

VIGA MISTA DE AÇO E CONCRETO CONSTITUÍDA POR PERFIL FORMADO A FRIO PREENCHIDO

Igor Avelar Chaves¹ & Maximiliano Malite²

Resumo

No âmbito dos perfis formados a frio, a utilização do sistema misto ainda é incipiente, necessitando de investigações mais aprofundadas a respeito do comportamento estrutural e a adequação dos modelos de cálculo. Investigouse neste trabalho um sistema não-convencional de vigas mistas em perfil cartola leve preenchido com concreto, cuja conexão com a laje foi feita mediante duas soluções: conectores do tipo alça em barra chata e em barra redonda soldados ao perfil. Foi feita avaliação do comportamento estrutural da conexão aço-concreto, via ensaios de cisalhamento direto (push-out tests), e ensaios em vigas mistas simplesmente apoiadas para avaliação da região de momento fletor positivo. Os conectores de cisalhamento apresentaram ductilidade e resistência compatíveis com as vigas mistas analisadas, e as respostas de rigidez e resistência à flexão para uma condição de interação completa comprovam que a hipótese de plastificação total da seção descreve com precisão o comportamento estrutural do sistema proposto.

Palavras-chave: Estruturas de aço. Vigas mistas de aço e concreto. Perfis de aço formados a frio. Conectores de cisalhamento.

COMPOSITE STEEL AND CONCRETE BEAM CONSTITUTED BY FILLED COLD-FORMED STEEL SECTION

Abstract

In the cold-formed steel sections scope, the use of a composite steel and concrete solution is still premature, making necessary a higher degree of structural behaviour investigation and the adequacy of the theoretical solutions proposed. A non-conventional lightweight composite system was investigated. Formed by hat-shaped beams filled with concrete, the connection with the slab was done by means of two solutions: arc-shaped flat bars and arc-shaped round connector bars welded to the section. An analysis was conducted for evaluation of the structural behaviour in the steel and concrete interface by push-out tests, and tests in simple two points supported beams for evaluation of the bending strength. The shear connectors showed ductility and resistance compatible with the analysed composite beams and the stiffness and bending resistance responses for the given condition of full interaction showed that the full section plasticisation consideration describes with precision the structural behaviour of the proposed system.

Keywords: Steel Structures. Composite Steel and Concrete Beams. Cold-Formed Steel Shapes. Shear Connectors.

1 INTRODUÇÃO

Em virtude à pequena gama de perfis laminados e ao custo relativamente elevado dos perfis soldados, o emprego de perfis formados a frio em edifícios de pequeno porte (até quatro ou cinco pavimentos) tem representado uma solução economicamente viável e, portanto, bem aceita no ramo da construção metálica. No Brasil, o sistema misto aço e concreto em perfis de aço formados a frio têm sido adotado em edifícios habitacionais de interesse social, entretanto seu uso e emprego racional

¹ Mestre em Engenharia de Estruturas – EESC-USP, igorac@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, mamalite@sc.usp.br

requer soluções que aliem eficiência estrutural e facilidade de execução, inclusive de proteção contra fogo e corrosão. O sistema ora proposto de acordo com a Figura 1, constituído por perfil cartola preenchido com concreto agrega tais fatores. As vigas podem ser apoiadas em pilares de aço ou de concreto, e as ligações rotuladas ou com continuidade.



Figura 1 – Vista geral do sistema proposto.

Como já mencionado, o comportamento das vigas mistas depende diretamente do grau de interação entre os elementos que a constituem, ou seja, da interação entre o perfil de aço e laje de concreto. Desta forma, o estudo da interface formada entre esses elementos, bem como dos dispositivos de ligação entre eles, são de grande importância e interesse. No entanto, a definição de uma estratégia de modelagem que reproduza satisfatoriamente este tipo de viga servirá como subsídio para pesquisa de assuntos que ainda demandam maiores estudos, como por exemplo, vigas mistas contínuas, vigas mistas com outros tipos de conectores, vigas mistas em situação de incêndio, etc. A escolha pela simulação numérica para estudar o comportamento das vigas mistas fez-se pelo fato de esta permitir uma análise mais detalhada dos aspectos de interesse juntamente com uma análise experimental apurada. Que em geral, é descrita por equacionamentos trabalhosos em razão da considerável complexidade da análise multiaxial nos campos das tensões e das deformações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em (MALITE, 1990) cita-se que os estudos referentes aos sistemas mistos aço e concreto tiveram seu início em 1914 na Inglaterra, quando a empresa Redpath Brow and Company iniciou uma série de ensaios a respeito de sistemas compostos para pisos. Na década de 30, de acordo com (VIEST et al., 1958), várias pontes foram construídas utilizando-se o sistema misto, e em 1944, o assunto foi introduzido nas normas da até então denominada AASHO (*American Association of State Highway Officials*), hoje AASHTO. Segundo (VIEST, 1960), as primeiras vigas mistas estudadas eram constituídas por um perfil de aço embutido no concreto, nas quais a interação se dava pela força de adesão natural entre os materiais.

Gradualmente, este sistema foi sendo substituído por laje de concreto apoiada sobre a mesa superior da viga de aço, e estudos relacionados à conexão mecânica entre os dois materiais foram se tornando mais freqüentes. A partir de 1940, praticamente todos os estudos referentes ao comportamento da viga mista utilizavam conectores mecânicos, denominados usualmente como conectores de cisalhamento. Em (SLUTTER; DRISCOLL, 1965) são apresentados resultados

experimentais com vistas à verificação da resistência última à flexão, e desenvolvimento de um critério para determinação do número mínimo de conectores requeridos em vigas mistas. Como conclusões principais tem-se que: se a soma das resistências últimas de todos os conectores no vão correspondente à cortante for suficiente para satisfazer o equilíbrio quando da carga última, então o momento resistente último teórico pode ser alcançado; e que a redistribuição de esforços entre os conectores de cisalhamento torna desnecessário o espaçamento dos conectores de acordo com o diagrama de cortante.

No Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP, o estudo deste tema iniciou-se com um trabalho de mestrado, (MALITE, 1990), e prosseguiu com o doutorado do mesmo autor, (MALITE, 1993), referente a vigas mistas com três tipos de conectores de cisalhamento de perfis formados a frio (cantoneira simples, cantoneira enrijecida e perfil "U"). Seguiram-se então vários trabalhos no âmbito de estruturas mistas. Como última referência da EESC, (DAVID, 2007) realizou uma ampla investigação teórica e experimental a respeito do comportamento estrutural de vigas mistas constituídas por perfis de aço formados a frio e laje de vigotas pré-moldadas. Desta análise, verificou-se a influência da armadura de costura, do posicionamento dos conectores em relação às vigotas treliçadas e do deslizamento na interface e suas implicações principalmente na determinação do deslocamento vertical. Os resultados indicaram a necessidade de adoção um momento fletor resistente inferior ao momento de plastificação total da seção mista. E que a posição e taxa de armadura transversal interferem no panorama de fissuração da laje, mas têm pequena influência na resistência da viga mista.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL E NUMÉRICO

Ao se avaliar uma nova proposta tecnológica, é de fundamental importância uma análise experimental criteriosa. Onde esta, fornecerá informações importantes tanto para a aceitação do modelo, quanto para a validação das formulações de dimensionamento, servindo como modo de aferição das hipóteses teóricas adotadas. A análise experimental constituiu de duas etapas: ensaios de cisalhamento direto (*push-out tests*), em conectores e ensaios de flexão simples em vigas mistas biapoiadas, onde se pretendeu então, obter o entendimento do comportamento estrutural do sistema proposto. Os ensaios de cisalhamento direto (*push-out*) permitiram avaliar a resistência e a ductilidade dos conectores em questão. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Estruturas da EESC-USP, utilizando a máquina universal servo-hidráulica INSTRON com aplicação de carregamento monotônico e carregamento cíclico não reversível. Os experimentos foram conduzidos com controle de deformação, em conectores do tipo alça em barra chata e alça em barra redonda. Conectores em perfil U laminado foram ensaiados para servir de referência uma vez que são conectores pré-qualificados e de comportamento estrutural dúctil. Tais ensaios permitem avaliar a resistência e a ductilidade da conexão.

Os ensaios de flexão simples em vigas mistas de aço e concreto biapoiadas, permitem avaliar a resistência, a rigidez e identificar os modos de falha juntamente com o comportamento estrutural das mesmas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Estruturas da EESC-USP, utilizando atuador hidráulico com capacidade de 500kN e pórtico de reação. Juntamente com a investigação experimental das vigas mistas de aço e concreto, foi realizado um estudo teórico juntamente com uma análise numérica empregando o programa ANSYS, visando analisar o comportamento estrutural das vigas mistas ensaiadas. Os conectores presentes nas vigas foram modelados de forma indireta, utilizando estratégia específica, usando para tal a consideração de que o grau de interação entre os materiais se manteve completo durante todo o ensaio. Na parte experimental foram analisadas vigas mistas de aço e concreto simplesmente apoiadas, com conectores constituídos do tipo alça em barra chata soldados ao perfil e do tipo alça em barra redonda soldados ao perfil. As variáveis dos ensaios de cisalhamento direto, e a identificação dessas variáveis na nomenclatura dos corpos-de-prova estão descritas na Tabela 1. E as variáveis dos ensaios de

flexão simples, e a identificação dessas variáveis na nomenclatura dos corpos-de-prova estão descritas na Tabela 2.

Tabela 1 – Modelos para ensaios de cisalhamento direto

Corpo-de-prova	Conectores	Comprimento (mm)	Espessura da laje ¹⁾ (mm)	$f_{c28,m}$ ²⁾ (MPa)
CP P1 *	Barra redonda ³⁾	-	100	30
CP P2 *	Barra chata ⁴⁾	-	100	30
CP A1 *	Barra chata	-	100	30
CP A2	Barra chata	-	100	30
CP A3	Barra chata	-	100	30
CP B1 *	Barra redonda	-	100	30
CP B2	Barra redonda	-	100	30
CP B3	Barra redonda	-	100	30
CP U1 *	U laminado	100	100	30
CP U2	76,2 x 35,8 x 0,69	100	100	30
CP U3	6,11 Kg/m	100	100	30

* Conectores instrumentados com extensômetros elétricos.
¹⁾ Laje maciça de concreto. ³⁾ Ø 10,00 mm
²⁾ Resistência alvo do concreto aos 28 dias. ⁴⁾ 150 x 40 x 3 mm

Não obstante, foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional, com consideração da não linearidade física correspondente às vigas ensaiadas. A simulação numérica foi realizada por meio do código de cálculo ANSYS. A estratégia utilizada de modelar tanto o perfil de aço quanto a laje de concreto com elementos tipo casca, *Shell* 181 (Figura 2), se mostrou eficiente, com resultados muito próximos a realidade. A interação destes elementos foi dada a partir do acoplamento dos nós coincidentes entre o perfil e a laje. Trata-se de um elemento plano, com quatro nós e seis graus de liberdade por nó, sendo três destas translações e três rotações. O elemento é apropriado para análises de estruturas de pequenas a médias espessuras. Além desta característica, o *Shell* 181 se adequou muito bem a casos envolvendo aplicações tanto lineares, quanto para grandes rotações e/ou deformações e casos não-lineares. A sua estrutura permite que em casos particulares, a espessura varie de forma não linear. No domínio do elemento, tanto uma aproximação por integração total ou parcial é permitida. Optou-se então por não fazer uso de simetria, considerando-se o custo computacional para as máquinas do laboratório de computação do departamento de estruturas que não se tornou elevado a ponto de justificar tal técnica.

Tabela 2 – Modelos para ensaios de vigas mistas de aço e concreto

Modelo ¹⁾	Seção da viga de aço	Tipo de Conectores
VM A1	Viga 200x80x20x3,0	Barra chata
VM A2	Viga 200x80x20x3,0	Barra chata
VM B1	Viga 200x80x20x3,0	Barra redonda
VM B2	Viga 200x80x20x3,0	Barra redonda

¹⁾ Todos os corpos-de-prova com vão teórico igual a 2,85m e duas forças concentradas a uma distância de 1,05m de cada extremidade. A laje possui 70cm de largura e 10cm de espessura.

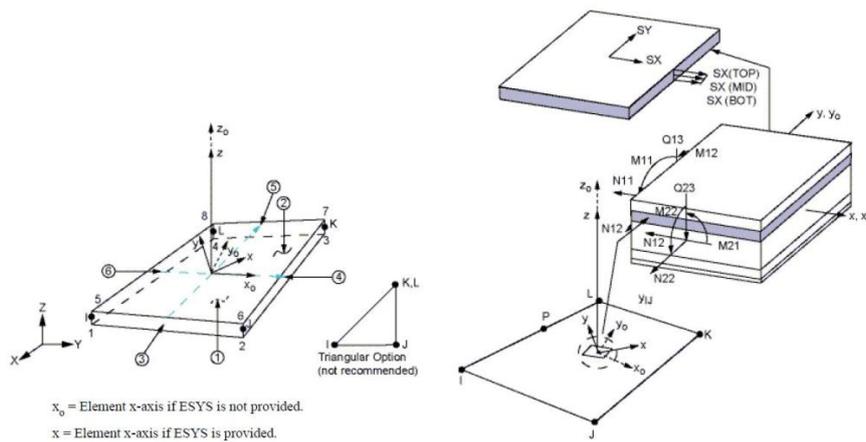


Figura 2 – Elemento SHELL 181, manual ANSYS versão 10.0.

Os apoios foram representados através de imposição de condições de contorno. Buscando representar perfeitamente os apoios do tipo móvel e do tipo fixo. Onde para o apoio do tipo fixo, foram restringidas todas as translações e rotações. E para o apoio tipo móvel, apenas não se restringiu a translação no eixo longitudinal Z e a rotação dada no plano da seção transversal XY. A solicitação também foi aplicada com vista a reproduzir o mesmo esquema estático realizado no programa experimental, ou seja, foi aplicada sob forma de força distribuída em uma certa linha de nós.

Nesta estratégia os nós da interface laje e perfil foram acoplados, permitindo os mesmos deslocamentos de translação na direção X, na direção Y e na direção Z. Impedindo completamente o deslizamento longitudinal, transversal e a separação vertical entre a laje e o perfil. O programa ANSYS possibilita, por meio de alguns elementos finitos, a consideração da não-linearidade dos materiais, com base em alguns critérios de resistência. Nos modelos numéricos estudados, para o aço do perfil adotou-se o comportamento elasto-plástico multilinear com encruamento isotrópico. O comportamento adotado para perfis é também associado ao critério de von Mises, para a qual se adota uma curva multilinear obtida experimentalmente. Já o comportamento do concreto foi representado por meio do modelo Cast-Iron disponibilizado pelo programa ANSYS, e permite simular perfeitamente o comportamento do concreto quando submetido a tensões de tração e/ou de compressão.

Um grande número de fatores relacionados ao material pode causar mudanças de rigidez na estrutura durante a análise. Uma relação não-linear de tensão-deformação de materiais plásticos, elasto-plásticos ou hiper-elásticos irão levar a mudanças significativas na rigidez ao longo da aplicação da solicitação. Por este motivo, é importante delimitar bem as características não-lineares do material para que haja uma resposta coerente com as respostas que buscamos encontrar.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização dos materiais

Para determinação das propriedades mecânicas do concreto foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 10cm por 20cm, referentes a cada laje, sendo estes para ensaio de resistência à tração por compressão diametral e para ensaio de módulo de elasticidade e resistência à compressão. Os corpos-de-prova cilíndricos foram moldados e curados segundo as especificações da ABNT NBR 5738:1984, e para o ensaio foi utilizada a máquina de ensaios ELE Autotest 2000.

O cimento empregado foi de alta resistência inicial (ARI), e o traço do concreto em massa, igual a 1 : 2,7 : 3,7 : 0,6 com consumo de cimento de 313 kg/m³. A ABNT NBR 8522:1984 prescreve o método de determinação dos módulos de elasticidade, tangente e secante. Neste trabalho o módulo

de elasticidade utilizado foi o secante medido pela inclinação da reta secante ao diagrama tensão versus deformação, definida pelo valor mínimo de tensão igual a 0,5 MPa e 30% da tensão de ruptura do concreto. Os valores médios das propriedades do concreto, tanto para os ensaios de cisalhamento direto quanto para as vigas mistas, se encontram nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Caracterização do concreto modelos push-out e Propriedades

Corpos de Prova	Resistência à compressão ABNT NBR-5739:1994 f_{cm} (MPa)			Resistência à tração ABNT NBR-7222:1994 $f_{ctm, sp}$ (MPa)			Módulo de Elasticidade ABNT 8522:2003 E_{cs} (MPa)		
	Laje A	Laje B	Média	Laje A	Laje B	Média	Laje A	Laje B	Média
Barra Chata	38,72	41,72	40,56	2,74	3,52	3,18	31763	34331	33335
	39,48	42,31		2,92	3,53		32411	34837	
Barra Redonda	33,85	35,93	34,50	1,74	2,29	2,16	27585	29368	28138
	33,07	35,13		2,42	2,19		26917	28683	
U Laminado	40,42	36,75	39,67	1,13	2,05	2,15	33217	30071	32569
	40,14	41,35		2,25	2,16		32977	34014	

Tabela 4 – Caracterização do concreto vigas mistas – Propriedades

Corpos de Prova	Resistência à compressão ABNT NBR-5739:1994 f_{cm} (MPa)			Resistência à tração ABNT NBR-7222:1994 $f_{ctm, sp}$ (MPa)			Módulo de Elasticidade ABNT 8522:2003 E_{cs} (MPa)		
	CP 1	CP 2	Média	CP 1	CP 2	Média	CP 1	CP 2	Média
VM A1	23,33	25,88	24,61	2,29	2,37	2,33	27849	30400	29124
VM A2	22,23	26,93	24,58	2,09	2,61	2,35	27546	32247	29897
VM B1	23,33	25,88	24,61	2,29	2,37	2,33	27849	30400	29124
VM B2	22,23	26,93	24,58	2,09	2,61	2,35	27546	32247	29897

Tabela 5 – Caracterização aço – Propriedades mecânicas

Corpo-de-Prova	f_y (MPa)	f_u (MPa)	A (%)	
<i>Push-out</i> Conectores em Barra Chata *	CP 1	324	470	26
	CP 2	324	460	24
	CP 3	364	485	23
	Média	337	472	24
<i>Push-out</i> Perfil Central	CP 4	324	479	25
	CP 5	330	476	24
	CP 6	374	492	23
	Média	343	482	24
Vigas A1, A2 e Conectores em Barra Chata	CP 7	277	390	28
	CP 8	285	404	28
	CP 9	282	399	28
	Média	281	398	28
Vigas B1 e B2	CP 10	288	394	27
	CP 11	278	395	28
	CP 12	286	395	27
	Média	284	395	27

* Aço CSN COR – 420 : $f_y = 300\text{Mpa}$ e $f_u = 420\text{Mpa}$ (valores nominais)

Os perfis empregados para os ensaios foram fabricados com o aço de qualidade estrutural COR-420 da CSN. O corte das chapas foi executado em guilhotina; dobra dos perfis foi feita em prensa dobradeira e soldagem dos conectores em tipo solda de topo. Sendo que todas as operações executadas pela empresa SOUFER Indústria Ltda. Suas propriedades mecânicas foram determinadas por meio de ensaios de tração direta, seguindo as prescrições da ASTM A 370. Foi retirado um corpo-de-prova de cada chapa de amostra de lote totalizando seis corpos de prova. Procurando se respeitar uma quantidade de amostras que pudessem ser considerada representativa. Valores finais dos Resultados estão representados na Tabela 5.

4.2 Ensaios de cisalhamento direto

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto estão apresentados em forma de gráficos e tabelas. Em todos os gráficos a força se refere a um conector, ou seja, a força aplicada foi dividida por quatro. Para facilitar as comparações, as análises serão feitas em subitens, sendo eles: influência do tipo de carregamento, influência do tipo de conector, força máxima e modo de ruptura.

4.2.1 Tipo de carregamento

Recordando detalhe já descrito anteriormente, alguns corpos-de-prova foram ensaiados com carregamento monotônico, e outros com carregamento cíclico como sugere o EUROCODE 4:2001. Como os resultados dos ensaios pilotos foram comprometidos pelas instabilidades localizadas da alma, optou-se por realizar pelo menos um ensaio monotônico em um único modelo de cada grupo de conectores com o intuito de delimitar os limites de máximo e mínimo para os ensaios cíclicos que viriam a posteriori. Os modelos A2, B2 e U2 foram ensaiados monotonicamente. Enquanto que os demais modelos push-out sofreram ensaios cíclicos antes de serem levados a ruptura, conforme procedimento de ensaio dado pelo EUROCODE 4:2001. Resultados são apresentados na Figura 3.

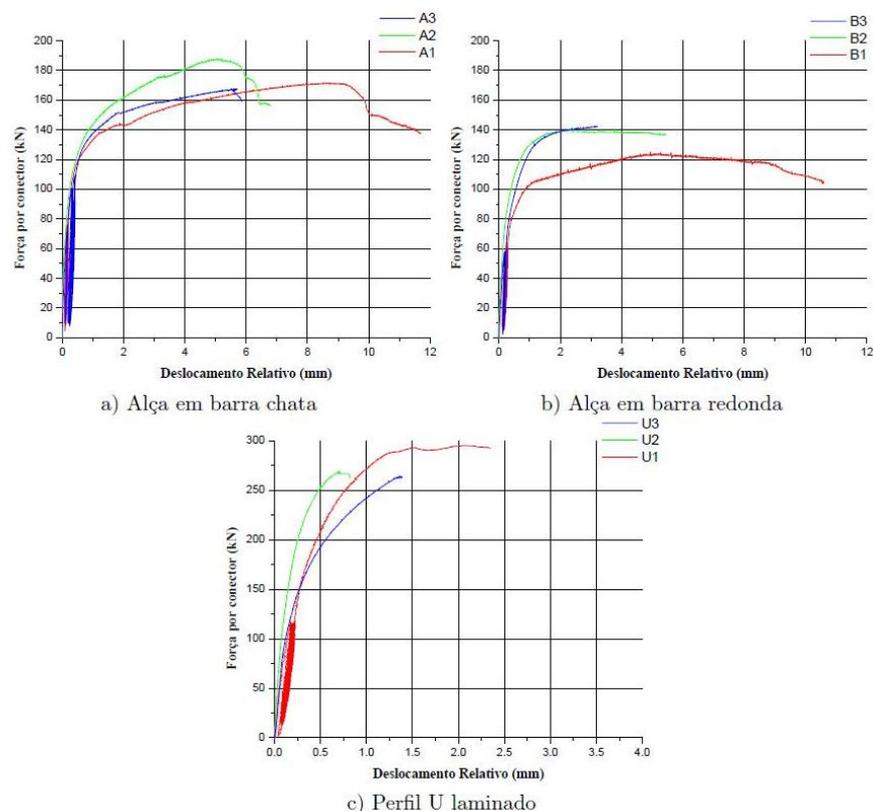


Figura 3 – Força versus Deslocamento relativo dos conectores de cisalhamento.

4.2.2 Influência do tipo de conector

Pode se observar pelos resultados mostrados anteriormente, que há uma significativa variação de resistência entre os diferentes tipos de conectores. Variação esta que é dada devido à diferença entre a forma dos mesmos. As alças e barras possuem uma área de contato com o concreto relativamente parecidas. Já o conector do tipo U laminado apresenta um comportamento semelhante aos trazidos por pesquisas passadas, como em (MALITE, 1993) e (DAVID, 2003). Portanto, não há muita surpresa em relação aos resultados dos mesmos. O gráfico da Figura 4 a seguir mostra de forma comparativa esta diferença de resistência entre os conectores.

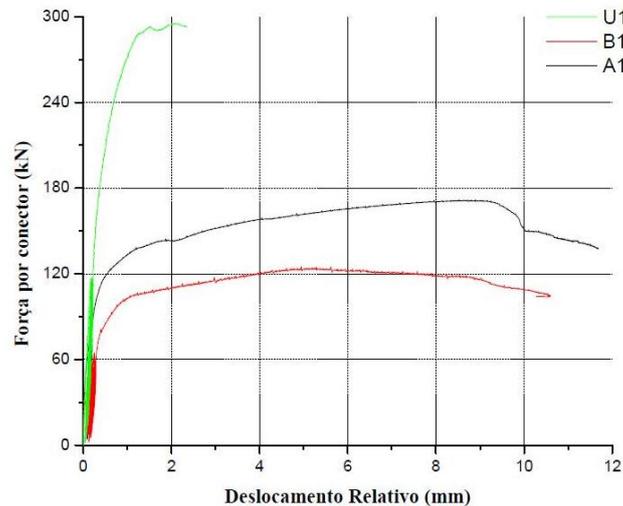


Figura 4 – Força versus Deslocamento comparativo entre os conectores de cisalhamento.

4.2.3 Força máxima

Tabela 6 – Resistência última e deslocamento característico dos diferentes conectores

Conector	Corpo-de-Prova	Q_{max} (kN)	δ_{uk} (mm)
Tipo Alça em Barra Chata	A1	172,0	9,57
	A2	188,1	N.A.
	A3	167,8	N.A.
	Média	180,0	9,57
Tipo Alça em Barra Redonda	B1	125,1	9,94
	B2	140,2	N.A.
	B3	142,6	N.A.
	Média	136,0	9,94
Perfil U Laminado	U1	295,3	N.A.
	U2	269,5	N.A.
	U3	264,8	N.A.
	Média	276,5	N.A.

Como relatado anteriormente, cada grupo ou tipo de conectores, apresenta resultados diferentes de resistência. Durante os ensaios piloto, observou-se uma instabilidade elevada da alma em todos os modelos. Portanto os resultados de força versus deslocamento relativo ficaram comprometidos. Sabido este fato, foram soldadas chapas de aço chato com o intuito de triplicar a área efetiva da região não confinada do concreto. Portanto, os demais ensaios de cisalhamento se deram sem demais problemas, gerando resultados confiáveis. Estes valores são apresentados na Tabela 6.

4.2.4 Modo de falha

Os modelos escolhidos para terem umas das lajes removidas foram A1, B1 e U1. Os mesmos que foram instrumentados com extensômetros elétricos para medir as deformações localizadas nos conectores. Tomou-se a forma de ruptura de cada conector como representativa de modo de falha para o grupo em que o mesmo se encontrava.

Nos conectores do tipo alça em barra chata, o modo de falha se deu por ruptura da solda. Nos conectores tipo alça em barra redonda, a ruptura se deu por falha por cisalhamento. Como pode se observar na Figura 5. E nos conectores tipo “U” laminado a falha se deu por esmagamento do concreto.



a) Tipo Alça

b) Tipo Barra

c) Tipo U Laminado

Figura 5 – Modo de falha nos conectores após os ensaios de cisalhamento.

4.3 Ensaios Experimentais e numéricos – Vigas mistas

Os resultados das quatro vigas ensaiadas estão apresentados em forma de gráficos e tabelas, sendo estes subdivididos em: carga e modo de falha, deslocamento vertical, deslizamento relativo na interface, deformação nos conectores de cisalhamento, deformações na seção transversal e deformações nas rosetas. Os resultados experimentais serão confrontados com os obtidos na modelagem numérica e também com os obtidos analiticamente, tentando assim explicar da melhor maneira o comportamento dessas vigas mistas.

4.3.1 Força máxima e modo de falha

De acordo com os valores obtidos pela instrumentação, a força resistida pelas vigas varia em torno de 178,06 kN. Por determinação, foi dimensionada a quantidade de conectores para se garantir uma interação total entre os dois materiais. Portanto, havia uma condição de interação total na viga mista, aonde somente uma linha neutra de plastificação é verificada. Com modo de falha idêntico para todos os quatro modelos (Figura 6), as vigas mistas sofreram colapso por esmagamento da mesa de compressão do concreto.



Figura 6 – Aspecto final e modo de ruptura nas vigas mistas ensaiadas.

Já pela modelagem numérica, os resultados mostraram tensões resistentes na mesa de compressão superiores as tensões dadas pela análise experimental. E em relação ao modo de ruptura pela modelagem numérica, observou-se também que a falha ocorreu por instabilidade da mesa de compressão. Observe na Figura 7 que, tanto para o ensaio experimental, quanto para o ensaio numérico a deformada final das vigas se portou de maneira bastante uniforme.

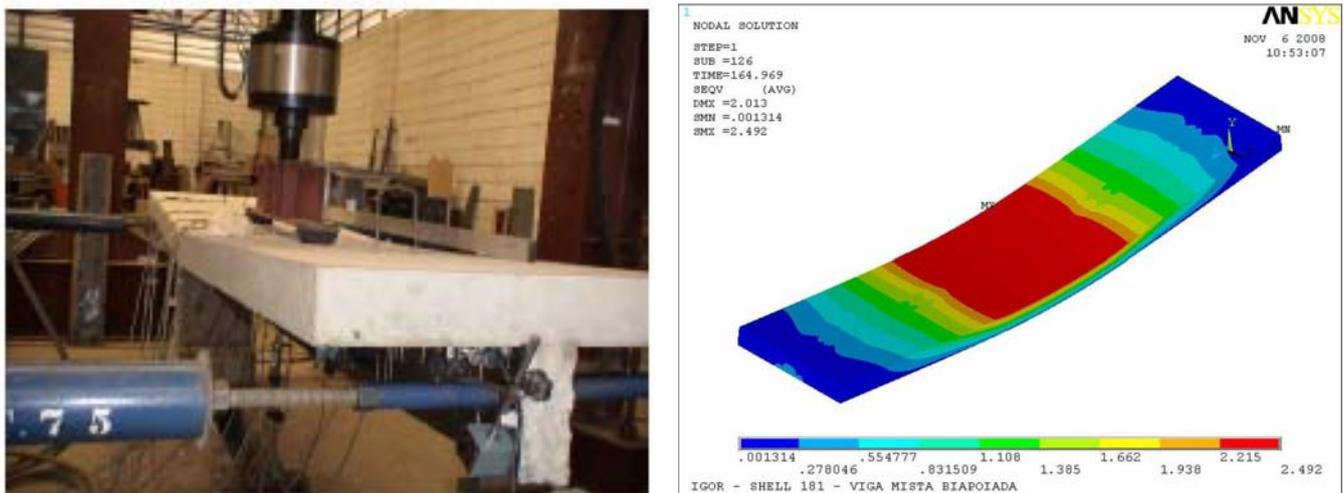


Figura 7 – Deformada final após ensaio experimental e numérico.

4.3.2 Deformações longitudinais na seção transversal no meio do vão

Na Figura 8 serão apresentados dois gráficos, um corresponde às deformações lidas nos pontos instrumentados e um gráfico que indica a posição da linha neutra de plastificação em relação à seção transversal no meio do vão com base em três diferentes valores de carregamento. Uma a 25% da força máxima, outra a 50% e uma última com base a 75% da força máxima resistida. No caso em questão para a viga VM A1.

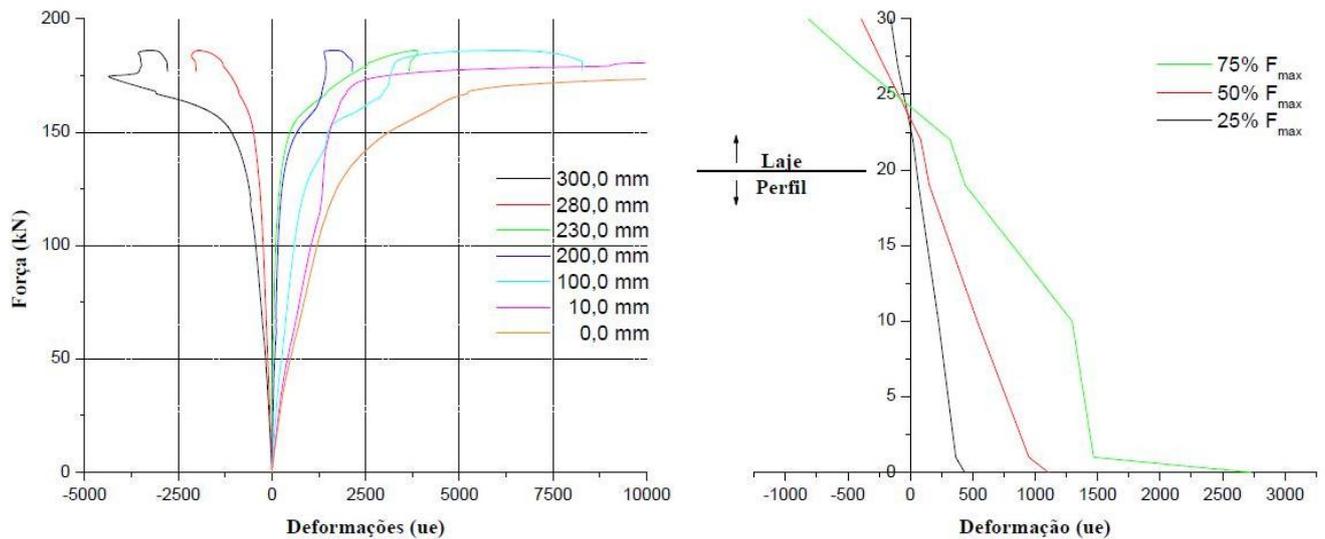
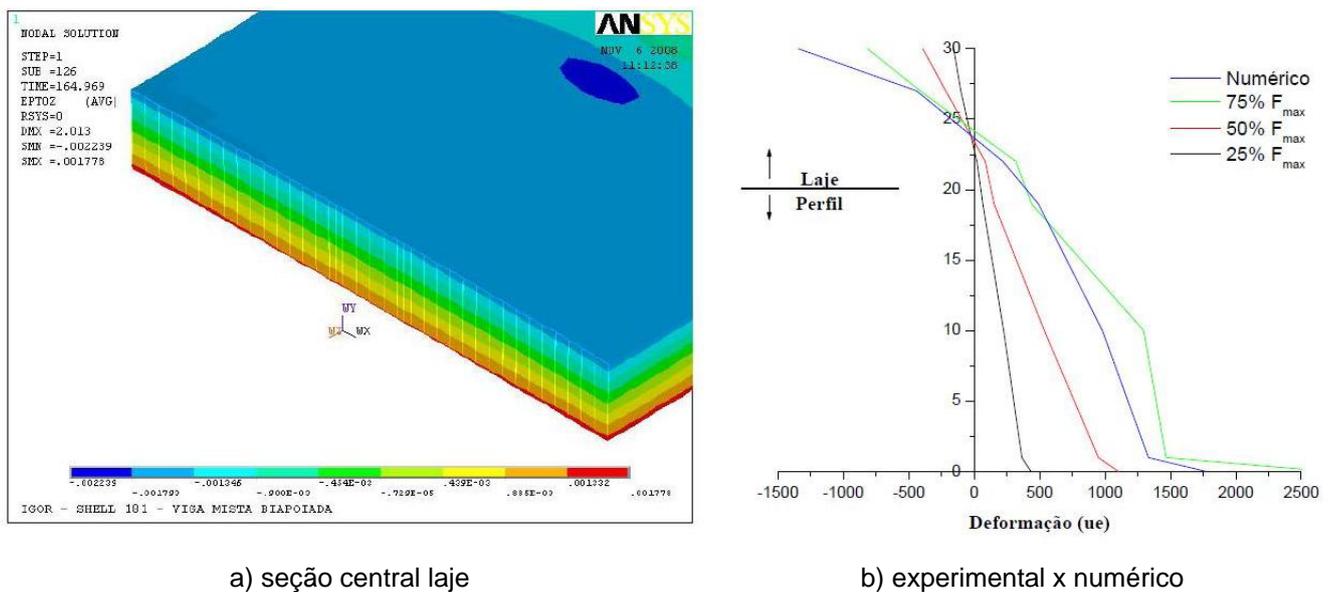


Figura 8 – Força x deformação longitudinal e distribuição de deformações para a viga VM A1.

Outro resultado obtido via modelagem numérica foi também a determinação da posição da linha neutra. A Figura 9 a seguir ilustra as deformações longitudinais obtidas pela estratégia numérica adotada. Por estas deformações é possível identificar a posição da linha neutra de plastificação na laje.



a) seção central laje

b) experimental x numérico

Figura 9 – Diagramas de deformações a meio vão obtidas via modelagem numérica.

4.3.3 Deformação das rosetas e deslocamentos verticais

A tensão de cisalhamento vertical foi comparada ao valor teórico calculado pela expressão conhecida da resistência dos materiais, e pelas deformações obtidas por meio das rosetas foi possível calcular as tensões nas direções principais e a tensão máxima de cisalhamento, admitindo regime elástico. Na Figura 10 são apresentados os gráficos força versus deformação angular, experimental e teórico para as vigas A1 e B1 respectivamente.

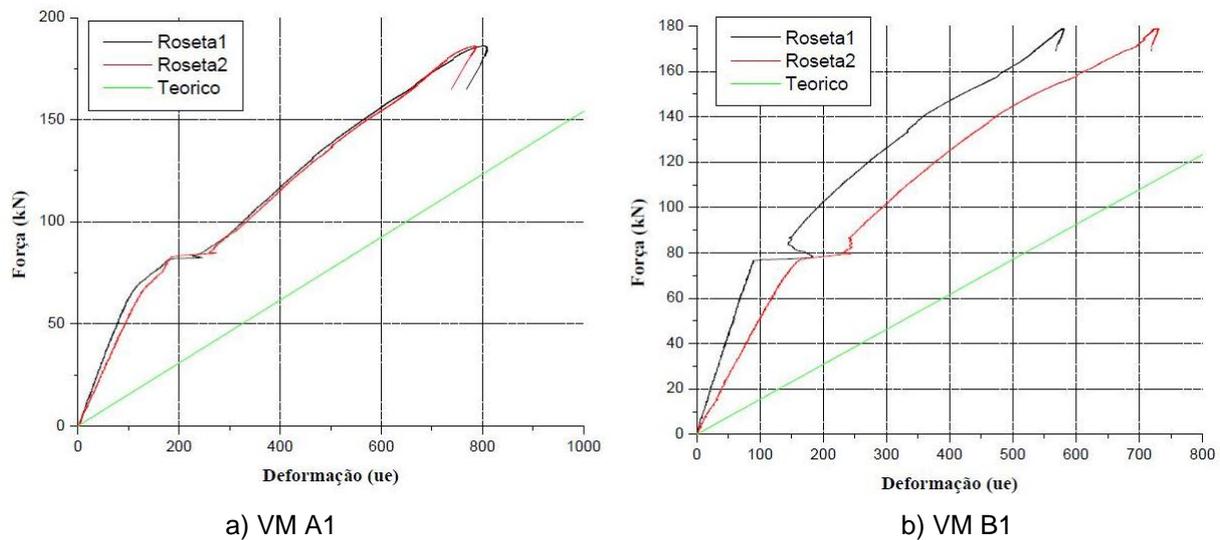


Figura 10 – Força x deformação angular teórico e experimental.

O deslocamento vertical de vigas depende principalmente da rigidez e do tipo de carregamento. Para as vigas mistas ensaiadas neste trabalho, com perfis idênticos, os deslocamentos verticais foram semelhantes, como se pode ver na Figura 11. Analogamente, por meio de uma análise elástica segundo o esquema estático dado pela resistência dos materiais, foi possível obter os deslocamentos teóricos.

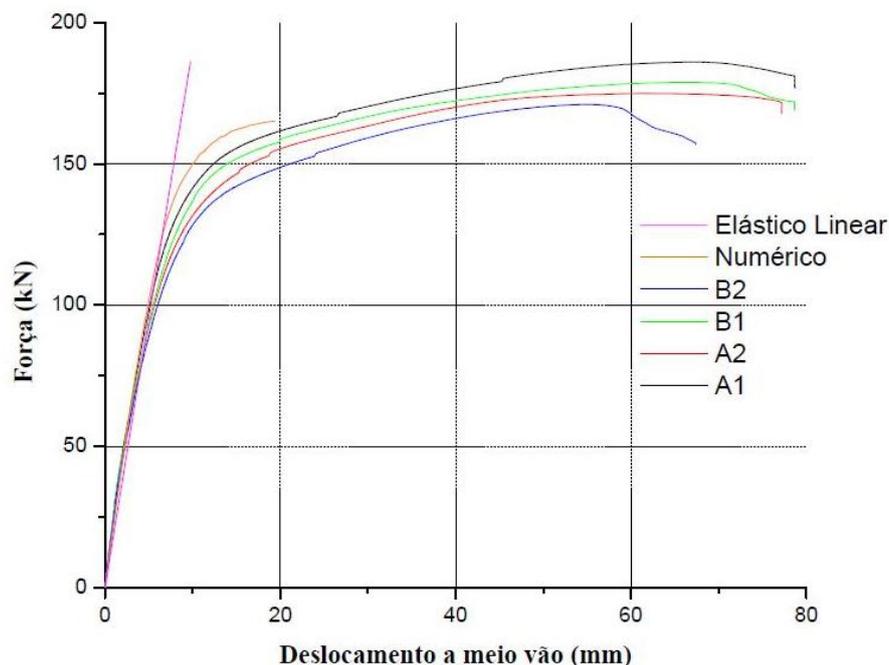


Figura 11 – Força versus deslocamento experimental e numérico para as vigas ensaiadas.

4.3.4 Deslizamento relativo na interface e tensões nos conectores

Pelas curvas da Figura 12 percebe-se que o deslizamento relativo entre a laje e o perfil foi nulo enquanto houve aderência entre eles. A força para a qual essa aderência foi rompida variou de viga para viga. E pelos valores obtidos, considera-se que não houve separação suficiente para classificar

como perda de interação. Portanto, a condição de interação considerada manteve-se verdadeira. Interação completa garantida.

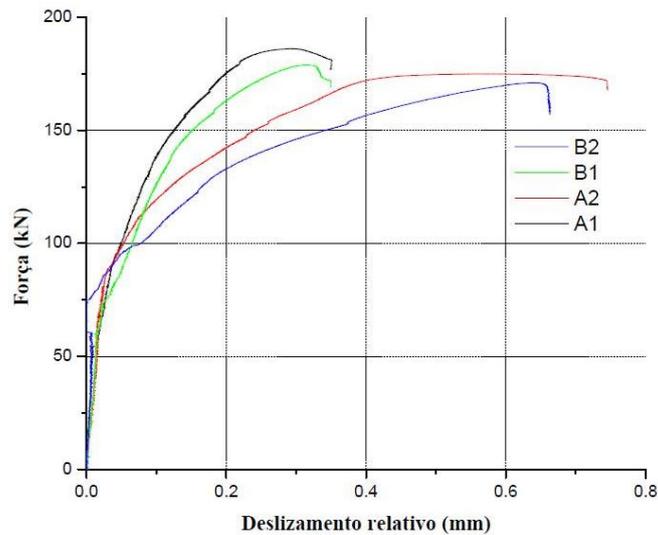


Figura 12 – Comparativo do deslizamento relativo para as vigas ensaiadas.

Segundo a ABNT NBR:8800 (2008), ao dimensionarmos uma viga mista para uma condição de interação completa entre os materiais, é preciso que o somatório das resistências individuais dos conectores de cisalhamento seja superior a força de tração solicitante no perfil de aço. Assim sendo, devido à ductilidade dos conectores, todo o fluxo de cisalhamento é distribuído uniformemente entre eles, de modo a garantir que todos os conectores trabalhem por igual. Esta propriedade foi verificada durante os ensaios experimentais das vigas, onde foram instrumentados dois conectores. Um mais próximo a extremidade (conector 2) da viga e outro na região central (conector 1). Onde nitidamente haveria uma variação na intensidade do fluxo de cisalhamento. E pelos gráficos da Figura 13 podemos ver que os conectores demonstraram trabalhar sua ductilidade e garantir que o fluxo fosse realmente distribuído uniformemente.

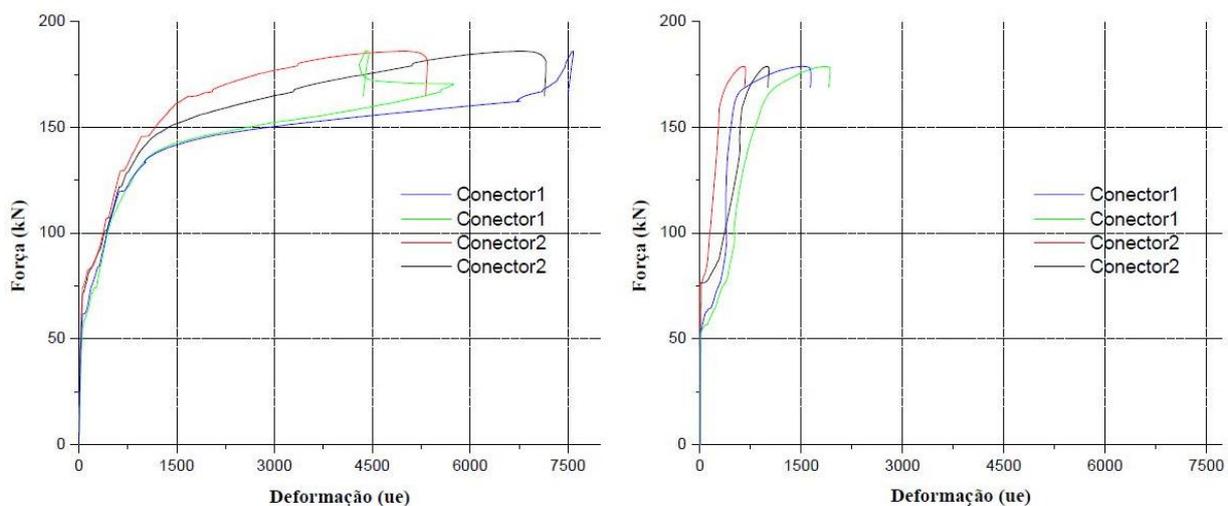


Figura 13 – Comparativo das deformações nos conectores instrumentados.

4.3.5 Avaliação teórica da resistência

Neste item são apresentados os momentos resistentes elásticos e plásticos, teóricos e experimentais. Nas tabelas 7 e 8 estão apresentadas as propriedades mecânicas de cada viga e em seguida nas tabelas 9 e 10 trazem os valores resistentes a um momento fletor positivo analítico, experimental e numérico para as vigas ensaiadas neste trabalho, e um quadro resumo das relações comparativas entre eles respectivamente.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas das vigas mistas

Vigas	E_c (MPa)	f_c (MPa)	E (MPa)	f_y (MPa)	I_a (cm ⁴)	A_a (cm ²)	ΣQ_R (kN)	η_1
VM A1	29124	24,61	200000	281,33	703,04	15,54	719,88	1,64
VM A2	29897	24,58	200000	281,33	703,04	15,54	719,88	1,64
VM B1	29124	24,61	200000	284,00	703,04	15,54	679,85	1,55
VM B2	29897	24,58	200000	284,00	703,04	15,54	679,85	1,55

ΣQ_R é a somatória das resistências individuais dos conectores entre o apoio e o meio do vão;
 η_1 é o parâmetro de avaliação da interação.

Tabela 8 – Momentos de inércia transformados para as vigas

Vigas	¹⁾ Posição do C.G. Transformado (mm)	Momento de Inércia Compatibilizado - I_r (cm ⁴)
VM A1	68,81	4172
VM A2	68,42	4197
VM B1	68,81	4172
VM B2	68,42	4197

1) Tomado a partir da face superior da laje.

Tabela 9 – Momentos resistentes experimentais, numéricos e analíticos

Vigas	Mom. Exp. Plástico (kN·cm)	Mom. Anal. Elástico (kN·cm)	Mom. Anal. Plástico (kN·cm)	Mom. Num. Plástico (kN·cm)
VM A1	10139	5099	8570	8663
VM A2	9554	5121	8566	8663
VM B1	9761	5099	8570	8663
VM B2	9716	5121	8566	8663

Tabela 10 – Relações entre os momentos resistentes

Vigas	$\frac{M_{exp,plástico}}{M_{num,plástico}}$	$\frac{M_{exp,plástico}}{M_{anal,plástico}}$	$\frac{M_{anal,plástico}}{M_{num,plástico}}$
VM A1	1,18	1,17	0,99
VM A2	1,11	1,10	0,99
VM B1	1,13	1,12	0,99
VM B2	1,13	1,12	0,99

5 CONCLUSÃO

Percebeu-se que o estudo das vigas mistas em perfis laminados não é atual, porém, continua a ser uma linha de pesquisa muito estudada. Em se tratando de vigas mistas em perfis formados a frio, poucos estudos foram realizados, por ser uma solução pouco utilizada nos países desenvolvidos.

Pode se concluir com os ensaios que os conectores são classificados como dúcteis segundo o EUROCODE 4:2001, pois apresentaram deslocamentos relativos compatíveis com o limite de aceitação da norma Européia. Concluiu-se também que a resistência individual dos conectores é bastante satisfatória. O que garantirá uma quantidade menor de conectores por unidade de comprimento nos dimensionamentos de vigas mistas.

Em comparação com os conectores tipo U laminados, o ganho estrutural foi significativamente alto. Fato comprovado pela relação peso/resistência, ou seja, para uma menor quantidade de aço e trabalhando a forma do mesmo, pode se obter uma eficiência maior em termos estruturais. Característica amplamente conhecida dos perfis formados a frio. A vista de melhorias construtivas, os conectores são facilmente soldados ao perfil. Trazendo inúmeras vantagens para uma possível industrialização do mesmo. Os valores encontrados analiticamente e através da modelagem numérica se mostraram bastantes coerentes para descrever o comportamento estrutural das vigas. Os deslocamentos máximos medidos foram compatíveis com os determinados tanto analiticamente quanto numericamente dentro de um regime elástico de avaliação.

A posição das linhas neutras de plastificação obtidas experimentalmente, analiticamente e numericamente foram muito próximas. Deformações medidas em dois conectores de cisalhamento mostraram valores muito próximos. Comprovando a ductilidade dos mesmos e chegando a conclusão de que o fluxo de cisalhamento, considerado uniformemente distribuído pela teoria, possui tal comportamento. Os esforços de cisalhamento foram suportados em grande parte pelo concreto de preenchimento dos perfis. Valores estes comprovados pelos resultados tanto experimentais quanto numéricos das vigas. Nesse trabalho foi utilizada uma estratégia de modelar a laje com elementos do tipo casca para representar o comportamento do concreto quando submetido a tensões de tração e compressão simultaneamente. Os quais foram associados ao critério de plastificação de Von Mises para representação do concreto sob tensões de compressão. Tal procedimento mostrou-se eficaz, permitindo aos modelos numéricos alcançar níveis de carregamento próximos aos identificados experimentalmente como, por exemplo, referente à ruptura.

A estratégia final então simulou uma interação completa e sem deslizamento da interface, isso resultou em resistências superiores às experimentais. Porém, comparando a força máxima atingida por cada viga à força máxima experimental, observou-se que os resultados numéricos são inferiores aos resultados experimentais. Os deslocamentos verticais obtidos na simulação foram bem semelhantes aos deslocamentos obtidos analiticamente, de acordo com a equação para cálculo do deslocamento vertical em regime linear sem a consideração do deslizamento na interface. No último estágio de carregamento as tensões na laje foram superiores às tensões de ruptura do concreto, modo de colapso semelhante ao que ocorreu nas vigas ensaiadas experimentalmente. O escopo do presente trabalho foi estudar o comportamento de vigas mistas simplesmente apoiadas, em perfil formado a frio, com ênfase na região da interface entre os materiais e da região de momento positivo.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores são imensamente agradecidos pelo apoio financeiro concedidos pela USIMINAS, a qual foi intermediada pela FIPAI, e o CNPq. Agradecimentos também são feitos para a FAPESP por ter apoiado financeiramente as análises experimentais proporcionando a este trabalho a inclusão no

projeto temático FAPESP e a todos os demais professores, funcionários, alunos e técnicos do departamento de estruturas que com muita atenção e amizade auxiliaram a desenvolver este estudo.

7 REFERÊNCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **AISC**: Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8-69**: Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials. Washington, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto, Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão-Deformação. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Ensaio de Compressão de Corpos de Prova. Rio de Janeiro, 1994.

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.

DAVID, D.L. **Vigas mistas com laje treliçada e perfis formados a frio: análise do comportamento estrutural**. 2003. 218 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

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**. 2007. 256 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 4**: Design of Composite steel and concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings. Bruxelles, 2001.

MALITE, M. **Sobre o Cálculo de Vigas Mistas Aço-Concreto: Ênfase em Edifícios**. 1990. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

MALITE, M. **Análise do comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis de chapa dobrada**. 1993. 2 v. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

SLUTTER, R. G.; DRISCOLL, G. C. Flexural strength of steel-concrete composite beams. **Journal of the Structural Engineering – ASCE**, v. 91, n. ST2, p. 71-99. 1965.

VIEST, I. M.; FOUNTAIN; SINGLETON. Investigation of stud shear connectors for composite concrete and steel T-beams. **Journal of the American Concrete Institute**. v. 27, n. 8, p. 875-891. 1958.

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

