

Numerical modeling of steel-concrete composite beams

Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto



L. R. MARCONCIN ^a
liliane.m@ufpr.br

R. D. MACHADO ^b
rdm@ufpr.br

M. A. MARINO ^c
marino@ufpr.br

Abstract

The use of composite structures is increasingly present in the constructions of Civil Engineering. Steel-concrete composite beams, in particular, are structures consisting of two materials, a profile metal, located in predominantly region of tension, and a section of concrete, located predominantly in compressed region, connected by metallic devices called shear connectors. The main functions of the connectors are: allow the joint work of slab-beam, restrict the longitudinal slipping and uplifting at the interface of the elements, and absorb shear forces. In this context, this work presents three-dimensional numerical models of composite steel-concrete beams, in order to simulate their structural behavior, with emphasis at the slab-beam interface. Simulations had been carried out by means of the ANSYS software, version 10.0, based on Finite Element Method. Results were compared with those provided by Standard Codes and with references found in the literature. Reported results demonstrate that the numerical approach is a valid tool to analyze the behavior of steel-concrete composite beams.

Keywords: composite beams, shear connectors, numerical modeling, finite element (EF).

Resumo

A utilização de estruturas mistas está cada vez mais presente nas obras de Engenharia Civil. As vigas mistas, em particular, são estruturas compostas por dois materiais, um perfil metálico, situado em região predominantemente tração, e uma seção de concreto, situada em região predominantemente comprimida, ligados entre si através de dispositivos metálicos denominados de conectores de cisalhamento. As funções principais dos conectores são: permitir o trabalho solidário da laje-viga, restringir o escorregamento longitudinal e o deslocamento vertical na interface dos elementos e, absorver forças de cisalhamento. Nesse contexto, apresentam-se neste trabalho, modelos numéricos tridimensionais de vigas mistas aço-concreto, com a finalidade de simular o seu comportamento estrutural, enfatizando a interface laje-viga. As simulações foram feitas através do software ANSYS versão 10.0, que tem como base o Método de Elementos Finitos. Os resultados obtidos foram comparados com os previstos por norma e com referências encontradas na revisão bibliográfica, verificando-se que a modelagem numérica é uma ferramenta válida para a análise de vigas mistas aço-concreto.

Palavras-chave: vigas mistas, conectores de cisalhamento, modelagem numérica, elementos finitos (EF).

^a L. R. MARCONCIN. Universidade Federal do Paraná, Centro de Estudos de Engenharia Civil. liliane.m@ufpr.br. Prof. Inaldo Ayres Vieira - Centro Politécnico. Jardim das Américas. Caixa Postal 19.011 – CEP: 81.531-980 – Curitiba, PR;

^b R. D. MACHADO. Universidade Federal do Paraná, Centro de Estudos de Engenharia Civil. rdm@ufpr.br. Prof. Inaldo Ayres Vieira - Centro Politécnico. Jardim das Américas. Caixa Postal 19.011 – CEP: 81.531-980 – Curitiba, PR;

^c M. A. MARINO. Universidade Federal do Paraná, Centro de Estudos de Engenharia Civil. marino@ufpr.br. Prof. Inaldo Ayres Vieira - Centro Politécnico. Jardim das Américas. Caixa Postal 19.011 – CEP: 81.531-980 – Curitiba, PR.

1. Introdução

1.1 Generalidades

Surgidos em meados do século passado, os sistemas mistos aço-concreto envolvem o trabalho solidário de elementos de concreto e perfis metálicos, cuja interação pode ser feita por meios mecânicos (conectores, mossas, ressaltos), por atrito ou por aderência. Em particular, as vigas mistas são constituídas pela associação de um perfil metálico (geralmente um perfil "I"), situado em região predominantemente tracionada, com uma laje de concreto, situada em região predominantemente comprimida, cuja ligação mecânica é feita por dispositivos metálicos denominados de conectores de cisalhamento. As principais funções dos conectores de cisalhamento são: permitir o trabalho conjunto da laje-viga [10], restringir o escorregamento longitudinal e o deslocamento vertical na interface dos elementos e, absorver forças de cisalhamento [3].

Ao associar o aço e concreto se obtém a complementação das características dos materiais [8] e, portanto, do ponto de vista da resistência dos materiais, é possível tirar grande proveito da seção de aço para resistir aos esforços de tração e do concreto para os esforços de compressão [10]. Com isso, obtêm-se elementos de elevada rigidez [10] e de menores dimensões, que conduzem a um projeto com fundações mais leves, gerando ganhos de desempenho e economia. Além disso, os sistemas mistos possibilitam a dispensa de fôrmas e escoramentos e a redução das proteções contra incêndio e corrosão do aço, pela presença e atuação do concreto no sistema.

No Brasil, os primeiros edifícios a lançar mão do sistema misto foram construídos na década de 50. Porém, nos últimos 20 anos, com o aquecimento na produção de aço [4], observado pela disponibilidade de perfis metálicos no mercado nacional, a demanda pelo sistema cresceu vertiginosamente.

Nesse contexto, o presente artigo procura estudar as vigas mistas numericamente. A idéia central deste trabalho é modelar vigas mistas através do programa computacional ANSYS [1], que tem como base o Método dos Elementos Finitos.

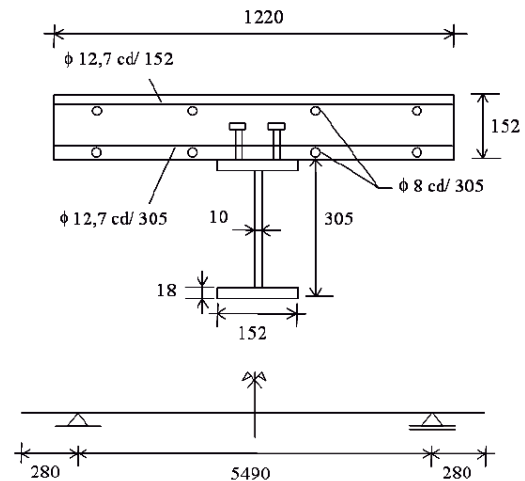
1.2 Objetivo

Este artigo tem por objetivo a simulação, através de modelagem computacional, do comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto, verificando, especificamente, a influência do número, diâmetro e altura dos conectores de cisalhamento nas vigas mistas. Estas verificações serão realizadas pela análise do deslizamento longitudinal na interface laje-viga, do deslocamento vertical no meio do vão (flecha) e da capacidade de carga das vigas mistas, cujos resultados serão comparados com os previstos por norma e com os de outras referências encontradas na revisão bibliográfica.

2. Modelagem numérica

Neste artigo foi adotado um dos modelos de viga mista, "A3", extraído de um ensaio experimental [6] e de modelagem numérica [11]. Dessa forma, o modelo simulado, cuja geração se deu a partir de um roteiro disponibilizado por pesquisadora [11], utiliza a mesma geometria, parâmetros, propriedades dos materiais e nomenclatura da viga mista, definidos nos trabalhos referenciados.

Figura 1 - Dimensões (mm) da viga mista modelada (11)



Embora a metodologia aqui aplicada seja abrangente e geral, o modelo "A3" simulado neste trabalho refere-se exclusivamente à viga mista simplesmente apoiada (Figura 1), de alma compacta (não esbelta), com interação total entre laje e perfil, dada pelo número de conectores de cisalhamento calculados para evitar escorregamento entre as superfícies, laje plana de concreto armado com armadura nas duas direções (transversal e longitudinal), conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça (stud bolt) e sujeita a uma carga externa concentrada no meio do vão. A modelagem está baseada no Método dos Elementos Finitos, também utilizado por outros pesquisadores [7], [10], [11], [14] e [15]. O modelo foi desenvolvido no programa ANSYS [1].

A modelagem numérica iniciou com a definição da geometria da viga mista (Figura 1). Depois, foram escolhidos os elementos finitos, disponíveis na biblioteca do programa ANSYS [1], para representar as peças. Em seguida, foram introduzidas as propriedades e relações constitutivas dos materiais. Posteriormente, definiu-se a malha, os acoplamentos e vinculações entre os elementos, considerando a condição de simetria e conseqüente restrição dos graus de liberdade, bem como a vinculação no apoio da viga e a carga externa.

A primeira simulação foi realizada com as características originais da viga A3, para validar o modelo. Em seguida, para analisar a influência dos conectores no comportamento estrutural de vigas mistas, foram consideradas diversas alternativas para os conectores, variando os seus diâmetros de 16 mm, 19 mm e 22 mm e alturas de 76 mm, 88 mm e 102 mm. Posteriormente, utilizou-se nas simulações o número de conectores recomendado por norma [2], cujo procedimento de cálculo está disponível em [12].

2.1 Elementos finitos

A elaboração do modelo numérico proposto se deu a partir de elementos finitos disponibilizados na biblioteca interna do ANSYS [1].

Tabela 1 - Características da viga e propriedades dos materiais

Viga Modelo A3		
Número de conectores		68
Diâmetro do corpo do conector (mm)		19
Altura total do conector (mm)		102
Carga externa		Concentrada no meio do vão
f_{cm} cilíndrico (kN/cm ²)		1,84
E_{cm} (kN/cm ²)		2.642
E (kN/cm ²)	Alma	19.456
	Mesa	20.064
f_y (kN/cm ²)	Alma	30,2
	Mesa	25,2
f_u (kN/cm ²)	Alma	44,4
	Mesa	44,7
E (kN/cm ²)		20.500
f_u (kN/cm ²)	Conectores	51,4
f_y (kN/cm ²)		42,1
E (kN/cm ²)		20.500
f_y (kN/cm ²)	Armadura	32,0

Na discretização da laje de concreto foi utilizado o elemento tridimensional SOLID 65, que é capaz de simular o comportamento à fissuração do concreto na tração (nas três direções ortogonais) e esmagamento na compressão, avaliar não linearidade física e ainda possibilitar a inclusão das barras de armadura de forma discreta ou na forma de taxas (armadura dispersa).

A representação do perfil de aço foi feita pelo elemento SHELL 43, que permite a consideração de não-linearidade do material e apresenta deformação linear no plano em que está contido.

A modelagem dos conectores de cisalhamento foi feita com o elemento BEAM 189, que permite a configuração da forma da seção transversal, possibilita a consideração da não linearidade física do material e responde aos esforços de flexão.

Os elementos TARGE 170 e CONTA 173 foram utilizados na representação do contato na interface laje-viga. Esses elementos são capazes de simular a existência de pressão entre os elementos, quando há contato, e a separação entre os mesmos elementos, quando não há contato. O par de contato ainda permite o consideração de atrito e coesão entre as partes.

2.2 Propriedades dos materiais

As características da viga A3 e propriedades dos materiais, originais, são apresentadas na Tabela 1. Cabe ressaltar que este estudo também considerou outras configurações de conectores como o número, altura e diâmetro.

2.3 Relações constitutivas

Para o aço do perfil considerou-se uma relação elasto-plástica multilinear com encruamento isotrópico, associada ao critério de plastificação de von Mises. A curva tensão-deformação segue o

modelo constitutivo apresentado em [9] e utilizado em [15] e [7], conforme ilustra a Figura 2.

O modelo adotado para o aço dos conectores é do tipo bi-linear com encruamento isotrópico, também associado ao critério de plastificação de von Mises. A Figura 3 mostra o diagrama tensão-deformação para o aço dos conectores.

A relação constitutiva para o aço da armadura segue um modelo elasto-plástico perfeito e também está associada ao critério de plastificação de von Mises, com base na relação entre as tensões uniaxiais e suas respectivas deformações plásticas equivalentes, conforme indica o diagrama de tensão-deformação apresentado na Figura 4.

Para a laje de concreto a relação constitutiva na tração segue o modelo CONCRETE, disponibilizado pelo ANSYS [1], que tem

Figura 2 - Relação constitutiva para o perfil de aço (9)

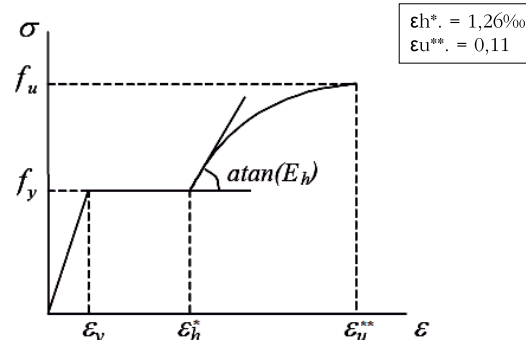


Figura 3 – Relação constitutiva para os conectores de cisalhamento (11)

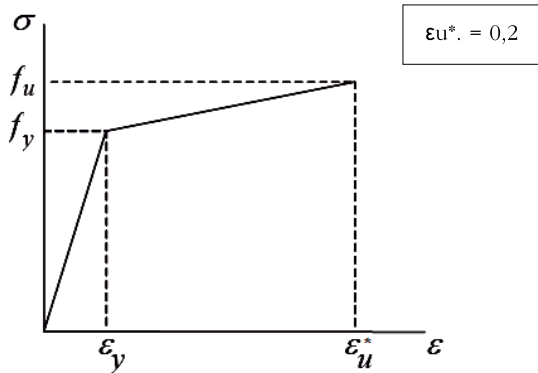


Figura 4 – Relação constitutiva para o aço da armadura (11)

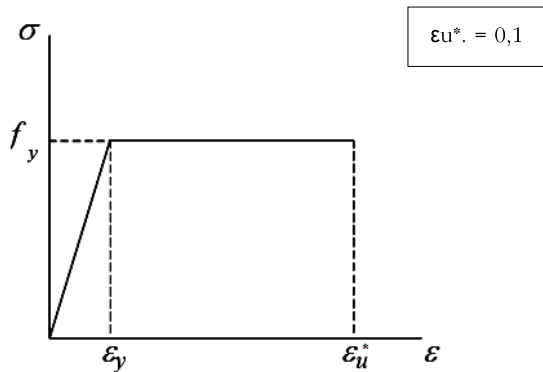
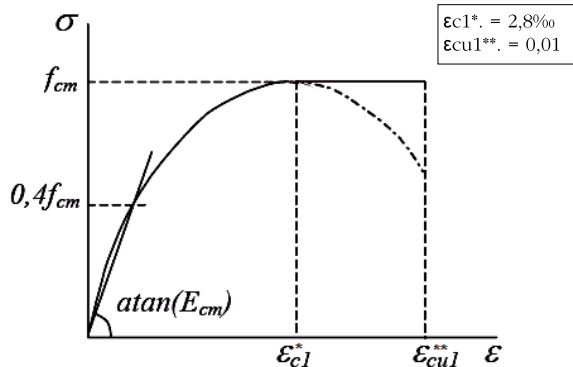


Figura 5 – Relação constitutiva para o concreto (11)



como base o modelo de Willan-Warnke e permite simular a fissuração do material. Este modelo também foi utilizado em [7] e [15]. Já, para o concreto na compressão, admitiu-se o critério de plasticificação de von Mises. O modelo que representa o comportamento do concreto, neste caso, é multilinear com encruamento isótropo, apresentado pelo diagrama de tensão-deformação na Figura 5. Na solução para o contato utilizou-se o método *Pure Lagrange Multiplier*, disponibilizado pelo ANSYS [1]. Esse método considera que não há interpenetração entre os dois materiais quando o contato está fechado e considera escorregamento nulo, enquanto não se atinge a tensão cisalhante limite [11]. Os parâmetros que definem se o contato está fechado ou aberto são estabelecidos por FTOLN, que se refere a um valor mínimo de penetração para que o contato seja considerado como fechado e por TNOP, que se refere a um valor mínimo de tração, normal à superfície de contato, para que o status se altere para aberto. O valor absoluto adotado para o FTOLN foi de -0,01 cm. Já para o TNOP adotou-se 0,18 kN/cm². Já o valor estabelecido para o coeficiente de atrito entre aço e concreto foi 0,4 e, para a coesão, foi estimado um valor de 0,18 kN/cm² a partir de valores médios de tensão de adesão correspondentes ao surgimento de escorregamento na interface. Cabe ressaltar que todos os valores adotados para os parâmetros utilizados neste trabalho estão de acordo com o trabalho de [11], para a possível validação dos resultados.

2.4 Malha de elementos finitos

O modelo construído para a análise numérica é constituído por quatro elementos que formam a laje de concreto com armaduras incluídas sob a forma de taxa, a viga de aço, os conectores de cisalhamento e o par de contato na interface laje-viga. Os elementos foram construídos separadamente, porém os nós de cada um foram acoplados na interface entre eles. A malha de elementos finitos, gerada para todos os elementos, seguiu a mesma metodologia e grau de refinamento apresentado em [11]. A Figura 6 mostra a malha de elementos finitos para os componentes citados, onde a letra (a) corresponde a laje de concreto, a (b) a viga de aço, a (c) os conectores de cisalhamento e a (d) o par de contato.

2.5 Acoplamentos e vinculações

Nos acoplamentos entre os elementos, realizados através dos nós coincidentes, todos os graus de liberdade foram compatibilizados, conforme ilustra a Figura 7. O contato laje-viga foi estabelecido pelos elementos CONTA 173, ligado a mesa do perfil e TARGE 170, ligado a face inferior da laje. A vinculação viga-conector foi considerada como um engastamento do pino no perfil metálico, ou seja, rotações e translações foram compatibilizadas. Já na interface laje-conector, compatibilizaram-se as translações referentes aos eixos x e z, no nó abaixo da cabeça do pino, considerou-se um acoplamento na direção y para a representação da ancoragem mecânica existente entre a cabeça do conector e a laje de concreto. Com objetivo de reproduzir um apoio do tipo móvel, os graus de liberdade referentes à translação em x e rotação em z não foram restringidos nos nós referentes ao apoio da viga mista. Já nos nós da seção central da viga mista foi aplicada a condição de simetria, disponibilizada pelo ANSYS [1] e conseqüente restrição dos graus

Figura 6 - Malha de elementos finitos

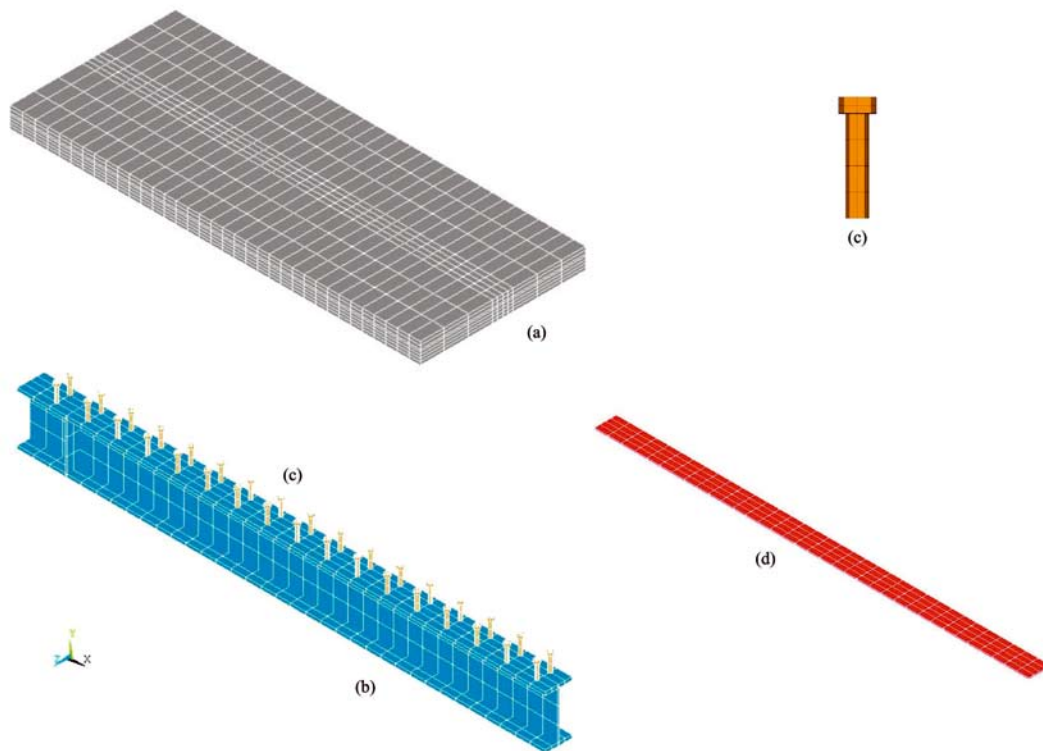


Figura 7 - Acoplamento entre os elementos

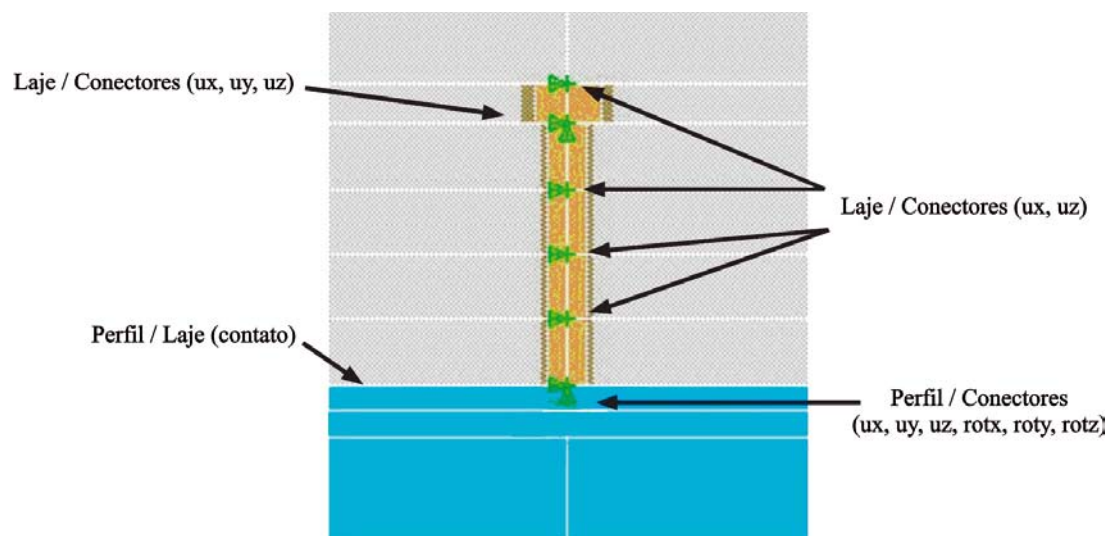


Figura 8 – Condição de simetria e vinculação no apoio

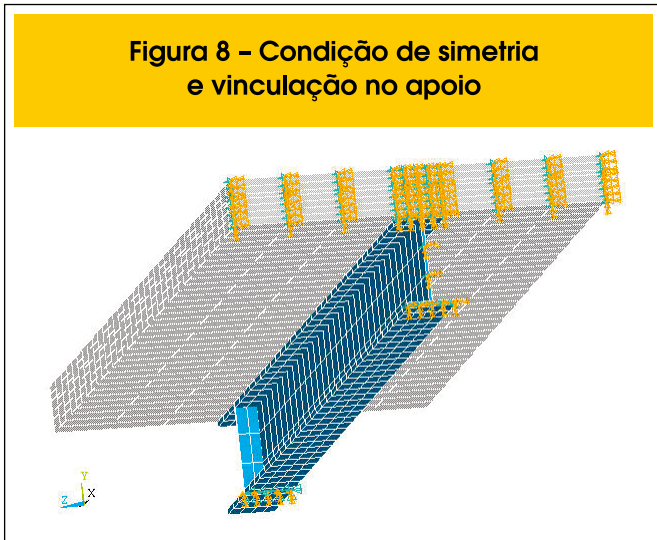
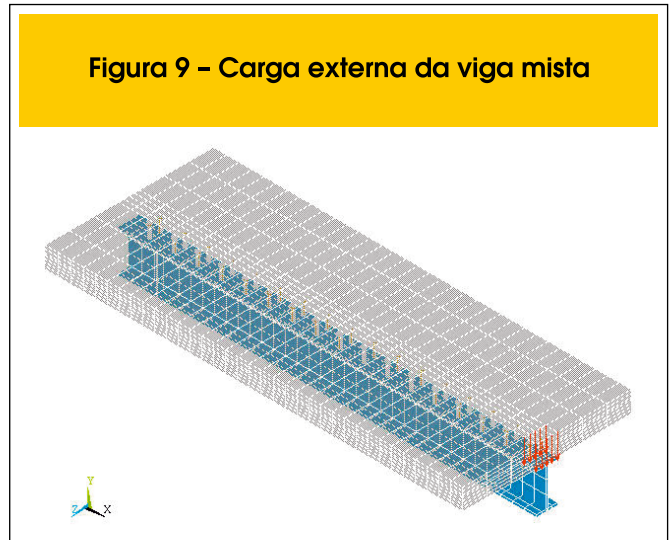


Figura 9 – Carga externa da viga mista



de liberdade. Na Figura 8 é mostrada a condição de simetria, a vinculação do apoio da viga mista no detalhe e, ainda, o acoplamento entre os materiais.

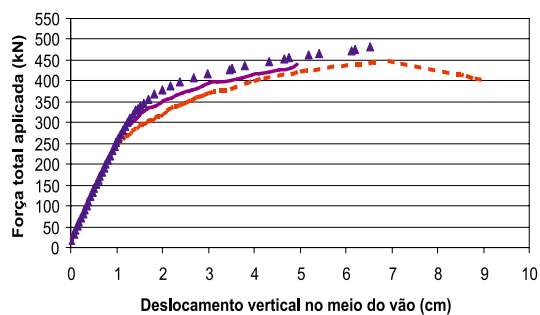
Na aplicação do carregamento em vigas mistas sem escoramento, considera-se que o perfil metálico suportará o seu peso próprio e do concreto recém lançado na mesa, sem que, no início, haja o trabalho conjunto entre os dois materiais. O comportamento como viga mista ocorrerá somente depois da cura do concreto, quando se pode aplicar a carga externa, pois a viga mista já atingiu a resistência prevista em projeto. Assim, ao iniciar o trabalho como viga mista, a estrutura já está deformada.

Nesse contexto, para simular a aplicação do carregamento na viga A3, adotou-se a técnica *Birth & Death*, disponível no ANSYS [1]. Esta técnica, que permite a ativação e desativação de elementos de uma malha discretizada, consiste na multiplicação do valor da entidade desativada na matriz de rigidez por um fator de redução, que praticamente anula os efeitos dos resultados de tal entidade. Neste trabalho o fator de redução adotado foi de 10^{-6} . Assim, numa primeira etapa, desativou-se a laje

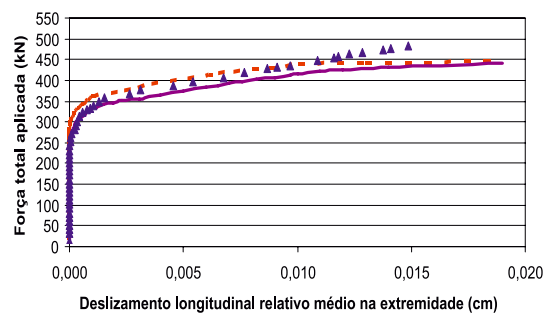
de concreto armado e conectores de cisalhamento e, aplicou-se o peso próprio da estrutura no perfil metálico. Em seguida, ativou-se a laje de concreto armado e inseriu-se a carga externa considerando o trabalho solidário laje-viga. O peso próprio da estrutura foi inserido na modelagem de acordo com os pesos específicos dos materiais que foram: 24 kN/m^3 para o concreto e 77 kN/m^3 para o aço da viga, conectores e armadura. A carga externa foi aplicada de modo crescente e monotônico, imediatamente após a atuação do peso próprio da viga mista. Embora concentrada no meio do vão, a carga foi tratada como distribuída em uma pequena área, aplicada nos nós pertencentes à face superior da laje de concreto, de forma centralizada em relação ao eixo da viga, para ficar de acordo com o modelo experimental apresentado em [6]. Tanto o peso próprio quanto a carga externa foram aplicados no modelo de forma incremental para levar em consideração o comportamento não linear dos materiais que compõe a viga mista.

A Figura 9 apresenta a viga mista com carga externa concentrada no meio do vão.

Figura 10 – Gráficos força x deslocamento vertical (a) e força x deslizamento (b) para vigas A3



(a)



(b)

Tabela 2 - Síntese dos resultados considerando as variações de H

Parâmetro	\varnothing (mm)	F_{max} (kN)	u_{max} (cm)	d_{max} (cm)
H=76 mm	19	506,90	9,24	0,0188
H=88 mm		481,32	6,48	0,0143
H=102 mm		481,46	6,54	0,0149

Tabela 3 - Síntese dos resultados considerando a influência as variações de \varnothing

Parâmetro	H (mm)	F_{max} (kN)	u_{max} (cm)	d_{max} (cm)
$\varnothing = 16$ mm	102	437,68	3,84	0,0133
$\varnothing = 19$ mm	102	481,46	6,54	0,0149
$\varnothing = 22$ mm	102	506,28	9,29	0,0151

Tabela 4 - Síntese dos resultados comparativos considerando a variações do NC com H

Parâmetros	\varnothing (mm)	F_{max} (kN)	u_{max} (cm)	d_{max} (cm)
NC=68	H=76 mm	506,90	9,24	0,0188
↓ NC=46*		↓ 466,78	↓ 4,80	↓ 0,0255
NC=68	H=88 mm	481,32	6,48	0,0143
↓ NC=46*		↑ 488,12	↓ 6,07	↓ 0,0329
NC=68	H=102 mm	481,46	6,54	0,0149
↑ NC=46*		↑ 502,30	↑ 7,22	↑ 0,0391

* Número de conectores calculados segundo a NBR 8800 (2), cálculo apresentado em (11)

3. Resultados e discussões

Na Figura 10 visualizam-se resultados comparativos do deslocamento vertical no meio do vão (a) e deslocamento longitudinal relativo (laje-viga) na extremidade da viga (b) com a evolução da carga aplicada. Tais resultados se referem à primeira etapa de simulação, realizada com as características originais da viga A3 para validar o modelo, comparando valores obtidos experimentalmente [6] e numericamente apresentados em [11] e neste trabalho. Cabe ressaltar que o modelo computacional desenvolvido em [11] considerou as vigas mistas escoradas, enquanto este trabalho e os ensaios experimentais mostrados em [6] foram realizados com vigas mistas sem escoramento.

Nota-se pela Figura 10 que no regime elástico as respostas das vigas mistas são semelhantes, tanto para os modelos experimentais quanto para os numéricos. Já no regime não linear, o valor limite de carregamento do modelo numérico simulado foi 7,5% maior que o modelo experimental apresentado em [6] e 8,5% maior que o modelo numérico desenvolvido em [11].

Em relação ao deslocamento vertical no centro do vão das vigas, no limite de carregamento, o valor do modelo numérico é 27% menor que o experimental exposto em [6]. Isso sugere um comportamento mais rígido do modelo desenvolvido neste trabalho.

O deslizamento observado, por outro lado, não apresentou o mesmo comportamento. No limite de carregamento, o modelo experimental de [6] e o numérico de [11] apresentaram deslizamentos semelhantes, enquanto o modelo construído resultou em um deslizamento 20% menor. De modo geral, percebe-se que é possível representar modelos experimentais numericamente. É provável, que as diferenças encontradas entre os modelos experimentais e numéricos estejam relacionadas à calibração dos modelos construídos, em função das simplificações e parâmetros adotados na modelagem.

3.1 Influência dos Conectores

Na Tabela 2 visualiza-se o resultado da influência da altura do conector (H) na carga limite (F_{max}), no deslocamento vertical no meio do vão (u_{max}) e no deslocamento longitudinal (d_{max}) relativo (entre laje e perfil de aço) médio na extremidade da viga, para a segunda etapa de simulações. Percebe-se que o carregamento máximo ocorre para o conector com H=76mm. Essa solução foi também a que apresentou o maior deslocamento vertical e deslocamento longitudinal, o que sugere um comportamento mais dúctil que as demais. Assim, verifica-se que o aumento da altura do conector não necessariamente incrementa a carga limite, o deslocamento vertical e o deslizamento longitudinal.

Tabela 5 – Síntese dos resultados comparativos considerando as variações de NC com \varnothing

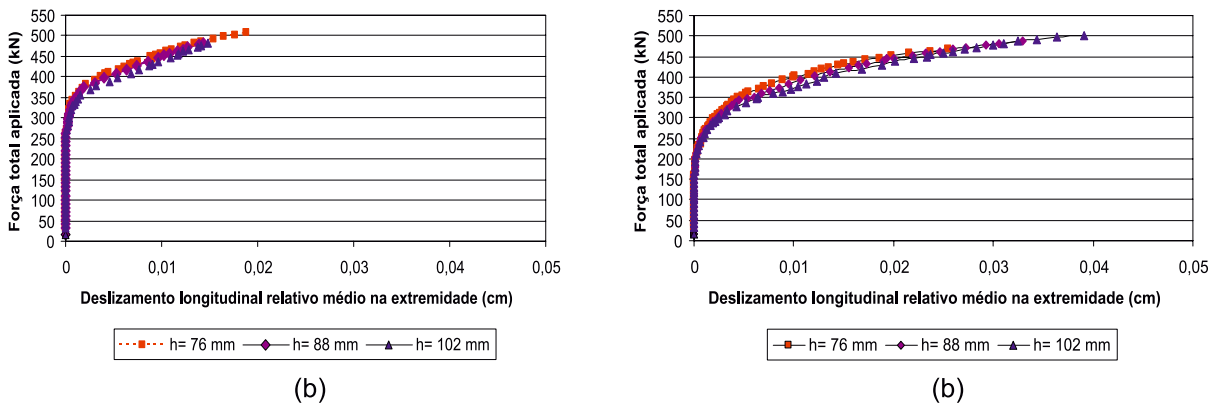
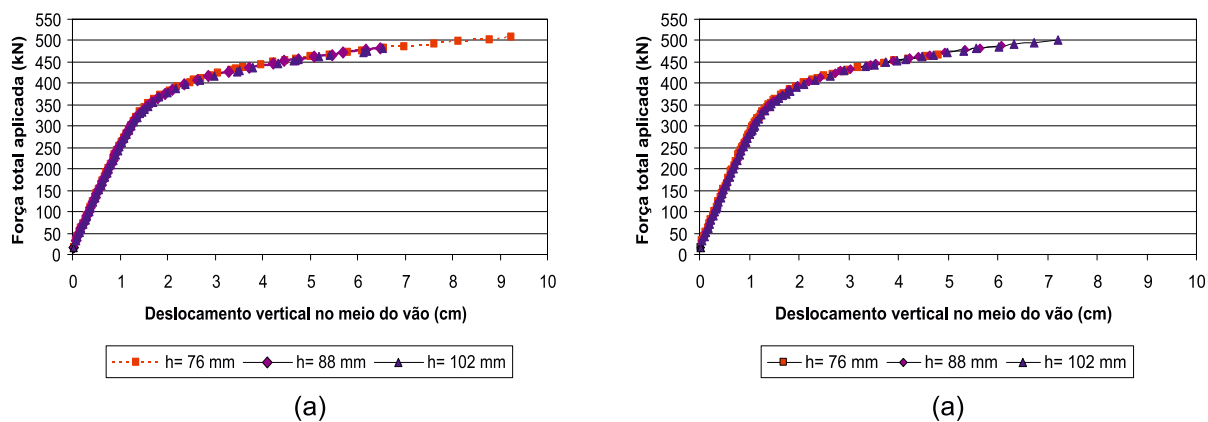
Parâmetros	\varnothing (mm)	F_{max} (kN)	u_{max} (cm)	d_{max} (cm)
NC=68	$\varnothing=16$ mm	437,68	3,84	0,0133
↓ NC=64*		↑ 471,54	↑ 6,16	↑ 0,0235
NC=68	$\varnothing=19$ mm	481,32	6,48	0,0143
↓ NC=46*		↑ 502,30	↑ 7,22	↑ 0,0391
NC=68	$\varnothing=22$ mm	481,46	6,54	0,0149
↓ NC=34*		↑ 487,42	↑ 7,50	↑ 0,0423

* Número de conectores calculados segundo a NBR 8800 (2), cálculo apresentado em (11)

Apresenta-se na Tabela 3 o resultado da influência do diâmetro do conector (\varnothing) na carga limite (F_{max}), no deslocamento vertical no meio do vão (u_{max}) e no deslizamento longitudinal (d_{max}) relativo (entre laje e perfil de aço) médio na extremidade da viga. Observa-se pela Tabela 3 que o aumento do diâmetro do conector

incrementa a carga limite, o deslocamento vertical e o deslizamento longitudinal, cujo maior valor corresponde ao conector de $\varnothing=22$ mm. A Tabela 4 mostra o resultado comparativo da segunda e terceira etapas de simulações para a influência do número de conectores (NC), com alturas (H) diferentes, na carga limite (F_{max}), no deslocamento

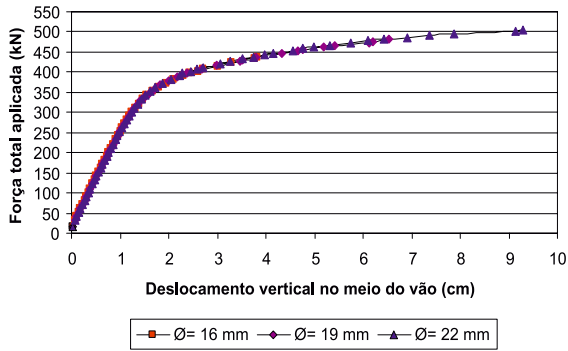
Figura 11 – Gráficos força x deslocamento (a) e força x deslizamento (b) para conectores com 19 mm de diâmetro



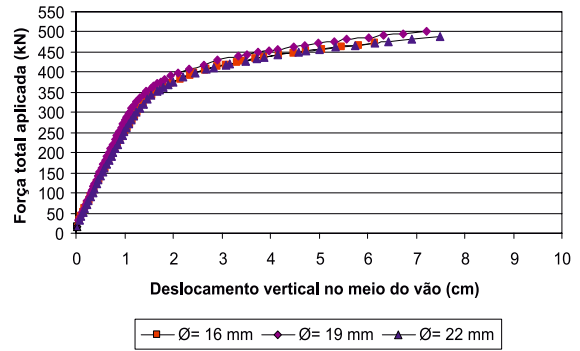
Autores

NBR 8800

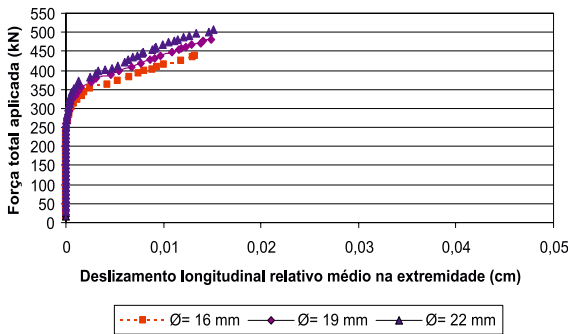
Figura 12 – Gráficos força x deslocamento (a) e força x deslizamento (b) para conectores com 102 mm de altura



(a)

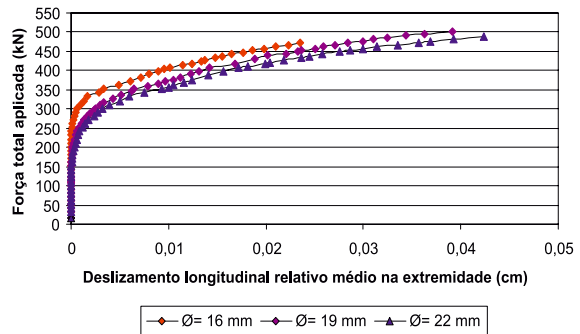


(a)



(b)

Autores



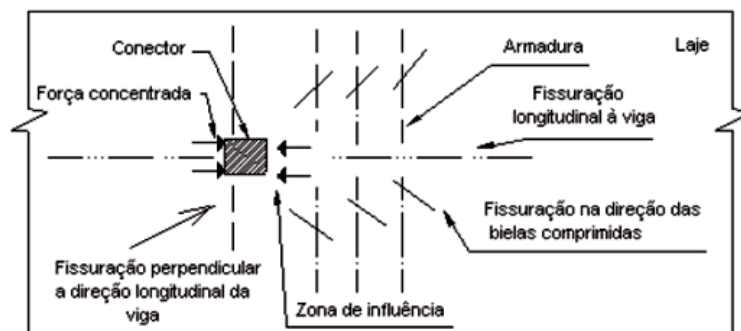
(b)

NBR 8800

vertical no meio do vão (u_{max}) e no deslizamento longitudinal (d_{max}) relativo (entre laje e perfil de aço) médio na extremidade da viga. Nota-se pela Tabela 4 que a redução do número de conectores

(↓ NC) implica no aumento (↑) do deslizamento longitudinal e, não necessariamente, na diminuição (↓) da força máxima e acréscimo do deslocamento vertical.

Figura 13 – Tipos de fissuração na laje devido à força concentrada (7)



A Tabela 5 mostra o resultado comparativo da segunda e terceira etapas de simulações para a influência do número de conectores (NC), com diâmetros (\varnothing) distintos, na carga limite (F_{max}), no deslocamento vertical no meio do vão (u_{max}) e no deslizamento longitudinal (d_{max}) relativo (entre laje e perfil de aço) médio na extremidade da viga.

Verifica-se pela Tabela 5 que a redução (\downarrow) do número de conectores (NC) implica no aumento (\uparrow) do deslocamento vertical e deslizamento longitudinal, mas, não necessariamente, na redução (\downarrow) da força máxima.

Para melhor visualizar os dados das Tabelas 2, 3, 4 e 5 são apresentadas as Figuras 11 e 12 com gráficos comparativos das etapas dois e três da evolução dos deslocamentos verticais no meio do vão (a) e dos deslizamentos longitudinais relativos (entre laje e perfil metálico) médios na extremidade da viga mista (b), com a força total aplicada no sistema misto.

A Figura 11 apresenta os gráficos comparativos de força *versus* deslocamento (a) e força *versus* deslizamento (b) para vigas mistas com os conectores de 19 mm de diâmetro e a Figura 12 apresenta os gráficos comparativos de força *versus* deslocamento (a) e força *versus* deslizamento (b) das vigas mistas com conectores de 102 mm de altura.

Percebe-se pelas Figuras 11 e 12 que as respostas das vigas mistas no regime elástico foram semelhantes para todos os conectores, independentemente do número, diâmetro e altura dos mesmos. No entanto, no regime não linear, a redução no número de conectores implica no aumento do deslizamento longitudinal e não apresenta influência preponderante na força e no deslocamento vertical.

As Figuras 14, 15 e 16 mostram as fissuras nos elementos da laje de concreto da viga mista com conectores de 19 mm de diâmetro e 102 mm de altura. De acordo com as configurações do ANSYS, a primeira fissura que ocorre no elemento é representada por um círculo vermelho, a segunda por um círculo verde e a terceira por um círculo azul. Estes círculos aparecem no centróide de cada elemento e estão inclinados segundo o plano que contém a fissura.

Os modos de fissuração que surgem na laje ocorrem devido à redução de resistência e rigidez do concreto na zona de compressão triaxial por consequência da fissuração do concreto provocada pelo conector, quando este aplica uma força concentrada na laje [10]. Na Figura 13 é possível verificar os três modos de fissuração que ocorrem na laje [13].

Figura 14 – Primeiras fissuras identificadas nos elementos da laje - carga de 101,35 kN

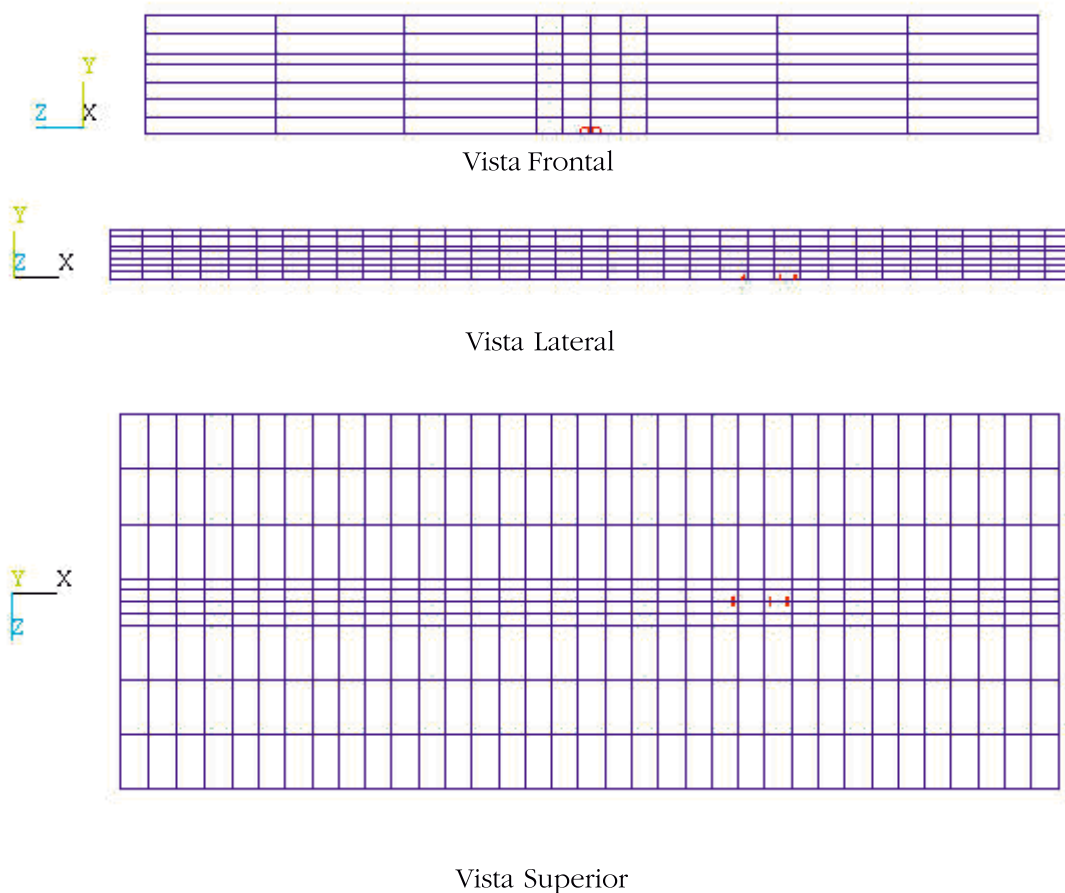
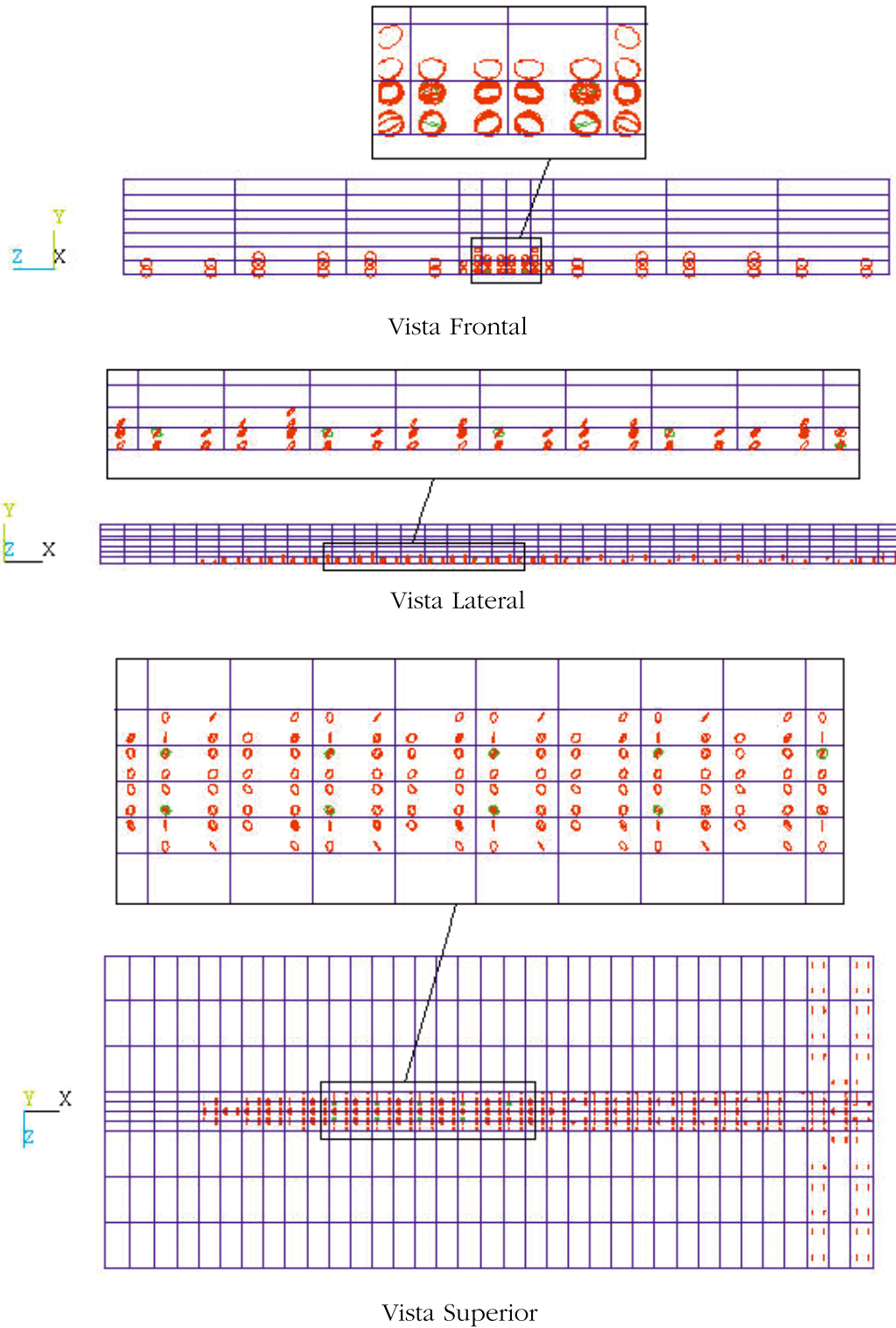


Figura 15 – Fissuras transversais (direção z), por fendilhamento e por cisalhamento na laje – carga de 151,45 kN



A Figura 14 indica as primeiras fissuras nos elementos da laje de concreto foram identificadas para uma carga externa igual a 101,35 kN. A Figura 15 apresenta as primeiras fissuras por fendilhamento e por cisalhamento nos elementos da laje de concreto, que foram sinalizadas para um nível de carregamento igual a 151,45 kN. Além destas fissuras, também é possível visualizar na figura citada fissuras transversais (direção z) no meio do vão.

A fissuração da laje de concreto para o último passo de carga (481,46 kN) é apresentada na Figura 16.

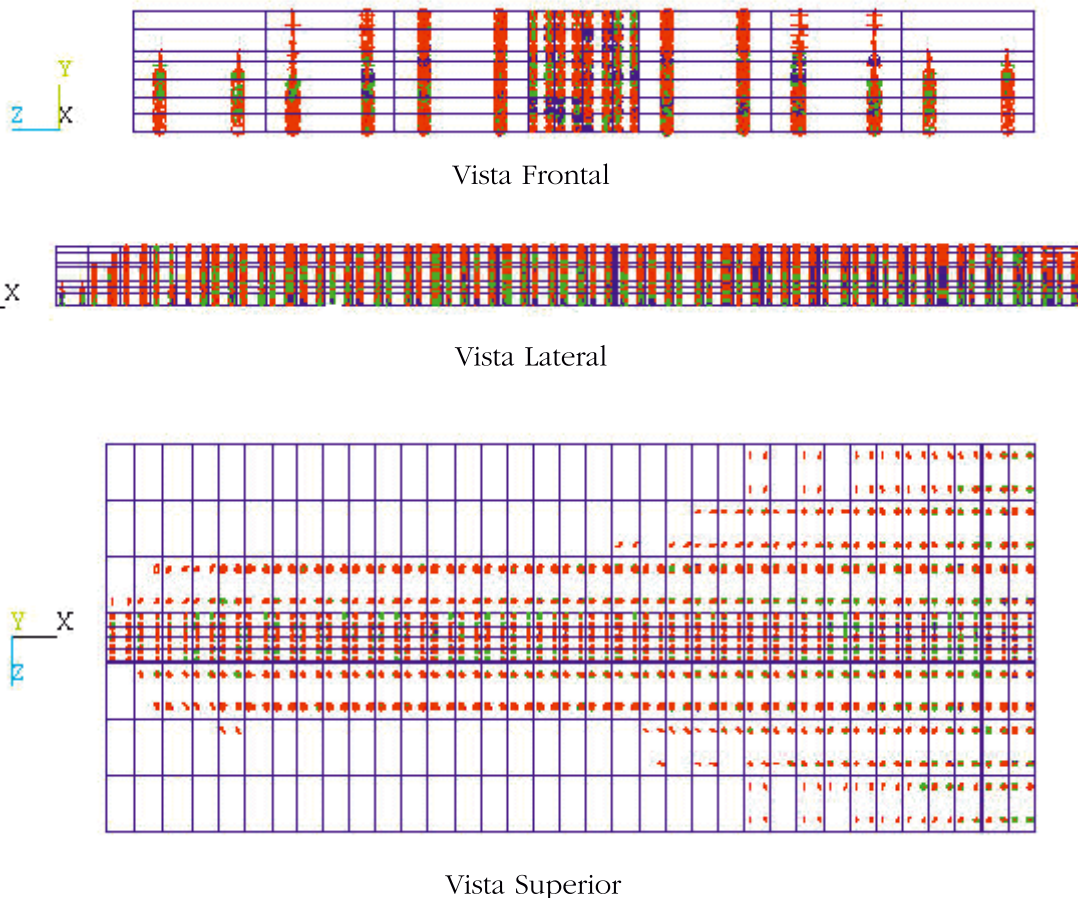
Na fissuração da laje de concreto da viga mista com conectores de 19 mm de diâmetro e 102 mm de altura, verificou-se que as primeiras fissuras (Figura 14) localizam-se na interface laje-viga e surgem para a carga externa de 101,35 kN em decorrência da adesão estabelecida para os materiais. Para a carga de 151,45 kN (Figura 15) identificam-se fissuras transversais (direção z) na interface laje-viga provenientes de tensões longitudinais de tração. Também se verificam para este nível de carga fissuras longitudinais (direção x) que ocorrem inicialmente em frente ao conector e em seguida atrás do mesmo. Estas fissuras correspondem às fissuras por fendilhamento. Ainda é possível identificar fissuras por

cisalhamento, inclinadas a 45° nos elementos da laje de concreto. A Figura 16 mostra o estado de fissuração da laje para um carregamento de 481,46 kN, que corresponde ao último passo de carga alcançado na simulação numérica.

Nas tabelas 6 e 7, apresentam-se os resultados obtidos na terceira etapa de simulações e no cálculo de vigas mistas, segundo recomendações normativas [2] cujo procedimento encontra-se em [12], para a carga limite (F_{max}) e o deslocamento vertical no meio do vão (u_{max}).

Cabe ressaltar que tanto o número de conectores de cisalhamento quanto os demais parâmetros (força, flecha) são definidos em função da menor capacidade de resistência entre a laje de concreto, ao esmagamento, e o perfil metálico, ao escoamento. Ou seja, pelas recomendações normativas [2], os valores obtidos para os deslocamentos verticais (flechas) e forças independem do diâmetro e altura dos conectores de cisalhamento, nesse caso, pois como a seção da viga mista adotada foi a mesma para todos os modelos simulados e a resistência do à ruína do concreto é menor que a capacidade de resistência ao cisalhamento dos conectores, a força e flecha calculadas são as mesmas para os modelos.

Figura 16 – Fissuras para o último passo de carga alcançado pela viga – carga de 481,46 kN



A Tabela 6 se refere aos resultados das vigas mistas com conectores de 19 mm de diâmetro (\emptyset) em função da variação de altura (H) e a Tabela 7 mostra os resultados das vigas mistas com conectores de 102 mm de altura (H) em função da variação de diâmetro (\emptyset).

Percebe-se através das Tabelas 6 e 7, que força máxima calculada pela NBR 8800 [2] é conservadora, por apresentar valores inferiores aos obtidos na simulação numérica. Já os deslocamentos verticais calculados foram bem maiores que os obtidos nas simulações numéricas, indicando um comportamento mais rígido dos modelos simulados e mais dúctil dos calculados.

4. Conclusões

A primeira etapa de simulações teve como objetivo a validação dos modelos desenvolvidos no presente trabalho, pela comparação com os resultados experimentais [6] e numéricos [11]. Dessa comparação, concluiu-se que é possível representar o comportamento das vigas mistas através de modelagem computacional.

Posteriormente, na segunda etapa de simulações, trabalhou-se com três valores de diâmetros e três valores de alturas para os conectores de cisalhamento, verificando-se que o aumento da altura do conector não necessariamente incrementa a carga limite, o deslocamento vertical e o deslizamento longitudinal, mas o aumento do diâmetro do conector incrementa a carga limite, o deslocamento vertical e o deslizamento longitudinal na interface laje-viga. Ainda nesta etapa foi possível visualizar e analisar o estado de fissuração da laje de concreto devido a utilização do elemento SOLID 65.

Na terceira etapa de simulações, variou-se a quantidade dos conectores de cisalhamento, mantendo-se, para o modelo adotado

as mesmas propriedades de materiais e variações de diâmetros e alturas dos conectores adotadas na segunda etapa de testes. O objetivo desta etapa foi verificar a influência do número de conectores nos modelos, pela comparação dos resultados com os obtidos na segunda etapa de simulações, e a correspondência dos resultados numéricos com os normatizados. Dessa forma, o número de conectores foi definido segundo as recomendações da NBR 8800 [2], cujo procedimento de cálculo é apresentado em [12]. Assim, pela comparação dos resultados obtidos na segunda e terceira etapas, verificou-se que, no regime elástico, as respostas são semelhantes, independentemente da quantidade, diâmetro e altura dos conectores. No entanto, no regime não linear, a redução no número de conectores implica no aumento do deslizamento longitudinal e não apresenta influência preponderante na força e no deslocamento vertical. Na comparação dos valores obtidos nas simulações com os calculados de acordo com recomendações normativas [2], percebeu-se que as recomendações normativas são conservadoras, pois fornecem valores menores que os obtidos nas simulações.

5. Referências bibliográficas

- [01] ANSYS. Versão 10.0 Documentation. ANSYS, Inc.
- [02] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, Rio de Janeiro, 2008.
- [03] ALVA, G. M. S.; MALITE, M. Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto. Publicação Interna: Cadernos de Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia

Tabela 6 – Resultados comparativos das vigas com conectores $\emptyset=19$ mm – NBR 8800 (2)

Vigas com conectores $\emptyset=19$ mm	H (mm)	F _{max} (kN)	u _{max} (cm)
Valores da Simulação	76	466,78	4,80
Valores Calculados	76	↓ 394,29	↑ 14,38
Valores da Simulação	88	488,12	6,07
Valores Calculados	88	↓ 394,29	↑ 14,38
Valores da Simulação	102	502,30	7,22
Valores Calculados	102	↓ 394,29	↑ 14,38

Tabela 7 – Resultados comparativos das vigas com conectores H=102 mm – NBR 8800 (2)

Vigas com conectores H=102 mm	\emptyset (mm)	F _{max} (kN)	u _{max} (cm)
Valores da Simulação	16	471,54	6,16
Valores Calculados	16	↓ 394,29	↑ 14,38
Valores da Simulação	19	502,30	7,22
Valores Calculados	19	↓ 394,29	↑ 14,38
Valores da Simulação	22	487,42	7,50
Valores Calculados	22	↓ 394,29	↑ 14,38

- de São Carlos, Universidade de São Paulo, vol. 7, n. 25, 2005, p. 51-84.
- [04] CBCA - Centro Brasileiro da Construção em Aço. Características do sistema construtivo em aço. Disponível em: <http://www.cbca-ibs.org.br/caracteristicas.asp>. Acesso em: 10 junho 2007.
- [05] CHAPMAN, J. C. Composite construction in steel and concrete – the behaviour of composite beams. *The Structural Engineer*, v. 4, 1964, p. 115–125.
- [06] CHAPMAN, J. C.; BALAKRISHNAN, S. Experiments on composite beams. *The Structural Engineer*, v. 42, 1964, p. 369–383.
- [07] DAVID, D. L. Análise teórica e experimental de conectores de cisalhamento e vigas mistas constituídas por perfis de aço formados a frio e laje de vigotas pré-moldadas. São Carlos, 2007 Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 250 p.
- [08] FABRIZZI, M. A. Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifícios de múltiplos andares com elementos estruturais mistos aço-concreto. São Carlos, 2007. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 233 p.
- [09] GATTESCO, N. Analytical modeling of nonlinear behavior of composite beams with deformable connection. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 52, 1999, p. 195-218.
- [10] KIRCHHOF, L. D. Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio. São Carlos, 2004. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 143 p.
- [11] KOTINDA, T. I. Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga. São Carlos, 2006. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 116 p.
- [12] MARCONCIN, L. R. Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto. Curitiba, 2008. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, 154 p.
- [13] OEHLERS, D.J. Splitting induced by shear connectors in composite beams. *Journal of Structural Engineering*, v.115, 1989, p.341-362.
- [14] OVEN, V. A.; BURGESS, I. W.; PLANK, R. J.; ABDUL WALI, A. A. An analytical model for the analysis of composite beams with partial interaction. *Computers & Structures*, v. 62, n. 3, 1997, p. 493-504.
- [15] TRISTÃO, G. A. Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numérica. São Carlos, 2002. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 125 p.