

MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO SIMPLEMENTE APOIADAS COM ÊNFASE AO ESTUDO DA INTERFACE LAJE-VIGA

Tatianne Iamin Kotinda

Aluna de Mestrado do Depto. de Engenharia de Estruturas da EESC-USP,
Av. Trabalhador São-carlense, 400, CEP 13566-590, São Carlos, SP, e-mail: kotinda@sc.usp.br

Jorge Munaiar Neto

Maximiliano Malite

Professor do Depto. de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, Av. Trabalhador
São-carlense, 400, CEP 13566-590, São Carlos, SP,
e-mails: munaiar@sc.usp.br; mamalite@sc.usp.br

Resumo

As vigas mistas aço-concreto proporcionam melhor aproveitamento das características de cada material constituinte. Entretanto, para que se comporte como um elemento misto é necessário um trabalho conjunto entre laje e viga, razão pela qual são utilizados elementos metálicos denominados conectores de cisalhamento, que visam a restringir o escorregamento longitudinal e a separação vertical na interface. Tendo em vista os aspectos mencionados, são apresentados neste trabalho modelos numéricos tridimensionais de vigas mistas, a fim de simular o seu comportamento estrutural, principalmente no que se refere à interface entre viga de aço e laje de concreto. Os modelos são constituídos por vigas mistas simplesmente apoiadas com laje de faces planas e conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça. As simulações foram realizadas por meio do código de cálculo ANSYS versão 8.0, que tem por base o Método dos Elementos Finitos. Os resultados obtidos foram comparados com valores experimentais de trabalhos apresentados por outros pesquisadores.

Palavras-chave: estruturas de aço, estruturas mistas aço-concreto, vigas mistas aço-concreto, análise numérica.

Introdução

Segundo Viest (1960), as primeiras vigas mistas estudadas eram constituídas por perfil de aço embutido no concreto, cuja interação se dava pela força de adesão natural entre ambos os materiais. Gradualmente, este sistema foi sendo substituído por laje de concreto apoiada sobre a mesa superior da viga de aço, de modo que estudos relacionados à conexão mecânica entre os dois materiais foram se tornando mais freqüentes.

Na década de 1960, predominaram os trabalhos de caráter experimental. Com o desenvolvimento dos microcomputadores, trabalhos com vistas a análises numéricas se tornaram mais freqüentes, geralmente caracterizados pelo uso de elementos finitos especialmente desenvolvidos para a simulação do comportamento das vigas mistas aço-concreto. Atualmente percebe-se um direcionamento para o uso de elementos finitos preestabelecidos, disponibilizados em pacotes comerciais.

Em geral, os trabalhos nesse tema têm utilizado uma estratégia de modelagem na qual a ligação entre laje e viga é realizada por meio de elementos do tipo mola. Essa estratégia, apesar de representar bem o comportamento global da viga mista, impossibilita análises localizadas, além de tornar necessário o conhecimento prévio da relação entre força no conector e deslizamento relativo na interface entre laje de concreto e viga de aço, obtida experimentalmente por meio de ensaios do tipo *push-out*.

Tendo em vista os aspectos mencionados, o trabalho em questão teve por objetivo desenvolver uma estratégia de modelagem que permita simular de forma satisfatória o comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto, com vistas principalmente à representação da interface laje-viga.

Para tanto utilizou-se o pacote comercial ANSYS versão 8.0, que tem por base o método dos elementos finitos. Optou-se pela utilização de elementos de viga

para representação dos conectores de cisalhamento, dispensando assim o uso de parâmetros obtidos experimentalmente e possibilitando a análise de aspectos localizados, como a transferência de esforços na interface.

Foram modeladas vigas mistas simplesmente apoiadas, constituídas por laje de faces planas, com conectores do tipo pino com cabeça, submetidas tanto à carga concentrada quanto uniformemente distribuída. A análise experimental dessas vigas é apresentada em Chapman & Balakrishnan (1964), e tais resultados foram utilizados como base para validação dos modelos numéricos desenvolvidos no presente trabalho.

Comportamento da Interface

A Figura 1, adaptada de Oehlers & Bradford (1995), ilustra a configuração deformada de uma viga mista aço-concreto simplesmente apoiada sob o efeito de cargas gravitacionais.

Nota-se que a fibra de concreto adjacente à interface aço-concreto tende a se expandir, enquanto a fibra de aço adjacente à mesma interface tende a se contrair. Essa deformação relativa faz com que os conectores se deformem, aplicando uma força sobre o concreto em direção ao meio do vão.

A ação do conector sobre a laje de concreto é ilustrada em detalhes na Figura 2, adaptada de Oehlers & Bradford (1995). Conforme mencionado nessa referência, a ação do conector de cisalhamento gera uma zona de concreto comprimido, confinado pela viga de aço, pelo conector de cisalhamento e pelo concreto circundante.

A força resultante na região de confinamento equilibra a força imposta pelo movimento relativo entre laje e viga, conforme ilustrado na Figura 3. A fim de manter o equilíbrio rotacional, surge ainda um momento na base do conector, já que o pino pode ser considerado engastado na mesa do perfil metálico. O conector fica então submetido a esforços de cisalhamento e de flexão, gerando uma possível zona de falha na ligação entre o pino e a mesa do perfil.

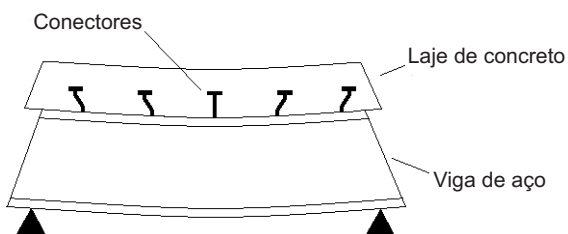


Figura 1 Configuração deformada de uma viga mista simplesmente apoiada sob ação de cargas gravitacionais.

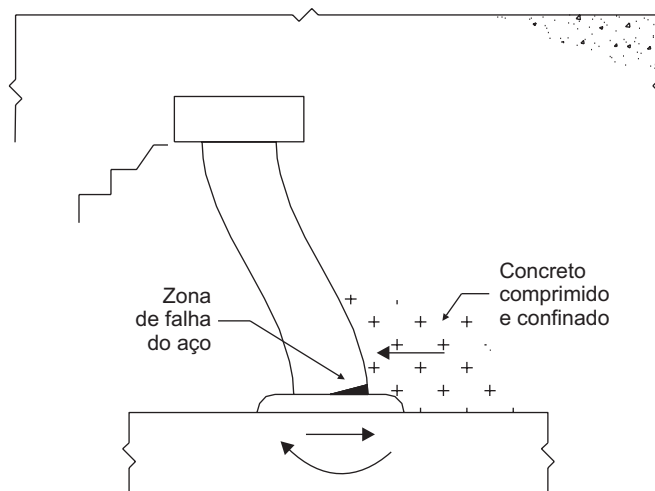


Figura 2 Ação do conector de cisalhamento tipo pino com cabeça.

Aspectos Referentes à Modelagem Numérica
Elementos finitos utilizados

Os modelos numéricos desenvolvidos foram elaborados com base em elementos predefinidos, da biblioteca interna do ANSYS v8.0, os quais serão apresentados a seguir. A escolha dos elementos foi feita levando-se em consideração aspectos como número de graus de liberdade, esforço computacional e, principalmente, representatividade do comportamento a ser simulado.

Solid65 (Figura 3a): foi utilizado na discretização da laje de concreto. Possui oito nós, cada um com três graus de liberdade, sendo eles translações segundo os eixos x, y e z. As armaduras podem ser incluídas sob a forma de taxas, orientadas segundo os ângulos ϕ e θ . Tanto o elemento em si quanto a armadura permitem a consideração da não linearidade dos materiais.

Shell43 (Figura 3b): foi utilizado para discretizar o perfil de aço. Trata-se de um elemento plano, com quatro

nós e seis graus de liberdade por nó, três translações e três rotações. Permite a consideração de não-linearidade do material, além de outras características não utilizadas nesta análise.

Beam189 (Figura 3c): foi utilizado na modelagem dos conectores de cisalhamento. Trata-se de um elemento de viga, com três nós (I, J e K) e seis graus de liberdade por nó, o que inclui as translações e as rotações. O elemento responde a esforços de flexão, possibilita a consideração da não linearidade do material e permite configurar a forma da seção transversal, no caso circular.

Conta173 e *targe170* (Figura 3d): foram utilizados para representar o contato existente na interface entre laje de concreto e viga de aço. Utilizados em análises tridimensionais com contato do tipo superfície-superfície, são capazes de simular a existência de pressão entre os elementos quando há contato, e a separação entre os mesmos quando não há contato. Permitem a consideração de atrito e coesão (adesão) entre as partes.

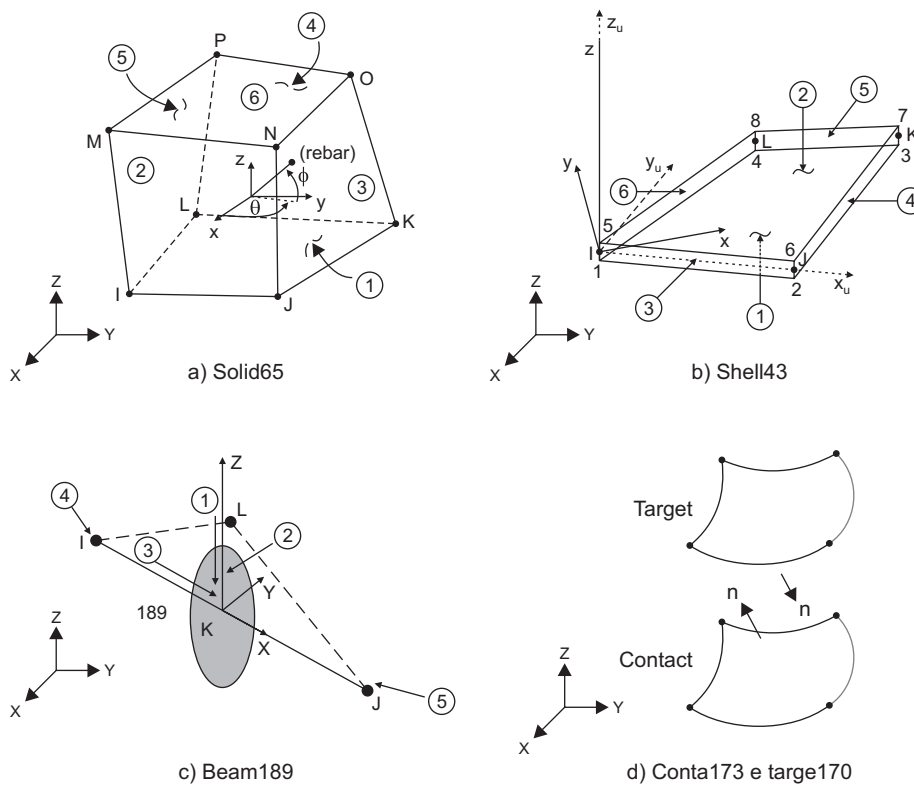


Figura 3 Elementos finitos utilizados na modelagem numérica.

Definição da malha de elementos finitos

Os modelos desenvolvidos são constituídos por quatro conjuntos de elementos, sendo eles a laje de concreto, a viga de aço, os conectores de cisalhamento e o par de contato na interface laje-viga (Figura 4).

No grupo referente à laje de concreto, estão incluídas armaduras, inseridas sob a forma de taxa nos elementos pertencentes às faces inferior e superior da laje.

Cada conjunto foi discretizado separadamente, porém de forma a coincidir os nós de cada um na interface entre eles, possibilitando o acoplamento entre tais conjuntos, realizado por meio desses nós. A fim de reduzir o número de elementos e, conseqüentemente, o esforço computacional, fez-se uso da simetria, modelando-se apenas a metade correspondente ao lado esquerdo da viga.

Acoplamentos e vinculações

Os grupos de elementos finitos, como já mencionado, foram acoplados entre si por meio dos nós coincidentes, de acordo com a Figura 5 e os procedimentos descritos a seguir:

Perfil/Conectores: o nó da base de cada conector foi acoplado ao nó correspondente da mesa superior do perfil, compatibilizando-se todos os graus de liberdade (rotações e translações), caracterizando o engastamento do pino.

Laje/Conectores: por meio dos nós (exceto o da base do conector, já acoplado ao perfil), foram compatibilizadas as translações referentes aos eixos x e

z. Adicionalmente, o nó logo abaixo da cabeça do pino foi acoplado segundo a direção y, a fim de representar a ancoragem mecânica.

Perfil/Laje: o contato entre laje e viga foi estabelecido por meio dos elementos *conta173* e *targe170*, possibilitando o surgimento de tensões de compressão quando existe contato, a separação entre elementos e ainda a consideração do atrito e aderência entre aço e concreto.

A condição de simetria, disponibilizada pelo ANSYS, foi aplicada aos nós pertencentes à seção central da viga mista, segundo o plano que contém essa mesma seção, detalhe (a) da Figura 6. Nos nós correspondentes ao apoio foram restringidos todos os graus de liberdade exceto a translação em x e a rotação em z, com vistas a reproduzir um apoio móvel, detalhe (b) da Figura 6.

Aplicação do carregamento

A simulação numérica foi dividida em duas etapas. Na primeira, foi considerado apenas o peso próprio da estrutura, definindo para tanto um valor para o peso específico de cada material (Tabela 1) e impondo uma ação gravitacional. Na segunda etapa foi aplicada a carga externa, concentrada no meio do vão ou uniformemente distribuída entre apoios, dependendo do modelo. Em ambos os casos a carga foi aplicada por meio de forças nos nós da face superior da laje de concreto, conforme ilustrado na Figura 7.

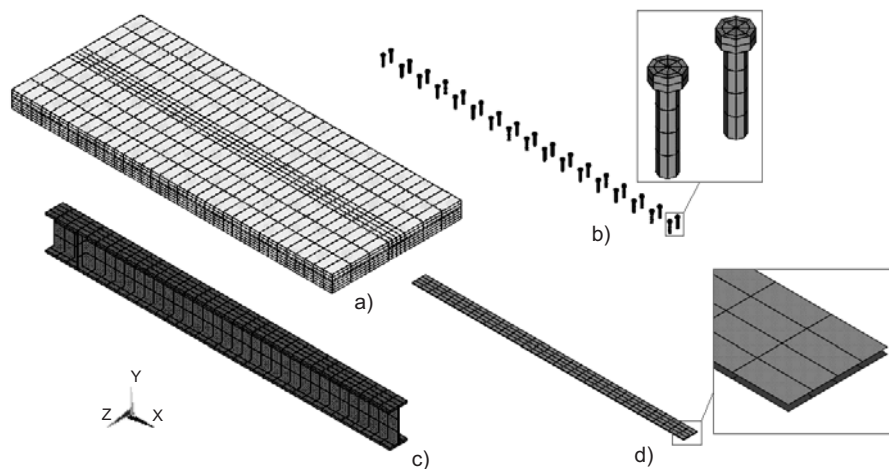


Figura 4 Grupos de elementos finitos (metade simétrica simulada): (a) laje de concreto, (b) conectores de cisalhamento, (c) viga de aço e (d) par de contato.

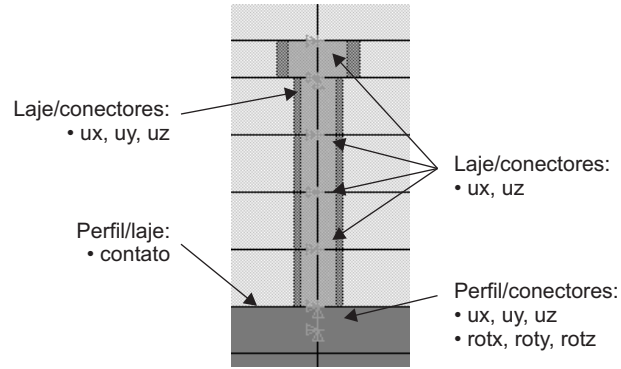


Figura 5 Acoplamento entre grupos de elementos.

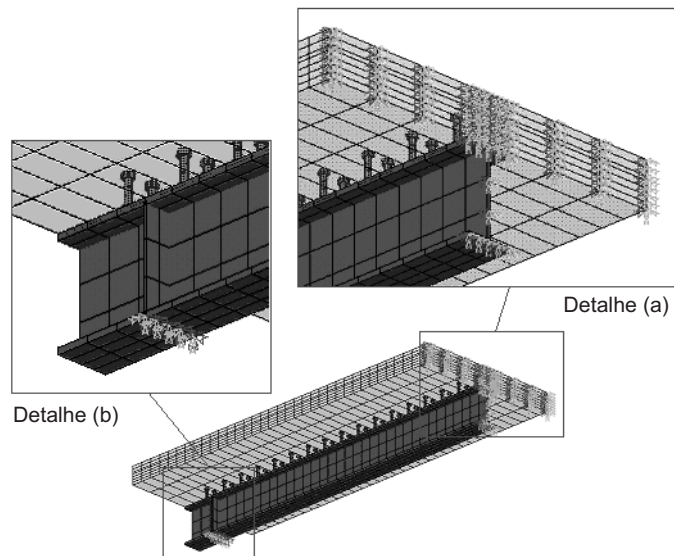


Figura 6 Vinculações: Detalhe (a) simetria e Detalhe (b) apoio móvel.

Tabela 1 Peso específico dos materiais.

Material	Concreto	Aço do perfil	Aço dos conectores	Aço da armadura
Peso específico (kN/m³)	24	77	77	77

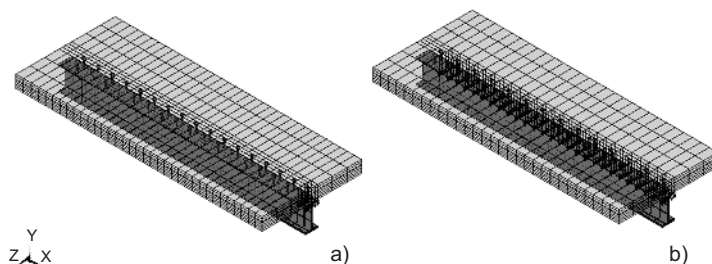


Figura 7 Carregamentos aplicados: (a) carga concentrada no meio do vão e (b) carga uniformemente distribuída entre apoios.

Relações constitutivas utilizadas

Perfil de aço: foi adotado um modelo constitutivo elasto-plástico multilinear com encruamento isótropo e critério de plastificação de von Mises. A curva tensão-deformação adotada, conforme Gattesco (1999), possui comportamento elástico-linear até a tensão de escoamento (f_y), perfeitamente plástico entre o limite de deformação elástica (ϵ_y) e a deformação de início de encruamento (ϵ_h) e finalmente, descrito pela equação 1, até a tensão de ruptura (f_u), com $E_h = 350 \text{ kN/cm}^2$ (Figura 8a).

$$\sigma = f_y + E_h (\epsilon - \epsilon_h) \left(1 - E_h \frac{\epsilon - \epsilon_h}{4(f_u - f_y)} \right) \quad (1)$$

Conectores de cisalhamento: adotou-se um modelo bilinear com encruamento isótropo, com base no critério de von Mises, conforme esquematiza a Figura 8b.

Aço da armadura: utilizou-se novamente o critério de von Mises, com curva tensão-deformação com base em um modelo elasto-plástico perfeito, conforme esquematiza a Figura 8c. Cabe mencionar que, a fim de evitar problemas numéricos, foi considerada uma pequena inclinação ($E/1000$) para o segundo trecho da curva da Figura 8c.

Concreto no referente à tração: foi representado por meio do *modelo concrete* do ANSYS, que tem por base o modelo de Willan-Warnke e permite simular a fissuração do concreto quando submetido a tensões de tração.

Concreto no referente à compressão: admitiu-se o critério de plastificação de von Mises para o concreto sob compressão. O modelo constitutivo adotado foi do tipo multilinear com encruamento isótropo, e a curva tensão-deformação utilizada, conforme Figura 8d, foi extraída do Eurocode 2 (2002 draft of prEN 1992-1-1). A fim de

evitar problemas numéricos, foi considerada uma pequena inclinação de $E_{cm}/1000$, analogamente ao que foi feito para o aço da armadura.

Modelos Estudados e Resultados Obtidos

Foram construídos e simulados 11 modelos numéricos de vigas mistas aço-concreto, cujos resultados foram comparados com aqueles experimentais descritos em Chapman & Balakrishnan (1964).

Serão aqui apresentados dois desses modelos. O primeiro, denominado A3, refere-se a uma viga mista com carregamento concentrado no meio do vão. Já o segundo, denominado U3, trata-se de uma viga mista com carregamento uniformemente distribuído entre apoios.

Na Tabela 3 são especificadas as características de cada viga mista, enquanto na Figura 9 são apresentadas dimensões referentes aos modelos numéricos.

Os gráficos da Figura 10 retratam a evolução do deslocamento vertical no meio do vão em função da aplicação do carregamento para cada viga mista simulada. São apresentados, além dos resultados numéricos e experimentais, os valores da força correspondente ao momento resistente de cada viga mista, calculado segundo a NBR 8800:2003 (texto de revisão da NBR 8800:1986).

Por meio da Figura 10, nota-se que as curvas numéricas recuperaram de forma satisfatória o comportamento das vigas mistas durante o deslocamento vertical no meio do vão, ajustando-se bem às curvas experimentais no trecho inicial e mantendo uma diferença aqui considerada aceitável ao longo do trecho não linear.

Quanto ao escorregamento relativo entre laje e viga, os modelos também se mostraram suficientemente adequados. A Figura 11 ilustra a média desses valores na extremidade da viga A5, enquanto a Figura 12 apresenta a variação do mesmo ao longo do comprimento da viga U3.

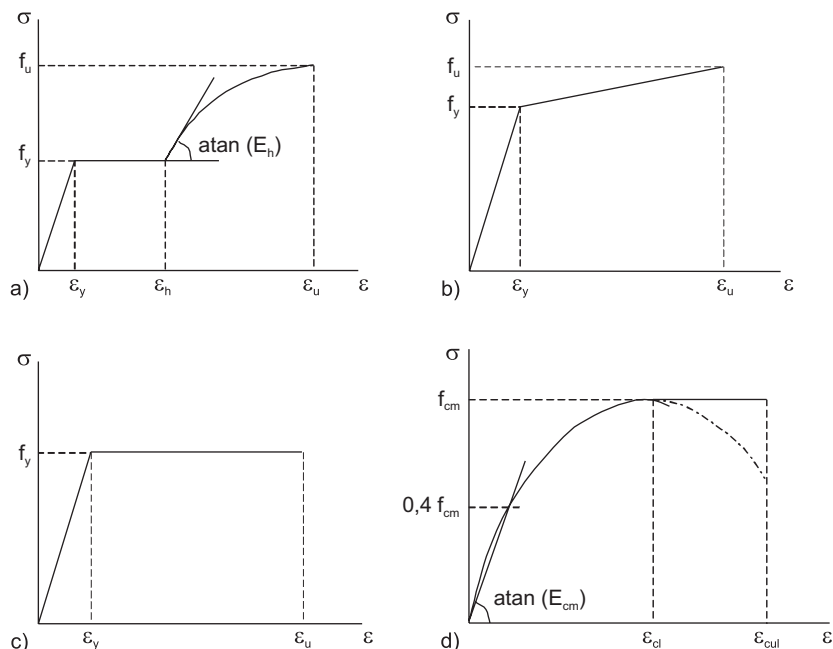


Figura 8 Diagrama tensão-deformação para: (a) aço do perfil, (b) aço dos conectores, (c) aço da armadura e (d) concreto comprimido.

Nota-se, por meio da Figura 11, que o modelo numérico foi capaz de representar a adesão existente na interface, cuja ação impede a ocorrência de deslizamento até um dado nível de carregamento, a partir do qual a adesão é rompida.

Em relação à Figura 12, percebe-se uma variação no valor do escorregamento relativo de nós subsequentes, devido à ação dos conectores de cisalhamento, provavelmente. Os resultados numéricos e os experimentais apresentam certa correspondência quanto à evolução de seus valores, divergindo apenas no nó correspondente à extremidade da viga, talvez devido a uma diferença entre modelos numérico e experimental em relação à posição do último conector.

A Figura 13 ilustra a distribuição de tensões normais à seção transversal pertencente ao meio do vão da viga mista A5 para um nível de carregamento igual a 392 kN. Nota-se, para este nível de carregamento, a plastificação quase total da seção mista, o que confirma o procedimento de cálculo recomendado pela NBR 8800:2003 (texto base de revisão), o qual utiliza distribuição plástica da seção transversal para vigas com alma compacta, como é o caso da viga A5.

A Figura 14 ilustra a variação das tensões longitudinais (direção x) nos elementos de concreto adjacentes aos dois

conectores mais solicitados da viga A5. É possível perceber o surgimento da zona de concreto comprimido adjacente à face dos conectores voltada para o vão central da viga mista (sentido de x), conforme ilustrado na Figura 3.

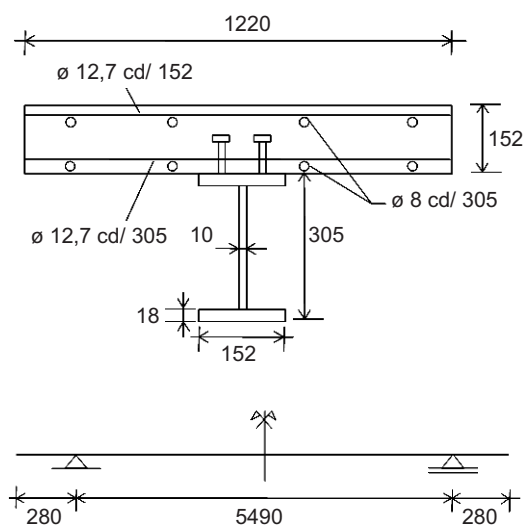
Experimentalmente, como descrito em Chapman & Balakrishnan (1964), o modo de falha das vigas mistas analisadas no presente trabalho foi por esmagamento da laje de concreto. Nos modelos numéricos, entretanto, não foi (e não é) possível identificar o modo de falha das vigas mistas.

Porém, tendo em vista que a estratégia de modelagem adotada considera o critério de plastificação de von Mises para o concreto na compressão, pode-se utilizar as tensões equivalentes de von Mises como indicativo da ruptura da laje por compressão excessiva. A Figura 15 ilustra essas mesmas tensões equivalentes na laje de concreto das vigas mistas A3 e U3, referente ao último passo de carga alcançado.

Nota-se, por meio da Figura 15, que as tensões equivalentes na face superior da laje de concreto ultrapassam a resistência média à compressão do concreto (f_{cm}), o que permite considerar provável ruptura da laje por compressão excessiva, em concordância com as informações referentes aos ensaios realizados e descritos em Chapman & Balakrishnan (1964).

Tabela 3 Características das vigas mistas e propriedades dos materiais.

Viga	A3	U3
Carregamento	Conc.	Uniform.
N ^o conectores	68	56
Diâmetro (mm)	19	19
Altura (mm)	102	102
Concreto (kN/cm²)		
f_{cm}	1,84	2,99
E_{cm}	2642	3055
Alma (kN/cm²)		
E	19456	20064
f_y	30,2	23,0
f_u	44,4	41,5
ϵ_h/ϵ_y	1,0	8,2
Mesas (kN/cm²)		
E	20064	19912
f_y	25,2	23,2
f_u	44,7	42,0
ϵ_h/ϵ_y	1,0	5,2
Conectores (kN/cm²)		
E	20500	20500
f_y	51,4	51,4
f_u	42,1	42,1
Armadura (kN/cm²)		
E	20500	20500
f_u	32	32

**Figura 9** Dimensões (em mm) utilizadas nos modelos numéricos.

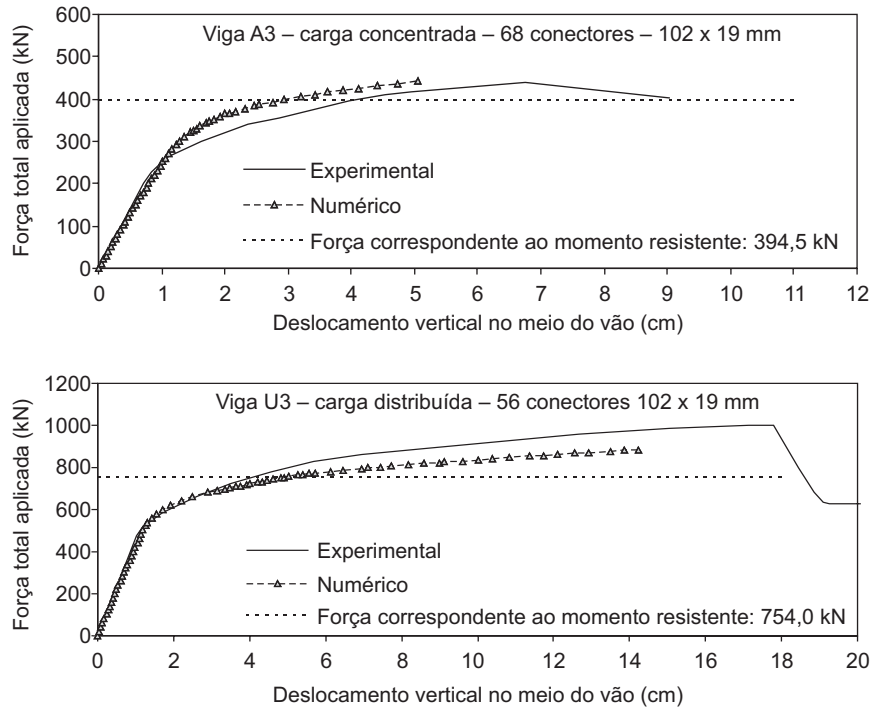


Figura 10 Gráficos “Força × Deslocamento vertical no meio do vão” para as vigas A5 e U3.

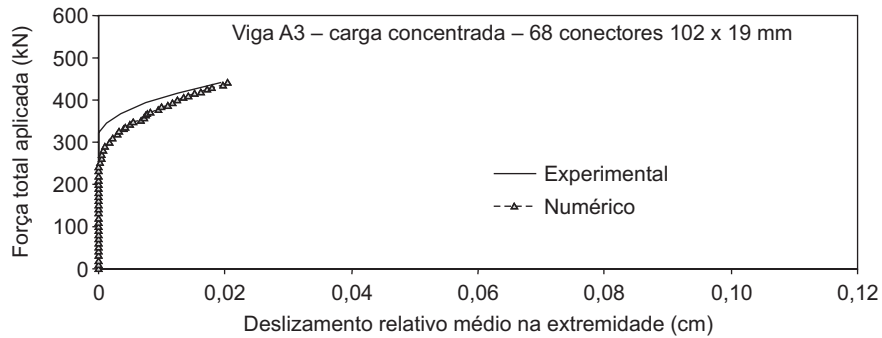


Figura 11 Gráficos “Força × Deslizamento relativo médio na extremidade” para a viga A5.

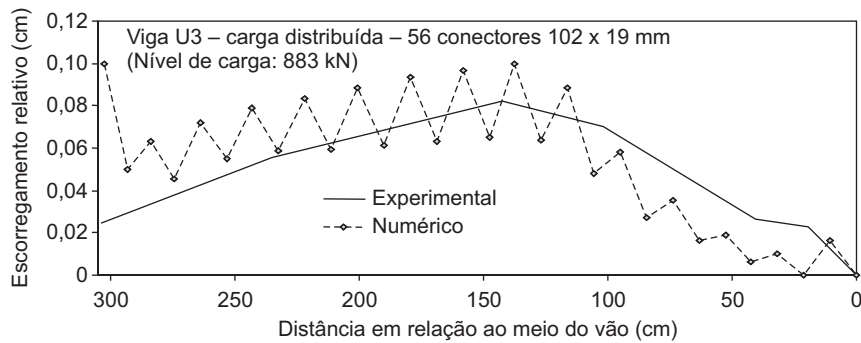


Figura 12 Variação do escorregamento relativo na interface ao longo da viga U3.

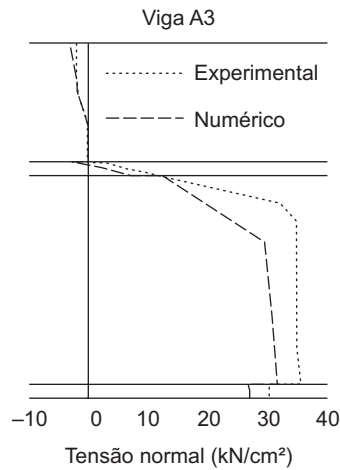


Figura 13 Tensões normais à seção transversal do meio do vão da viga mista A5 para um nível de carregamento de 392 kN.

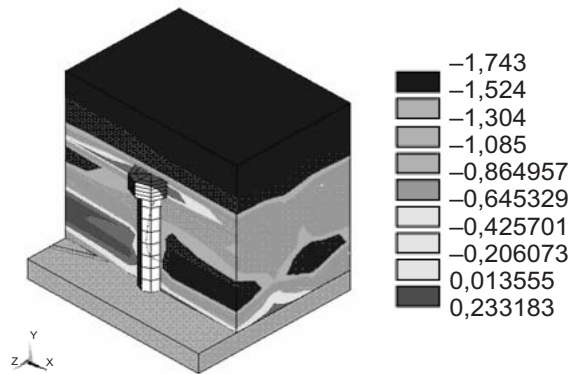


Figura 14 Ação dos conectores de cisalhamento sobre a laje de concreto no modelo numérico, viga A5.

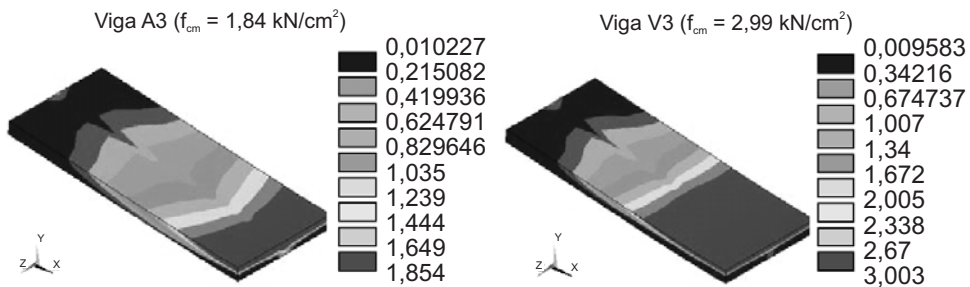


Figura 15 Tensões de von Mises para o último passo de carga alcançado em cada viga.

Conclusões

O presente trabalho teve como proposta desenvolver uma estratégia de modelagem numérica para simulação do comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas, com vistas principalmente à representação da interface laje-viga.

A representação dos conectores de cisalhamento por meio de elementos de viga proporcionou uma modelagem mais simples em relação àquelas em que são utilizados elementos do tipo sólido, os quais geralmente conduzem a uma malha bastante refinada e, conseqüentemente, um elevado esforço computacional. Esse mesmo caminho permite também evitar a utilização de elementos finitos do tipo mola, os quais necessitam, para fins de utilização no programa, de parâmetros experimentais.

A associação do *modelo concrete* para o concreto sob tração com o critério de von Mises para compressão mostrou-se eficaz, permitindo aos modelos numéricos alcançarem níveis de carga próximos aos identificados como de ruptura nos ensaios.

Os resultados obtidos nos modelos numéricos (deslocamento vertical no meio do vão e escorregamento relativo entre laje de concreto e viga de aço) foram considerados satisfatórios quando comparados aos experimentais.

A estratégia de modelagem adotada, com a representação dos conectores por elementos de viga (e não por molas) e uso de elementos sólidos na laje, possibilitou a visualização da concentração de tensões na região de transferência de esforços entre os elementos em questão, com configuração semelhante ao descrito nas referências estudadas.

Tendo em vista os aspectos mencionados, a estratégia de modelagem desenvolvida foi considerada adequada em relação ao objetivo inicial estabelecido para simulação do comportamento de vigas mistas aço-concreto, possibilitando a análise de aspectos tanto globais como localizados.

Referências Bibliográficas

ANSYS Versão 8.0 Documentation. ANSYS, Inc.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800*: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios. 2003 (texto base de revisão).

CHAPMAN, J. C.; BALAKRISHNAN, S. Experiments on composite beams. *The Structural Engineer*, v. 42, n. 11, p. 369-383, 1964.

EUROCODE 2. *Draft of prEN 1992-1-1*. Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. 2002.

GATTESCO, N. Analytical modeling of nonlinear behavior of composite beams with deformable connection. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 52, p. 195-218, 1999.

OEHLERS, D. J.; BRADFORD, M. A. *Composite steel and concrete structural members*. 1. ed. New York: Elsevier Science Ltd., 1995.

VIEST, I. Review of research on composite steel – concrete beams. *Journal of the Structural Division – ASCE, Proc.*, v. 86, ST6, p. 1-21, 1960.