da UFMG que visa investigar o comportamento de vigas mistas utilizando conectores de cisalhamento do tipo rebite tubular com rosca interna e parafuso sextavado. Neste caso, o estudo se concentra na avaliação do comportamento de tais vigas mistas face à presença de atrito na interface perfil de aço – laje de concreto. Uma metodologia numérica em elementos finitos foi desenvolvida utilizando o software ANSYS®, sendo seus resultados comparados posteriormente com resultados experimentais obtidos no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas da UFMG, para vigas mistas com e sem atrito.*

Palavras-chave: *Vigas mistas, Atrito na interface laje-perfil de aço, Conectores de cisalhamento flexíveis, Rebite tubular com rosca interna e parafuso sextavado, Perfis formados a frio.*

1 INTRODUÇÃO

O uso de perfis formados a frio na indústria de construção do Brasil aumentou não só para aplicações em elementos secundários, como telhas e demais elementos de cobertura espacial de telhados e paredes, mas também em componentes primários, como as vigas de piso.

A resistência e a rigidez da conexão entre a laje de concreto e o perfil de aço em vigas mistas dependem basicamente do número de conectores de cisalhamento envolvidos no concreto e suas propriedades. No caso dos conectores de cisalhamento flexíveis, a contribuição do atrito entre a laje e o perfil de aço pode ser relevante, tanto para os estados limites de serviço quanto para os estados limites últimos, desde que o comprimento da viga seja relativamente curto e a rigidez da laje seja relativamente grande em comparação com o perfil de aço isolado. Essas conclusões foram extraídas de modelos analíticos e numéricos anteriores que permitem considerar o atrito entre a laje e o perfil de aço sobreposto à resistência dos conectores de cisalhamento (Silva, 2009; Queiroz et al., 2009; Oliveira, 2009; Queiroz et al., 2010). Esses resultados ainda não foram incluídos nas disposições normativas brasileira (ABNT NBR 8800: 2008), americana (AISC, 2005) e europeia (EN 1994-1-1: 2004), entretanto, tão logo os estudos em andamento acerca do tema sejam concluídos, a contribuição do atrito no comportamento de vigas mistas deverá a elas ser incorporada.

A Fig. 1 mostra a seção transversal de uma viga mista em que a viga de aço é formada por uma seção caixão de chapas dobradas a frio e a laje é do tipo mista com fôrma de aço incorporada (as nervuras do deck, neste caso, são perpendiculares ao perfil de aço que compõe a viga).

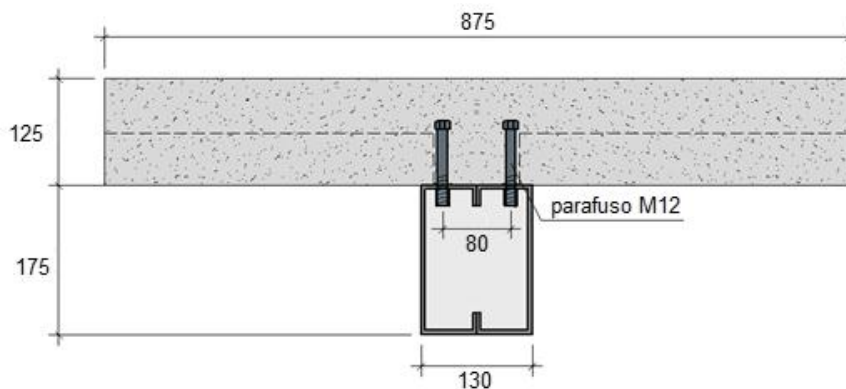


Figura 1. Seção transversal de uma viga mista (Oliveira, 2009).

O conector de cisalhamento usado combina um rebite com rosca interna acionado no orifício do perfil de aço e um parafuso de alta resistência, como ilustrado na Fig. 2. Esse conector foi adotado de forma inovadora como um conector de cisalhamento de viga mista, em virtude da limitação da aplicação de conectores tradicionais soldados ao perfil de parede fina. Além disso, permite um procedimento de instalação simples e prático. Devido à deformação plástica do suporte e à ovalização do furo, esta conexão revelou uma flexibilidade muito maior do que uma conexão convencional com conector de cisalhamento soldado

(Bremer, 2007), levando a problemas específicos no comportamento da viga mista. Uma dessas questões é o papel desempenhado pelo atrito na interface entre o perfil de aço e a laje mista, o que motivou uma série de estudos analíticos, numéricos e experimentais desenvolvidos na Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

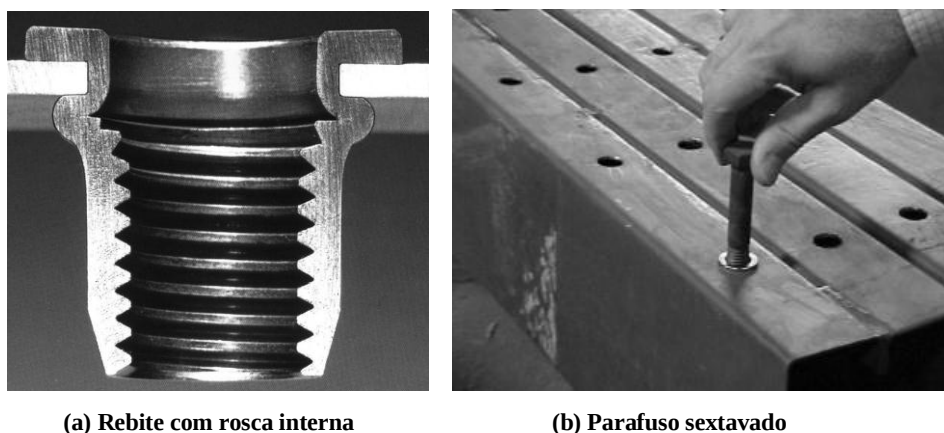


Figura 2. Rebite tubular com rosca interna e parafuso sextavado (Bremer, 2007).

Este artigo apresenta os ensaios experimentais realizados para verificar o papel desempenhado pelo atrito na interface perfil metálico – laje no comportamento de vigas mistas com lajes mistas com fôrma de aço incorporada submetidas à solicitação de flexão. Em paralelo, são apresentados os modelos numéricos desenvolvidos para simular o comportamento das vigas ensaiadas, cujos resultados serão comparados aos experimentais.

2 ANÁLISE EXPERIMENTAL

2.1 Descrição dos modelos experimentais

Com o objetivo de avaliar e quantificar a contribuição do atrito no comportamento da viga mista, os modelos para a análise experimental foram concebidos com base nas conclusões extraídas de estudos anteriores (ver Item 1) com as seguintes características: viga curta com comprimento de 3.5 metros e conectores de cisalhamento flexíveis. O protótipo foi dimensionado de forma que a capacidade resistente máxima fosse definida pela plastificação total ou parcial do perfil de aço.

A seção transversal do modelo da viga mista é ilustrada na Fig. 1. O perfil caixa é formado a partir de uma chapa de 2 mm de espessura em aço SAC 300, cujas resistências ao escoamento e à ruptura são de $f_y = 300$ MPa e $f_u = 450$ MPa, respectivamente. As lajes mistas com fôrma de aço incorporada apresentaram concreto armado moldado “*in loco*”, com resistência à compressão igual a 20 MPa e armadura transversal de cisalhamento com diâmetro igual a 6.0 mm.

Dois sistemas de vigas mistas foram testados, cada qual com duas séries de modelos, totalizando quatro ensaios. Os modelos denominados VM-CA1 e VM-CA2 referem-se a vigas com atrito na interface entre perfil de aço e laje mista e os modelos VM-SA1 e VM-SA2 não apresentaram a contribuição de atrito. A Fig. 3 mostra como o atrito foi eliminado através da colocação de duas chapas de teflon na interface aço – concreto.

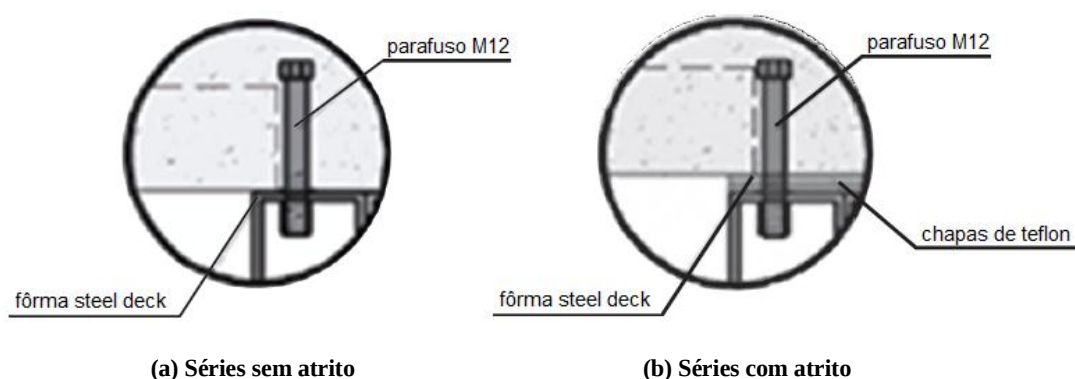


Figura 3. Detalhe da interface perfil de aço – laje (Oliveira, 2009).

Os conectores de cisalhamento (Fig. 2) eram compostos por parafusos de alta resistência com 12 mm de diâmetro, aço DIN 960 classe 5.8, parafusados em rebites de aço SAE 1040. Ensaios “push-out” realizados em uma viga mista similar cuja fôrma de aço incorporada se apresentava paralela ao perfil de aço apresentaram a curva carga *versus* deslizamento ilustrada na Fig. 4, a partir da qual se pode determinar a rigidez inicial associada a um conector, igual a 70 kN /cm. A curva ajustada do modelo experimental foi reajustada a fim de ser utilizada no modelo numérico, conforme apresentado em detalhes no Item 3.

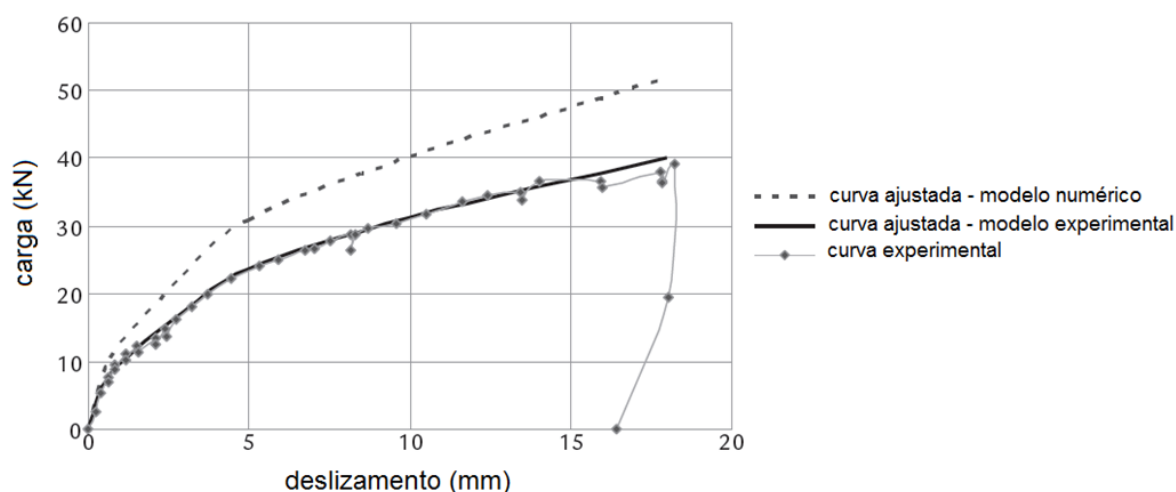


Figura 4. Curva carga x deslizamento associada a um conector de cisalhamento (Queiroz et al., 2014).

A elevada flexibilidade observada no comportamento dos conectores é decorrente dos altos gradientes de deformação da chapa fina do perfil de aço e consequente ovalização do furo. A viga mista foi projetada para interação completa (governada pela força do aço), resultando em 22 conectores distribuídos quase uniformemente ao longo de cada lado da seção transversal.

Os modelos de vigas foram submetidos a quatro forças concentradas. A Fig. 5 apresenta a configuração do ensaio e a instrumentação do modelo em que a medição dos deslocamentos, das deformações e da carga aplicada durante os ensaios foi realizada por meio de transdutores de deslocamentos (DT), relógios comparadores (RC) e extensômetros elétricos de resistência (EER).

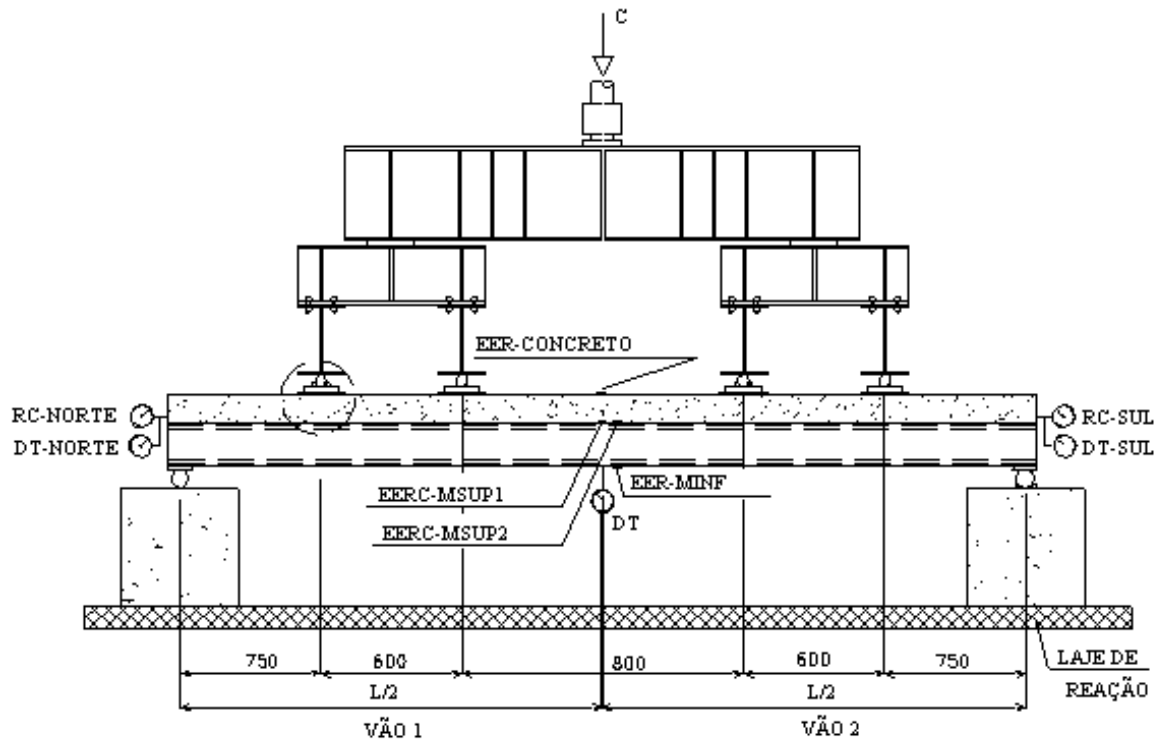


Figura 5. Configuração dos ensaios experimentais e instrumentação (Oliveira, 2009).

2.2 Resultados experimentais

A Fig. 6 apresenta as respostas da viga mista em termos do momento de flexão no meio do vão para os quatro modelos ensaiados. Foi possível observar a influência favorável do atrito no aumento da rigidez e da resistência do sistema misto uma vez que os modelos ensaiados eram todos iguais, com exceção das camadas de teflon inseridas na interface aço – concreto para os modelos sem atrito.

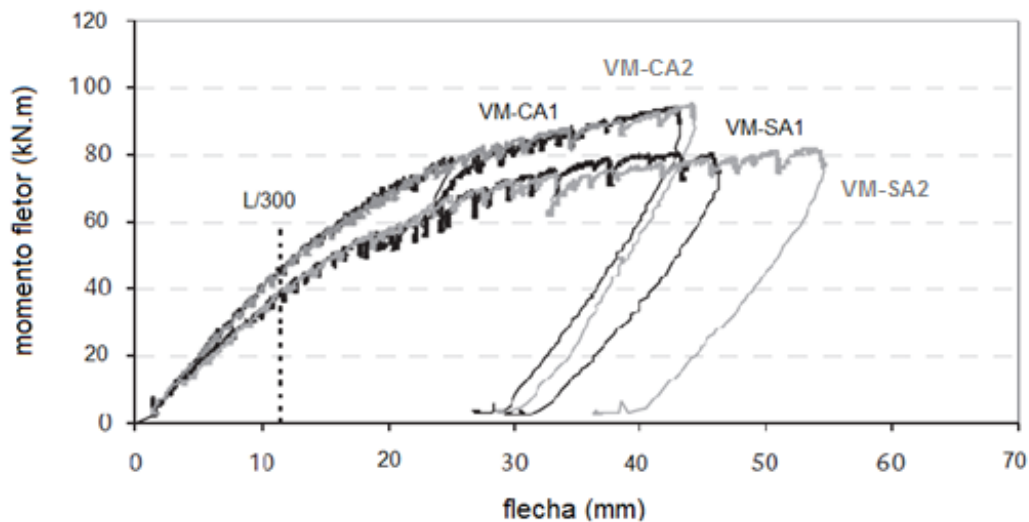


Figura 6. Gráfico momento x flecha no meio do vão para os quatro modelos ensaiados (Oliveira, 2009).

As cargas concentradas últimas e seus respectivos momentos fletores para todos os modelos ensaiados estão representados na Tabela 1. Comparando os resultados obtidos tomando-se os valores médios de cada série, verifica-se que os modelos com atrito apresentaram cargas de colapso aproximadamente 16% maiores que as dos modelos sem a presença de atrito na interface.

Tabela 1: Cargas últimas e seus respectivos momentos fletores para os quatro modelos ensaiados.

Modelo	Carga última (kN)	Momento máximo (kN.m)
VM-CA1	174.2	94.3
VM-CA2	176.2	95.4
VM-SA1	148.4	80.8
VM-SA2	151.1	82.2

Uma vez que o momento fletor em estado limite de serviço é definido como aquele associado à deflexão igual a $L / 300$, nota-se na Fig. 6 que este momento corresponde a valores próximos a 46 kN.m para o modelo com atrito e a 40 kN.m para o modelo sem atrito, evidenciando uma diferença de cerca de 15% atribuída ao efeito favorável do atrito.

3 MODELO NUMÉRICO

3.1 Modelo desenvolvido no ANSYS®

Um modelo em elementos finitos no *software* ANSYS® v.11.0 foi desenvolvido, considerando o comportamento elastoplástico de vigas mistas, incluindo atrito na interface perfil metálico – laje. O perfil de aço foi modelado com elementos de casca “*Shell 181*”. Foram considerados o critério de escoamento de Von Mises, relação tensão-deformação multilinear e encruamento isotrópico. As tensões residuais foram desprezadas no estudo realizado.

Os conectores de cisalhamento foram representados por um conjunto de elementos de treliça e elementos de mola. Elementos tridimensionais de treliça “*Link 8*” (elementos de treliça lineares com resistência a forças normais de tração e compressão) foram utilizados para transmitir os esforços horizontais e elementos tridimensionais de cabo “*Link 10*” (elementos de treliça não-lineares e resistentes apenas à tração) foram usados para evitar a separação vertical entre a laje e o perfil de aço. A rigidez dos conectores foi considerada através de elementos não-lineares de mola “*Combin 39*”, cuja a relação “força-deslocamento” considerada foi a obtida experimentalmente para os conectores em estudo, presente na Fig. 4.

O atrito na interface entre perfil de aço e a laje foi considerado com a utilização de elementos de contato “*Contac 12*”. Tal elemento representa duas superfícies que podem sofrer deslocamento relativo e suporta forças de compressão na direção normal ao plano de deslocamento. A força tangencial (atrito) é proporcional à carga normal atuante no elemento.

A laje de concreto foi modelada de duas formas distintas: na primeira utilizaram-se elementos de casca “*Shell 181*” e na segunda utilizaram-se elementos sólidos tridimensionais “*Solid 65*”. Em ambos os casos adotaram-se uma curva tensão-deformação multilinear. A

diferença entre as modelagens consistiu na degradação do concreto, sendo que no primeiro modelo se considerou o critério de escoamento de Von Mises e no segundo o critério de falha de William & Warnke, considerando a fissuração da região da laje para tensões de tração.

Na laje modelada em elementos de casca não foram consideradas as armaduras presentes no concreto, já no modelo com a laje modelada em elementos sólidos, as armaduras transversais foram consideradas através de uma taxa de armadura distribuída, enquanto que as armaduras longitudinais foram modeladas através de elementos de treliça posicionados conforme o modelo experimental. Em ambos os casos adotaram-se critério de escoamento de Von Mises, relação tensão-deformação multilinear e encruamento isotrópico para as armaduras.

Na solução do sistema de equações, as etapas de carga incremental variaram na faixa entre 0,01 e 0,015% da carga máxima.

A Fig. 7 apresenta como os elementos na interface aço - concreto são dispostos no modelo numérico desenvolvido.

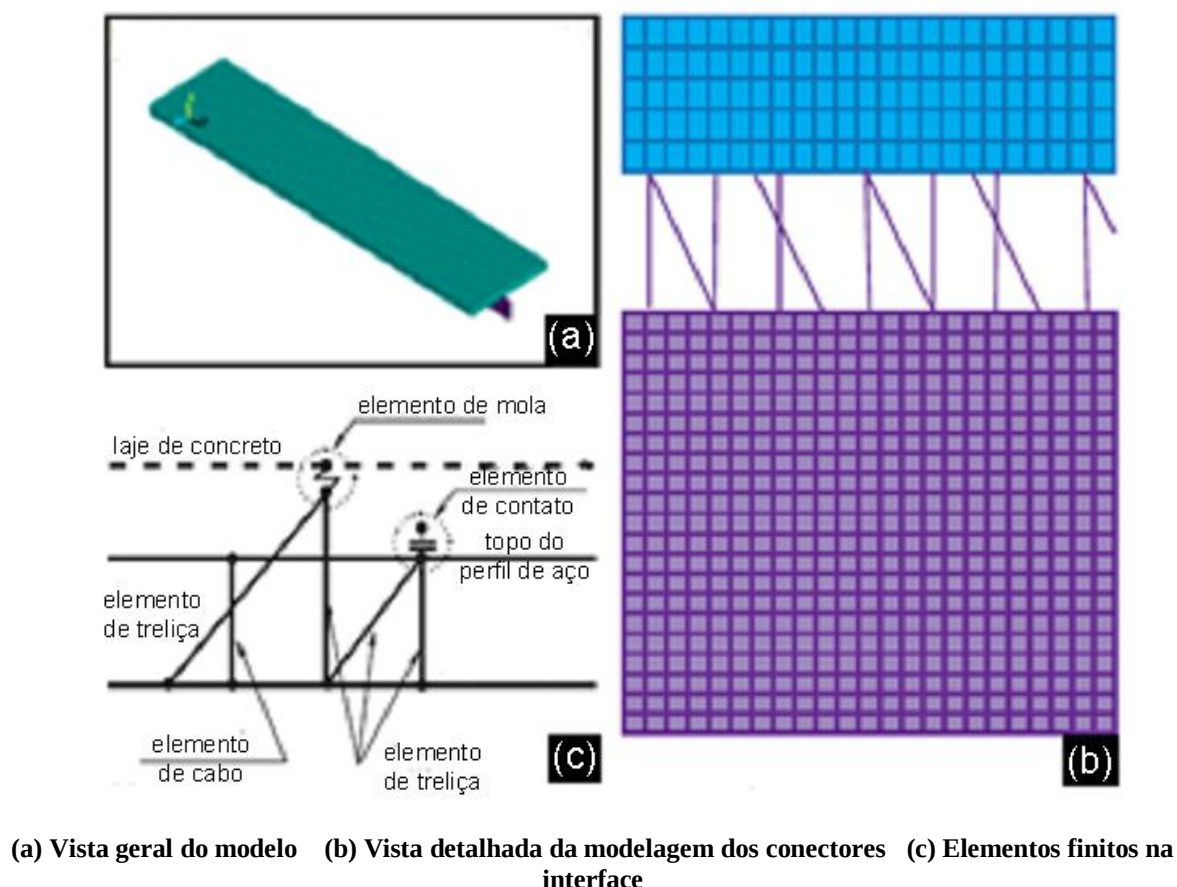


Figura 7. Elementos finitos utilizados para simular os elementos na interface aço-concreto.

4 RESULTADOS

Os exemplares das séries VM-CA e VM-SA testados no laboratório foram simulados numericamente com os modelos descritos no Item 3. Para compatibilizar os modelos

numéricos ao modelo experimental, a seção transversal ensaiada (caixão em perfil formado a frio) foi transformada em um perfil I equivalente, mantendo a espessura da mesa superior em conformidade com a espessura da chapa utilizada no experimento. Já a curva força-deslocamento dos conectores de cisalhamento determinada através dos resultados experimentais sofreu um ajuste para considerar o menor número de conectores presentes no modelo numérico (17 conectores nas análises numéricas contra 22 conectores nas vigas ensaiadas).

As Figs. 8 e 9 mostram a comparação entre os resultados experimentais dos ensaios com e sem a influência do atrito, em comparação com os resultados numéricos obtidos a partir dos modelos desenvolvidos.

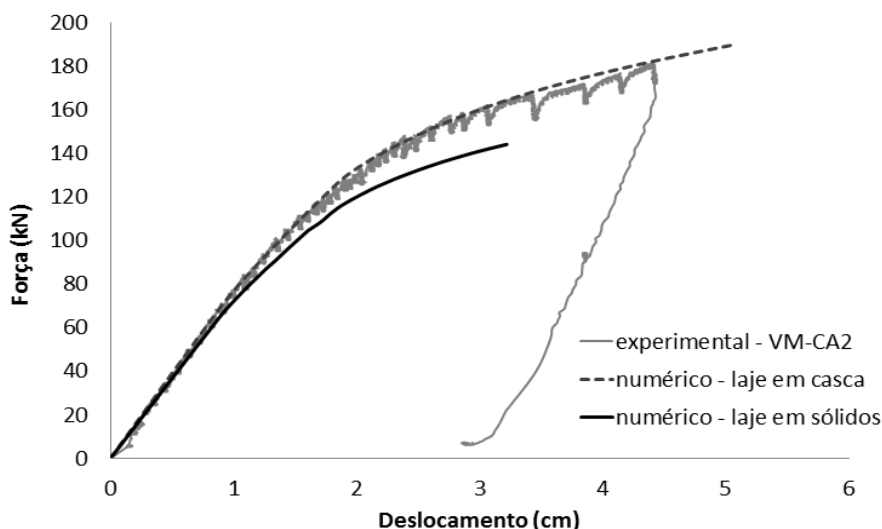


Figura 8. Comparação entre os resultados numéricos e experimentais com atrito.

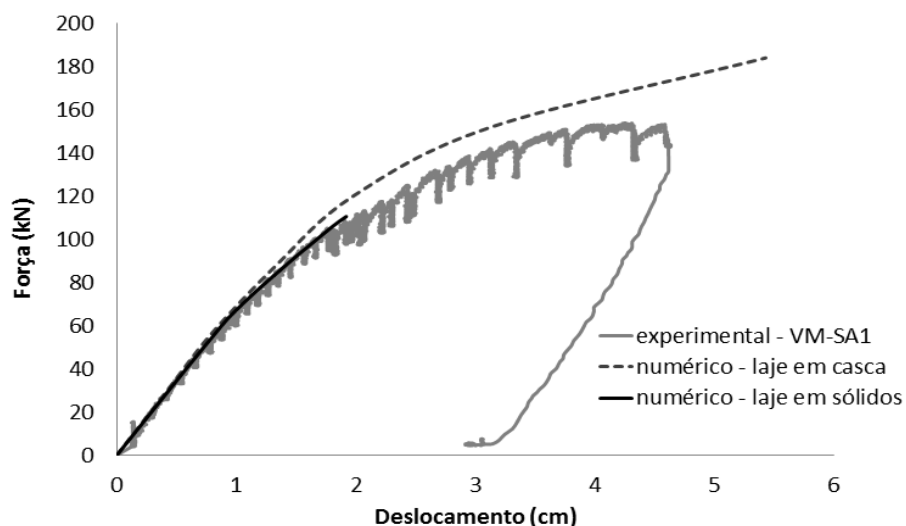


Figura 9. Comparação entre os resultados numéricos e experimentais sem atrito.

O modelo numérico em que a laje foi modelada com elementos de casca "Shell 181" considerando o atrito (Fig.8) apresentou uma boa correlação com os resultados experimentais.

Entretanto, neste caso, dois efeitos opostos contribuem para esse resultado: a ausência das armaduras na laje e o uso de elementos inapropriados para modelar o concreto nas regiões de tração. Por outro lado, a simulação do mesmo modelo sem atrito (Fig. 9) exibiu um comportamento mais rígido que o experimental, uma vez que esse modelo não leva em consideração a degradação da rigidez após a fissuração do concreto nas regiões tracionadas.

O modelo numérico em que a laje foi representada por elementos "Solid 65", com e sem atrito, apresentou problemas de convergência, sendo as análises interrompidas de forma precoce. No entanto, nota-se na Fig. 8 que o comportamento da viga com atrito foi bem simulado por este modelo até cerca da metade da carga de colapso; depois de atingida essa carga, o modelo numérico apresentou maior flexibilidade do que o experimental. Isso ocorreu devido a problemas na simulação do atrito uma vez que, na simulação sem a consideração do atrito (Fig. 9), o resultado obtido apresentou boa correlação com o resultado experimental.

5 CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios experimentais desenvolvidos mostraram que o atrito na interface entre a laje e o perfil de aço desempenha um papel importante no comportamento de vigas mistas curtas com conectores flexíveis. Verificou-se um aumento de até 16% na resistência última à flexão, devido ao efeito favorável gerado pelo atrito. Isso evidencia que devem ser consideradas no projeto de vigas mistas não somente a resistência última dos conectores, como também a sua rigidez, principalmente na avaliação das deflexões.

Os dois modelos numéricos desenvolvidos no ANSYS® para simular o comportamento das vigas mistas ensaiadas apresentaram boas correlações com os resultados experimentais até aproximadamente a metade da carga de colapso. Após essa carga, questões como a ausência das armaduras, o uso de elementos inapropriados para modelar o concreto nas regiões tracionadas da laje em elementos de casca e problemas na simulação do atrito na interface aço - concreto contribuíram para as diferenças encontradas.

O modelo em que a laje foi considerada em elementos sólidos "Solid 65" apresentou problemas de convergência que deverão ser melhor examinados. Uma vez calibrado, este modelo numérico pode ser usado para simular outras situações práticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro neste projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2008). *NBR 8800:2008. Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

American Institute of Steel Construction - AISC (2005). *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*, Chicago, 2005.

Bremer, C. F. *Vigas mistas em perfis formados a frio com lajes mistas e lajes moldadas sobre painéis de concreto celular*. Tese (Doutorado). Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais; 2007.

EN 1994-1-1:2004. Eurocode 4: *Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings*. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium, 2004.

Oliveira, C. G. R. *Análise teórico – experimental de vigas mistas com perfis formados a frio, considerando a flexibilidade dos conectores de cisalhamento e a influência do atrito entre o concreto e o aço do perfil*. Dissertação (Mestrado) Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais; 2009.

Queiroz, G., Pereira, S.S.R; Mata, L.A.C., Silva, M., *Influence of friction at the slab/steel profile interface and of the flexibility of shear connectors in steel – concrete composite beams*, In: Euromech Solid Mechanics Conference, 7th.Lisbon, 2009.

Queiroz, G, Rodrigues, F, Pereira, S; Pfeil, M; Oliveira, C; Mata, L. *Behavior of steel-concrete composite beams with flexible shear connectors*, In: *Proc. Stability and Ductility of Steel Structures (SSDS’Rio 2010)*, vol.1, p.863-870, Rio de Janeiro, 2010.

Queiroz, G.; Carvalho, H.; Rodrigues, F., Pfeil, M. *Estimation of friction contribution in the behavior of steel-concrete composite beams with flexible shear connectors*. Rem: Rev. Esc. Minas, 2014, vol.67, n.3, pp.253-258. ISSN 0370-4467.

Silva, C. M. *Análise numérica de vigas mistas levando em conta a flexibilidade e a ductilidade dos conectores de cisalhamento, bem como o atrito na interface entre o aço e o concreto*. Dissertação (Mestrado) Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais; 2009.