

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS NO COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO MISTA VIGA-PILAR PREENCHIDO COM CHAPA PASSANTE

Influence of geometric parameters on the behavior of composite connection between composite beam and concrete filled steel tube column with through plate

Rafael Pereira Tineo¹, Silvana De Nardin²

Recebido em 26 de abril de 2016; recebido para revisão em 29 de julho de 2016; aceito em 28 de agosto de 2016; disponível on-line em 17 de novembro de 2016.



PALAVRAS CHAVE:

Ligação viga-pilar;
Elementos mistos;
Ligação mista;
Análise numérica;
Elementos finitos.

KEYWORDS:

Beam-to-column connections;
Composite structures;
Composite connections;
Numerical analysis;
Finite elements.

RESUMO: Neste artigo é apresentado o desenvolvimento de um modelo numérico de ligação mista viga-pilar preenchido com chapa passante. Além do desenvolvimento do modelo, foram realizadas análises paramétricas com objetivo de avaliar a influência de parâmetros geométricos tais como taxa de armadura da laje, perfis de aço da viga mista e diâmetro dos parafusos. O estudo deu-se por meio das seguintes etapas: desenvolvimento de modelo numérico validado com base em resultados experimentais encontrados na literatura e posterior análise paramétrica. Para a modelagem numérica utilizou-se o pacote computacional Ansys® por meio do método dos elementos finitos. São apresentadas as principais diretrizes adotadas na escolha dos elementos finitos, propriedades dos materiais e relações constitutivas, condições de contorno e vinculações, carregamentos e outros aspectos referentes à modelagem numérica. Os resultados mostraram que dentre os parâmetros analisados, a taxa de armadura resultou no parâmetro mais significativo para a capacidade resistente da ligação mista. As principais contribuições do estudo compreendem, a apresentação da influência de determinados fatores na capacidade resistente da ligação mista viga-pilar com chapa passante, bem como a comprovação da eficácia da metodologia de estudo de ligações por meio de análises numéricas.

ABSTRACT: In this paper is presented the development of a numerical model of a composite connection connecting a composite beam to a concrete filled steel tube column using a through steel plate. In addition to the development of the model, parametric analyses were performed in order to evaluate the influence of geometric parameters such as reinforcement ratio of slab, I-steel sections of composite beam and diameter of the bolts. The study came about through the following steps: development of numerical model validated by comparison with experimental results and after parametric analysis. The software Ansys® and finite element methods were used in the numerical analyses. The main guidelines adopted in the choice of finite elements, material properties and constitutive relationships, boundary conditions and restrains and other aspects of numerical modeling are presented and discussed in this paper. The numerical results showed the reinforcement ratio of the slab is the most significant parameter to the resistance capacity of the beam-to-column connection. The main contributions of this study include the presentation of the influence of the geometric parameters to the resistance capacity of the beam-to-column connection, as well as proof of the effectiveness of the methodology of study of connections by numerical analyses.

* Contato com os autores:

¹ e-mail: rptineo@gmail.com (R. P. Tineo)

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar.

² e-mail: snardin@ufscar.br (S. De Nardin)

Professora do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar.

1. INTRODUÇÃO

A busca pela eficiência na utilização dos materiais é extremamente importante na engenharia, tanto do ponto de vista de qualidade dos materiais, aspectos estruturais, como produtividade e produção nos canteiros de obras. Aliado a essa característica fundamental da própria engenharia, tem-se as necessidades atuais que impulsionam a demanda por estruturas mais arrojadas e eficientes, materiais mais sustentáveis e maior produtividade de mão de obra, por exemplo. Dentro dessa linha de pesquisa destacam-se os elementos mistos de aço e concreto como uma alternativa capaz de englobar e viabilizar as demandas citadas anteriormente. Os elementos mistos de aço e concreto, resultantes da associação de um perfil de aço, concreto estrutural e algum método para promover o comportamento conjunto, permitem a união de aspectos positivos dos materiais de maior utilização na construção civil, naturalmente buscando minimizar os pontos fracos de cada um destes materiais.

No Brasil, os principais elementos mistos de aço e concreto, são abordados pela NBR 8800 (ABNT, 2008), que contempla pilares, vigas, lajes e ligações mistas. No tocante aos pilares mistos, podem ser preenchidos, parcialmente revestidos, ou revestidos, variando entre si pela disposição do concreto em relação ao perfil de aço. As vigas mistas geralmente são compostas por perfis de aço tipo “I” soldados ou laminados, ou por perfis treliçados, conectados à laje de concreto ou mista de modo que ambas participem da transmissão de esforços. No caso das vigas mistas, a interação ente os componentes de aço e de concreto é criada por meio de dispositivos mecânicos denominados de conectores de cisalhamento, os quais podem variar quanto à forma e métodos de aplicação. As lajes mistas apresentam em sua composição a presença de forma de aço incorporada a qual, após o endurecimento do concreto, trabalha de modo conjunto com o concreto e funciona como parte ou como a totalidade da armadura de tração da laje. As formas de aço utilizadas nas lajes mistas trazem uma série de vantagens ao processo construtivo das edificações, eliminando a presença de formas

transitórias e, eventualmente, dispensando na totalidade os escoramentos, além de questões de segurança, limpeza e desperdício de materiais. Definem-se como mistas, as ligações viga-viga e viga-pilar em que a armadura da laje de concreto participa da transmissão de momento fletor (NBR 8800, ABNT, 2008). Alguns detalhes de ligações mistas pré-qualificados são contemplados pela norma brasileira de estruturas de aço e mistas (NBR 8800, ABNT, 2008) no entanto, estes sempre envolvem pilares em aço. Nada é dito quanto às ligações com pilares mistos de aço e concreto.

Além deste aspecto, que por si só já justifica o desenvolvimento de estudos abordando detalhes de ligação viga-pilar quando o pilar é misto, há outro fator extremamente importante que é conhecer o comportamento momento vs. rotação da ligação viga-pilar. Para isto, há duas metodologias: a realização de ensaios experimentais com a construção de modelos físicos de grandes dimensões e a realização de simulações numéricas. Vale ressaltar que esta última depende de resultados experimentais para validação do modelo numérico e que a metodologia mais usual é combinar resultados experimentais com simulações numéricas que permitem extrapolar a abrangência dos primeiros.

Com relação às simulações numéricas, dois fatores principais justificam os estudos de ligações por meio desta metodologia: os avanços computacionais e dos programas que utilizam o método dos elementos finitos facilitaram o desenvolvimento de estudos utilizando esta ferramenta e, as dificuldades e custos na execução de ensaios laboratoriais de ligações levam à busca de ferramentas confiáveis e que facilitem a obtenção de resultados complementares à investigação experimental.

2. OBJETIVO

Dentro do contexto apresentado, o objetivo do presente estudo é desenvolver um modelo numérico representativo do comportamento de uma ligação mista com chapa passante, utilizada para conectar a viga mista ao pilar misto preenchido de seção quadrada. Nesta

linha pode-se dividir o objetivo do presente trabalho em duas principais etapas: a validação do modelo desenvolvido por meio da análise comparativa entre os resultados numéricos e experimentais, além das análises paramétricas, as quais possibilitam avaliar a influência de parâmetros não investigados experimentalmente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estudos visando o desenvolvimento de detalhes de ligação viga-pilar considerando pilares mistos do tipo preenchido é bastante recente e ainda não resultou em metodologias normativas com estabelecimento de critérios para o seu dimensionamento e verificação.

Na literatura técnica e científica são encontrados estudos envolvendo: a ligação mista entre vigas mistas e pilares de aço e a ligação de aço entre pilares preenchidos e vigas de aço. No tocante à ligação mista entre vigas mistas e pilares de aço, os estudos mais relevantes tiveram início na década de 1990 (LEON, 1990). Em 1996 são divulgados resultados de uma série de ensaios com modelos físicos visando avaliar o comportamento das ligações mistas e identificar os fatores que mais interferem em seu comportamento momento vs. rotação (XIAO et al., 1996). A influência de parâmetros no comportamento das ligações mistas pode ser dividida na influência dos componentes e na configuração da ligação. Em relação aos componentes, sua influência se dá pela relação força-deformação de cada componente e pelos braços de alavanca entre os diversos componentes. Vale lembrar que, tanto a relação força-deformação quanto os braços de alavanca são influenciados pela configuração da ligação. A configuração, por sua vez, influencia os principais parâmetros da ligação que são: rigidez inicial, resistência e capacidade rotacional. Em geral, cada componente tem comportamento força-deformação não linear e limitações que podem ocasionar a falha da ligação como um todo. Quanto e como cada componente contribui para o comportamento global da ligação depende da sua localização, mas, principalmente, da sua localização em relação à linha neutra. O grau de interação entre os componentes também é

importante, no entanto, admite-se que o comportamento isolado de um componente sob um carregamento específico será sempre o mesmo, independentemente de sua posição ou arranjo na ligação.

Quanto à configuração, de maneira geral, ligações com alta rigidez e resistência têm sua capacidade resistente limitada pela instabilidade local na região comprimida e por deformação excessiva de algum dos componentes. Cantoneiras de mesa e de alma são frequentemente usadas devido ao baixo custo de fabricação e montagem, entretanto, não proporcionam a mesma continuidade que as ligações com chapa de extremidade ou soldadas. Uma consequência imediata do uso de cantoneiras em ligações de aço é o aumento das dimensões da viga.

Em se tratando de ligações mistas envolvendo pilares de aço, dois detalhes de ligação vêm sendo bastante explorados ao longo das últimas décadas: a ligação com cantoneiras de alma e de assento (LEON, 1990) e a ligação com chapa de extremidade (XIAO et al., 1996). Em relação à ligação com chapa de extremidade, a atuação de momentos não balanceados e variação na relação cortante/momento foram investigados por Li et al. (1996) e Li e Lawson (2000). Resultados experimentais e numéricos mostraram que a taxa de armadura é o parâmetro que mais contribui para aumentar o momento resistente da ligação mista. Contudo, sua contribuição está limitada por fatores como a espessura da alma e da mesa da viga. Há, portanto, uma taxa de armadura ótima, a partir da qual a resistência da ligação mista passa a ser comandada pela resistência do perfil de aço (LI et al., 1996). Logo, os fatores de controle do momento resistente de uma ligação mista variam dependendo da geometria da ligação e dos elementos que a compõem. A contribuição da taxa de armadura fica limitada por estes fatores de controle e conhecer a contribuição de cada elemento é importante para um bom projeto da ligação mista.

Outro parâmetro importante para a capacidade resistente da ligação mista com chapa de extremidade é a altura do perfil de aço; sua influência torna-se mais evidente quando o perfil de aço tem altura elevada, pois ocorre grande rotação

antes da ruptura da armadura (BROWN e ANDERSON, 2001).

No que se refere às ligações entre pilares mistos e demais elementos estruturais, como já mencionado anteriormente, os estudos se concentram, na grande maioria, em detalhes que não levam em conta a armadura da laje, ou seja, apenas os componentes de aço. Uma síntese de detalhes de ligação envolvendo pilares preenchidos e vigas de aço foi apresentada por De Nardin et al. (2007), de forma ilustrativa, visando reunir diversas alternativas para conectar vigas de aço a pilares preenchidos. Um dos poucos estudos contemplando a ligação mista e pilares mistos preenchidos consistiu na investigação experimental de ligação com de chapa passante e mostrou-se bastante eficiente (MALASKA, 2000). O inconveniente desta ligação é que só pode ser aplicada para pilares internos, com vigas conectadas às duas extremidades (Figura 1a). A ligação com chapa passante também foi a metodologia utilizada por De Nardin (2007) para conectar viga mista a pilar preenchido constituindo uma ligação mista (Figura 1b), no entanto, neste estudo, o objetivo era avaliar a influência do tipo de laje no comportamento, capacidade resistente e rotacional da ligação.

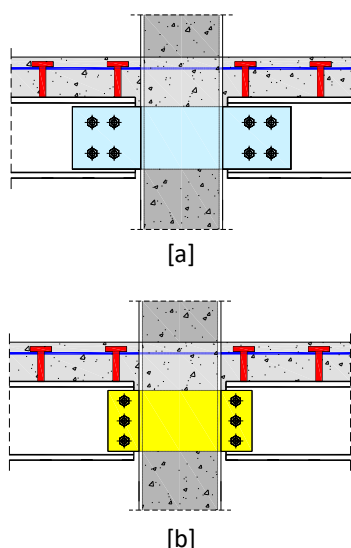


FIGURA 1: Ligação mista e pilar preenchido, sendo:
[a] Ligação com chapa passante (Malaska, 2000);
[b] Ligação estudada por De Nardin (2007).

FONTE: De Nardin (2007).

A representação do comportamento da ligação via modelagens numéricas é uma técnica

extremamente útil e que complementa a abrangência dos ensaios em modelos físicos. Além de demandar menor investimento monetário, a modelagem numérica demanda menor tempo de preparo e construção dos modelos. Neste sentido, há diversos estudos brasileiros que se destinaram ao desenvolvimento de modelagens numéricas abordando as ligações viga-pilar, como por exemplo, Tristão (2006), Farias (2008), Bessa (2009), Conceição (2011) e Kataoka e El Debs (2014). Alguns destes estudos tem caráter essencialmente de modelagem numérica e outros trazem, além de detalhes da modelagem, um amplo programa experimental. Os estudos envolvendo modelagens numéricas fazem uso de pacotes computacionais como o *Abaqus*[®], como os observados em Farias (2008), Gil e Bayo (2008) e Smitha e Satish Kumar (2013), o *Diana*[®], Kataoka e El Debs (2014), ou o *Ansys*[®], por Tristão (2006) e Conceição (2011), como ferramentas principais para o desenvolvimento das modelagens numéricas.

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para o desenvolvimento do modelo numérico foi utilizado o pacote computacional *Ansys*[®], baseado no método dos elementos finitos, e a plataforma denominada *Mechanical APDL*.

4.1 CARACTERÍSTICAS DO MODELO FÍSICO

O primeiro passo para a construção de um modelo numérico consiste na inserção da geometria dos componentes do modelo. O modelo físico a ser representado via modelagem numérica consiste de uma ligação mista viga-pilar, constituída por chapa passante (Figura 2b) e cujo pilar misto é do tipo preenchido (Figura 2a).

A ligação mista viga-pilar trata-se de um modelo cruciforme composto por viga mista e pilar misto. O perfil “I” é do tipo soldado VS 250 x 37 kg/m. Em cada perfil “I” de aço foram soldados 10 conectores tipo pino com cabeça, com 75 mm de altura, espaçados de 15 cm e com resistência a ruptura de 415 MPa, fornecida pelo fabricante. O pilar preenchido tem seção quadrada com 200 mm de largura e perfil de aço com espessura de 6,3 mm em aço SAE 1020. Como material de preenchimento

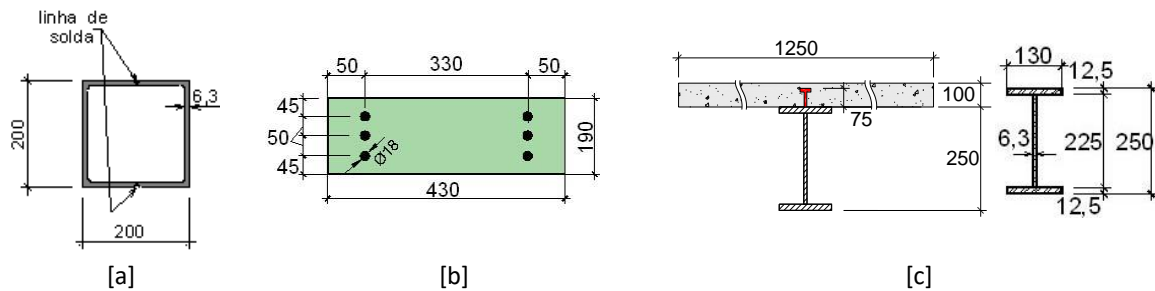


FIGURA 2: Geometria dos componentes da ligação mista viga-pilar preenchido, sendo:
[a] Pilar preenchido; [b] Chapa passante; [c] Viga mista.

FONTE: De Nardin (2007).

foi utilizado concreto com aproximadamente 60 MPa de resistência à compressão. Os perfis para composição dos pilares preenchidos foram obtidos a partir da soldagem de dois perfis “U” de 200 x 100 x 6,3 mm formando uma seção quadrada com 200 mm de lado e 1950 mm de comprimento (Figura 2a).

A laje em concreto armado convencional possui 125 cm de largura, 10 cm de altura e taxa de armadura negativa igual a 1% da área de concreto, barras com mossas em aço CA-50. Para a ligação com chapa passante foi utilizada chapa de aço de 19 mm de espessura, com 430 mm de comprimento e 190 mm de altura (Figura 2b). Em cada extremidade da chapa foi conectada uma viga mista, por meio de parafusos com 16 mm de diâmetro, em aço alta resistência ASTM A325, sendo utilizados três parafusos de cada lado da ligação (Figura 3).

4.2 ELEMENTOS FINITOS

Para modelar os diversos componentes da ligação mista foram utilizados os elementos finitos *Shell181* (para perfis de aço e chapas), *Solid65* (para a laje de concreto armado e o núcleo do pilar misto), *Beam189* (para conectores de cisalhamento e parafusos) e algumas superfícies de contato que foram modeladas utilizando o par de contato *Conta173* e *Targe170* (Figura 4).

A armadura negativa da laje foi representada por meio de taxa de armadura tomada em relação ao volume de concreto posicionado acima do nível dos conectores de cisalhamento, simulando a posição real das armaduras no modelo físico. Esta é uma propriedade que pode ser fornecida ao elemento finito *Solid65* utilizado para representar a laje de concreto.

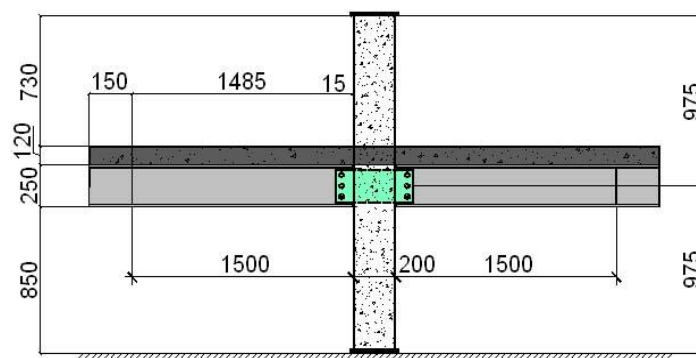


FIGURA 3: Geometria da ligação mista.

FONTE: De Nardin (2007).

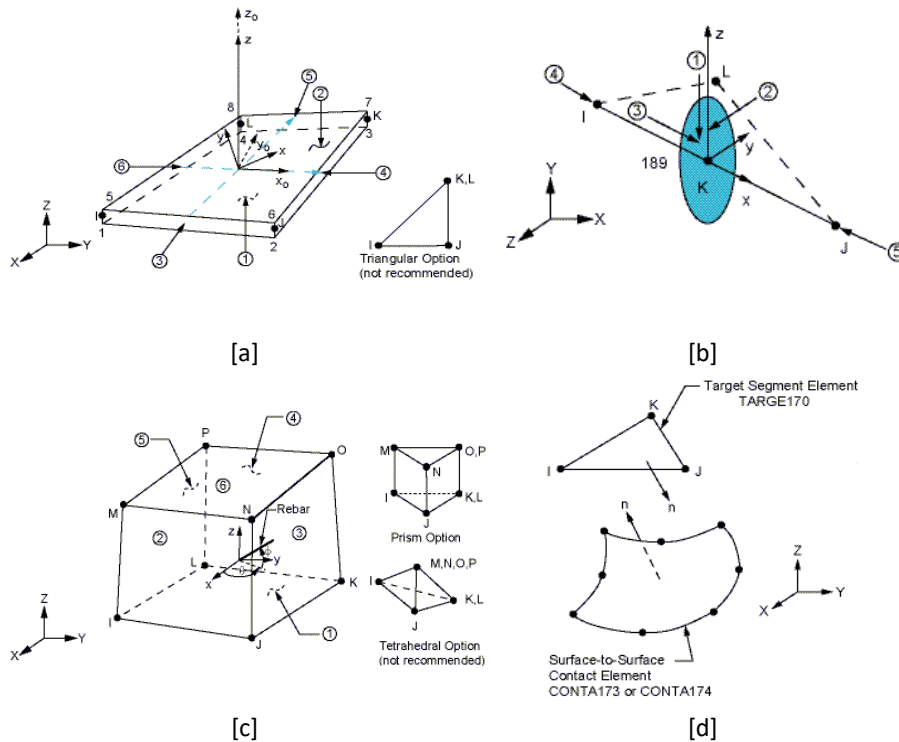


FIGURA 4: Tipos de elementos finitos, sendo: [a] Shell181; [b] Beam189; [c] Solid65 e [d] Conta173 e Targe170.

FONTE: Ansys, (2011).

4.3 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Para a representação do comportamento dos materiais foram utilizados dois modelos constitutivos. O modelo multilinear com encruamento isotrópico, MISO (*Multilinear Isotropic Hardening*) e o modelo multilinear com encruamento cinemático, KINH (*Multilinear Kinematic Hardening*).

O modelo multilinear com encruamento isotrópico foi considerado para o material aço das armaduras e para o concreto. Enquanto que o modelo com encruamento cinemático foi adotado para os demais materiais de aço, ou seja, dos perfis e chapa, parafusos, e conectores de cisalhamento.

A relação constitutiva do material concreto baseou-se no modelo apresentado no EN1992-1-1 (2004), cuja relação tensão-deformação é ilustrada esquematicamente na Figura 5d e descrita pela Equação 1.

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \quad \text{Eq. [1]}$$

Sendo,

$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_{c1}} \quad \text{Eq. [2]}$$

$$\epsilon_{c1} (\%) = 0,7 f_{cm}^{0,31} < 2,8 \quad \text{Eq. [3]}$$

$$k = \frac{1,05 E_{cm} |\epsilon_{c1}|}{f_{cm}} \quad \text{Eq. [4]}$$

Em que:

σ : tensão de compressão no concreto (MPa);

f_{cm} : resistência principal do concreto à compressão (MPa);

ϵ_{c1} : deformação no concreto correspondente a tensão máxima (%);

E_{cm} : módulo de elasticidade do concreto (MPa).

Os modelos constitutivos representados na Figura 5, foram ainda corrigidos por meio das relações que consideram a diminuição das seções durante os ensaios caracterizadores dos materiais, segundo proposto por Maggi (2004). As Equações 5 e 6 indicam as correções das tensões e das deformações que foram realizadas.

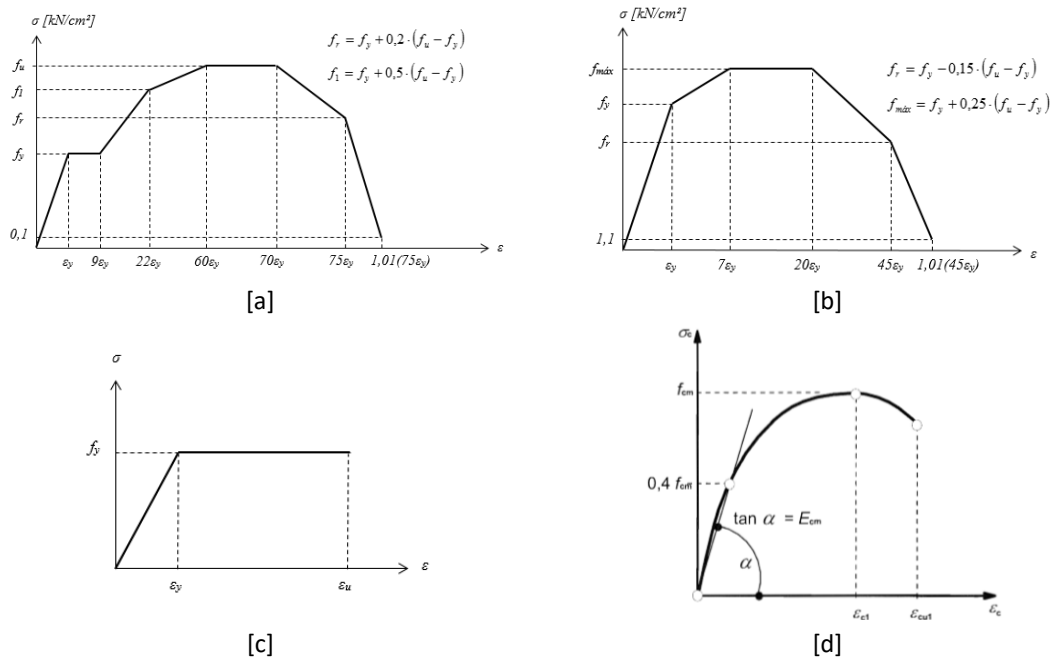


FIGURA 5: Modelos constitutivos, sendo: [a] Aços dos perfis e chapa passante; [b] Aços dos parafusos e conectores; [c] Aço das armaduras e [d] Aço das armaduras.

FONTE: EN1992-1-1 (2004).

$$\epsilon' = \ln \cdot (1 + \epsilon) \quad \text{Eq. [5]}$$

$$\sigma' = \sigma \cdot (1 + \epsilon) \quad \text{Eq. [6]}$$

Em que:

σ : tensão (kN/cm²);

ϵ : deformação específica (cm/cm).

4.4 ACOPLAMENTOS, CONDIÇÕES DE CONTORNO E SUPERFÍCIES COM CONTATO

Os acoplamentos permitem estabelecer correspondências de graus de liberdade entre dois nós. Neste modelo de ligação mista alguns acoplamentos foram utilizados como ferramenta para informar ao pacote computacional onde não deveria haver separação entre componentes. Foi o caso dos acoplamentos entre os nós do núcleo de concreto e as paredes do perfil tubular do pilar misto, de modo que ficasse caracterizado o comportamento conjunto entre os materiais. Os nós das laterais do pilar misto, e isso incluem os nós do perfil tubular e do núcleo em concreto, foram acoplados em todas as direções de translações (X, Y e Z) e rotações (X, Y e Z), totalizando os seis graus de liberdade. Além disto, foram utilizados acoplamentos entre os conectores de cisalhamento,

simultaneamente com a laje de concreto e com a mesa do perfil da viga mista. Ambos visando representar o comportamento conjunto e o grau de interação total na viga mista. Entre a base do conector e a mesa superior do perfil da viga mista considerou-se todos os graus de liberdade envolvidos. Por outro lado, no ponto superior acoplou-se o nó do conector com o nó da laje coincidente, apenas para as translações nas direções X, Y e Z.

Outro ponto fundamental para o acoplamento de nós foi a região da ligação parafusada, entre parafuso e furo a interação foi representada por acoplamento de nós. Para os nós superior e inferior foram acoplados apenas os nós laterais das bordas dos furos. Além disso, para o parafuso superior considerou-se os nós mais próximos da face do pilar misto, já para o parafuso inferior apenas os nós mais afastados da face do pilar foram acoplados - Figura 6d. Para o parafuso intermediário todos os nós das bordas dos furos foram acoplados. Os acoplamentos dos nós foram realizados independentemente e de forma separada em duas etapas, para o furo da alma da viga mista e outra para o furo da chapa passante. Dessa forma, para os parafusos superior e

intermediário foram acopladas as translações nas direções X, Y, Z e as rotações nas direções X e Z aos nós das bordas. Para o parafuso inferior acoplaram-se os nós em todas as direções (translações e rotações).

Na modelagem foi considerada a simetria na maior direção da ligação, localizada no plano médio do pilar misto, permitindo representar apenas metade da ligação e reduzir o custo computacional. Para tanto, impediram-se as translações na direção X e as rotações nas direções Y e Z. Outra condição de contorno introduzida foi a restrição dos deslocamentos na base do pilar, nas três direções ortogonais (X, Y e Z).

Na região de contato entre o perfil de aço e a laje de concreto da viga mista foi utilizado o par de contato via elementos finitos *Conta173* e

Targe170. A metodologia e os parâmetros utilizados na determinação do par de contato entre a laje e a viga mista foram baseados em estudo numérico de vigas mistas desenvolvido por outro pesquisador (KOTINDA, 2006). Para a coesão entre os materiais aço e concreto foi adotado o valor de $0,18 \text{ kN/cm}^2$. O coeficiente de atrito entre ambos os materiais foi considerado igual a 0,4. O método de solução para o contato entre os elementos finitos considerados foi o *'Pure Lagrange Multiplier'*, considerando penetração nula quando o contato está fechado e escorregamento também nulo até que se atinja o valor limite da coesão entre as superfícies em contato. Na presente simulação foi considerado o valor $0,01 \text{ cm}$ como o mínimo para penetração e, para o mínimo valor de tensão de tração para abertura do contato o equivalente à coesão.

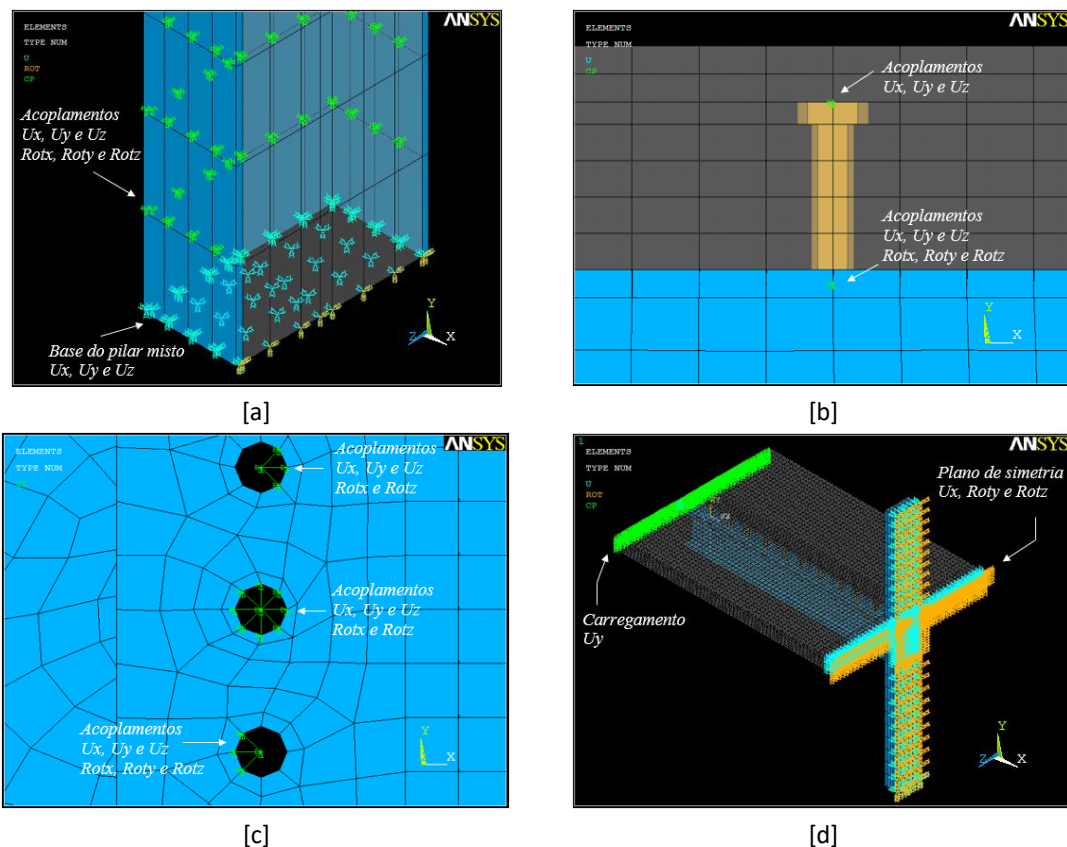


FIGURA 6: Condições de contorno e acoplamentos, sendo: [a] Pilar: restrição na base e acoplamentos; [b] Conector de cisalhamento; [c] Parafusos e [d] Condição de simetria.

FONTE: Autoria própria.

4.5 CARREGAMENTOS APLICADOS

No ensaio do modelo físico foram aplicados dois carregamentos: um de compressão axial centrada no valor de 500 kN, no pilar preenchido, mantido constante ao longo de todo o ensaio (Figura 7a). Esta força de compressão foi aplicada visando estabilizar o modelo físico e representar o efeito de pavimentos superiores. Nas extremidades das vigas mistas, distante 150 cm da face externa do pilar misto foram aplicadas forças verticais estáticas e crescentes até a ruptura do modelo. Estas forças foram aplicadas com controle de deslocamento.

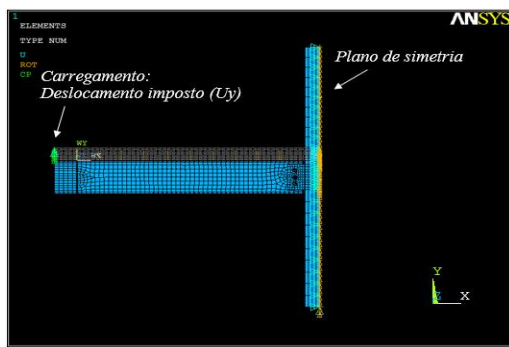
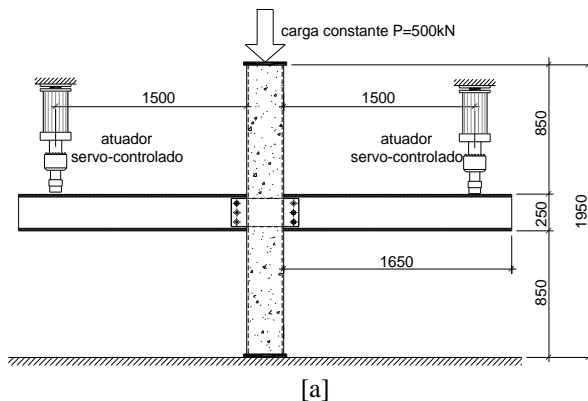


FIGURA 7: Forças aplicadas: [a] no modelo físico (De Nardin, 2007) e [b] no modelo numérico.

FONTE: Autoria própria

No modelo numérico, a força nas extremidades das vigas foi aplicada via deslocamentos impostos. Isto foi feito com o intuito de melhor representar a condição de ensaio e melhorar a convergência do modelo numérico. Para isso, acoplou-se a face externa da laje, impondo que todos os nós na linha de aplicação da força apresentassem o mesmo deslocamento vertical.

Feito isso, o deslocamento foi aplicado ao longo do tempo, por meio de incrementos de deslocamentos. Os passos do deslocamento foram determinados a partir da quantidade imposta de passos, no caso 500 passos. Durante a aplicação da força variável via deslocamentos o pacote computacional podia reduzir ou aumentar, de forma automatizada, o tamanho do passo visando a convergência. Vale ressaltar que, tendo em vista o efeito apenas estabilizador da força aplicada no pilar do modelo físico, no modelo numérico a mesma foi suprimida. Ainda com relação à modelagem numérica, optou-se pelo método de Newton-Raphson Modificado para solução.

5. RESULTADOS

Os resultados da modelagem numérica serão divididos em duas etapas: validação e análise paramétrica. Na etapa de validação os resultados da modelagem numérica são comparados com resultados experimentais obtidos por De Nardin (2007). Uma vez validado o modelo numérico, este foi então utilizado para avaliar a influência de parâmetros geométricos como: taxa de armadura negativa da laje, dimensões do perfil da viga mista e diâmetro dos parafusos sobre o momento resistente e rotação da ligação mista.

5.1 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Para a validação do modelo numérico foram considerados os deslocamentos verticais medidos em quatro pontos ao longo da viga mista e a rotação da ligação mista. Os resultados de deslocamento vertical numéricos são comparados aos valores experimentais na Figura 8 e verifica-se que o modelo numérico consegue reproduzir a trajetória de comportamento dos deslocamentos.

Na Figura 9 as curvas momento vs. rotação numérica e experimental são comparadas e percebe-se que o modelo numérico reproduz satisfatoriamente o comportamento e o momento máximo na ligação. Verifica-se que o valor de rotação máxima (correspondente ao momento máximo) do modelo numérico é bastante superior ao valor experimental.

Uma análise mais precisa pode ser feita a partir dos resultados máximos experimentais e da simulação numérica mostrados na Tabela 1. Verifica-se excelente correlação entre os valores de força e uma boa correlação dos momentos máximos, o mesmo não ocorrendo com os deslocamentos na extremidade das vigas mistas e rotação para correspondente ao momento máximo.

Sabe-se que devido à natureza altamente não linear das curvas momento vs. rotação, há recomendações normativas para que a rigidez rotacional seja tomada no ponto correspondente a 2/3 do momento máximo, segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) e EN1993-1-8 (2005). Tomando os valores correspondentes a 2/3 do momento máximo, nas curvas experimental e numérica, são

obtidos os resultados mostrados na Tabela 2. Na mesma tabela também são apresentados os valores de momento, rotação e rigidez inicial (S_i) calculados com base na perda de linearidade visual da curva Momento vs. Rotação (Figura 9).

Do exposto na Tabela 2 e Figura 9, conclui-se que o modelo numérico representa, de forma bastante satisfatória, os valores máximos de força e momento fletor. No caso da rigidez inicial, a melhor representatividade do modelo numérico foi verificada ao calcular a rigidez inicial adotando os valores de momento e rotação correspondentes a 2/3 do valor do momento máximo. Assim, para efeitos de análise paramétrica, a rigidez inicial será calculada sempre para o par momento-rotação tomado a 2/3 do momento máximo.

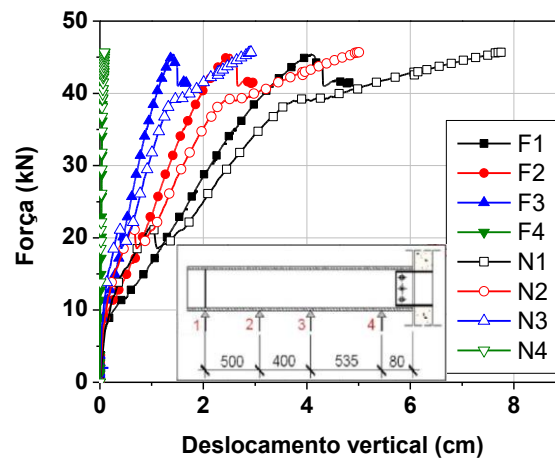


FIGURA 8: Força vs. Deslocamento vertical - Modelos físico e numérico.
FONTE: Autoria própria.

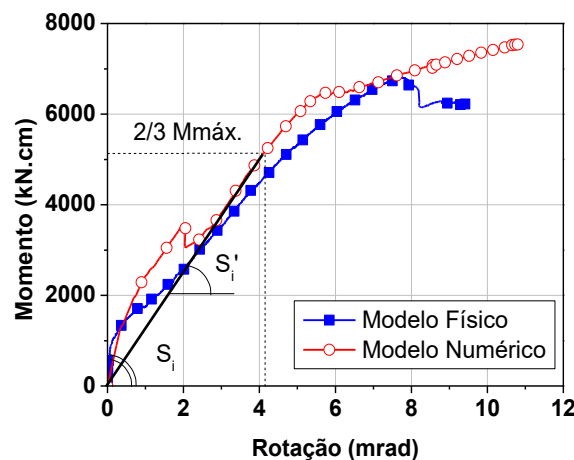


FIGURA 9: Momento vs. rotação - modelos físico e numérico de validação.
FONTE: Autoria própria.

TABELA 1: Valores máximos experimentais e da análise numérica.

Modelos	Força (kN)	Deslocamento (cm)	Momento (kN.cm)	Rotação (mrad)
Físico	45,39	4,89	6807,7	9,05
Numérico	45,80	7,78	7556,6	10,84 (+19,8%)

FONTE: Autoria própria.

TABELA 2: Valores de momento, rotação e rigidez inicial.

Modelos	Análise gráfica			NBR 8800 / EN1993:1-8		
	Momento (kN.cm)	Rotação (mrad)	Rigidez inicial S_i (kN.cm/mrad)	Momento (kN.cm)	Rotação (mrad)	Rigidez inicial S_i' (kN.cm/mrad)
Físico	1032,70	0,11	9388,2	4538,5	4,06	1117,9
Numérico	1294,29	0,34	3806,7	5037,71	4,01	1256,3 (+12,4%)

FONTE: Autoria própria.

5.2 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Após a etapa de validação do modelo numérico, este pode ser utilizado como uma ferramenta para avaliar a influência de parâmetros geométricos. Neste sentido, os seguintes parâmetros foram avaliados: taxa de armadura negativa da laje, perfil "I" da viga mista (altura total da seção e espessura da alma) e diâmetro dos parafusos. Os principais resultados oriundos da avaliação de cada um destes parâmetros são apresentados e discutidos a seguir.

5.2.1 Taxa de armadura negativa da laje

Para avaliar a influência da taxa de armadura negativa da laje de concreto foram

mantidas as mesmas dimensões e materiais do modelo experimental, com variação apenas na quantidade de armadura (taxa de armadura). Cada modelo numérico foi analisado com área de armadura correspondente a uma determinada taxa, expressa em porcentagem em relação à área de concreto (%). De acordo com o conjunto de curvas momento vs. rotação ilustrado na Figura 10, verifica-se que a variação da taxa de armadura entre os valores 0,5% e 2% da área de concreto não produziu mudanças expressivas de comportamento.

A Tabela 3 apresenta os valores de força, momento máximo e rigidez inicial para as diferentes taxas de armaduras negativas da laje analisadas.

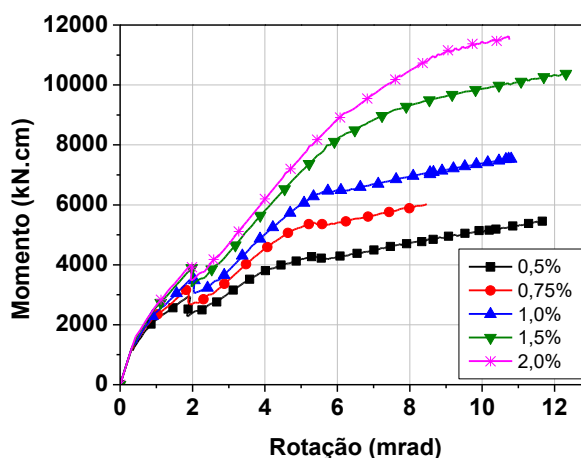


FIGURA 10: Momento vs. Rotação - Taxas de armadura.

FONTE: Autoria própria.

TABELA 3: Influência da taxa de armadura negativa da laje.

Taxa (%)	Força (kN)	Momento Máximo (kN.cm)	Rigidez inicial S_i' (kN.cm/mrad)
0,50	33,14	5467,5	969,4
0,75	36,49	6021,5	1160,2
1,00*	45,39	6807,7	1117,9
1,50	63,30	10445,2	1424,0
2,00	70,49	11630,9	1520,4

(*) modelo experimental (físico)

FONTE: Autoria própria.

Verifica-se que a capacidade da ligação em transmitir momento fletor, expressa pelos valores de momento máximo na Figura 10, Figura 11 e Tabela 3, aumenta significativamente com o aumento na taxa de armadura, sobretudo quando a taxa aumenta de 1% para 1,5%. Aparentemente, para taxas acima de 2% o ganho já não é tão expressivo, provavelmente porque para taxas desta magnitude ocorram mudanças nos modos de falha e o aumento de capacidade resistente decorrente da armadura conduza a falha para outros componentes da ligação.

Quanto à rigidez, houve ganho considerável para taxa de 1,5% em relação ao modelo experimental no qual foi utilizada taxa de 1,0%, o mesmo ocorreu com o momento máximo. Para taxa de 2% o ganho de rigidez inicial já não é tão expressivo quanto no caso anterior. Novamente, a causa pode ser a mudança no modo de falha em função da maior contribuição da taxa de armadura para o momento resistente da ligação. Para taxas inferiores a 1%, houve ganho entre as taxas de 0,5 e 0,75%, mas comparando a rigidez inicial para as taxas de 0,75% e 1,0%, valores menores foram registrados para a taxa maior.

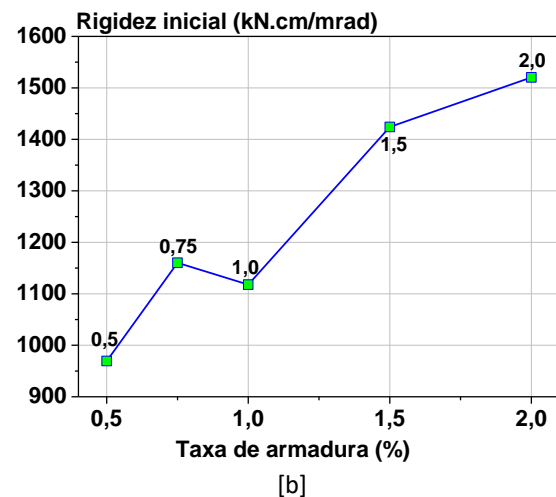
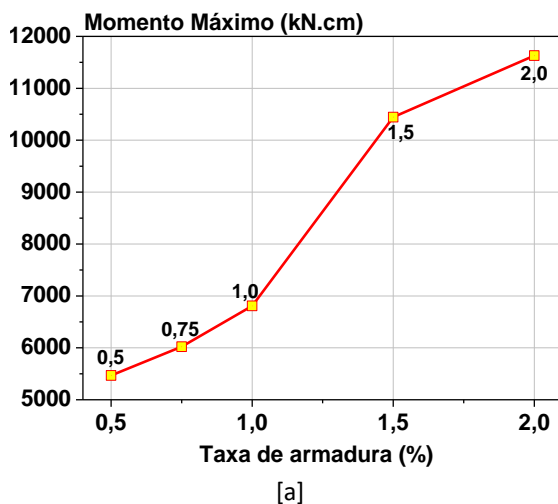


FIGURA 11: Influência da taxa de armadura negativa da laje, sendo: [a] Momento máximo; [b] Rigidez inicial.

FONTE: Autoria própria.

5.2.2 Perfil de aço da viga mista

A avaliação da influência da geometria do perfil de aço na capacidade resistente da ligação e em sua rigidez inicial foi dividida em duas etapas: a) utilização de seções padronizadas, b) seções não padronizadas. Esta divisão se fez necessária devido aos resultados obtidos quando foram utilizadas seções padronizadas. Para ambas as etapas, foi considerada taxa de armadura negativa da laje igual a 1,0%.

Inicialmente, a seção “I” utilizada no modelo experimental (VS 250 x 37) foi substituída por perfis diversos disponíveis em catálogos comerciais. Nesta seleção foram considerados como fatores norteadores, seções com inércia maior e área menor que a utilizada no modelo físico. A primeira seção analisada foi a VS 300 x 33, com inércia superior e área da seção transversal inferior ao modelo inicial, de validação. O comportamento do modelo com seção padronizada pode ser visualizado na , em comparação com os resultados

do modelo físico. O modelo com seção de maior inércia (VS 300 x 33) resultou em uma ligação mista com menor momento máximo que o modelo de validação, resultado que não era esperado (Figura 12a). Este primeiro resultado mostrou que a análise da influência das dimensões do perfil da viga mista precisava ser repensada. Assim, a etapa seguinte foi avaliar alguns parâmetros geométricos do perfil de forma isolada, por exemplo, alterar somente a altura do perfil ou a espessura da alma.

Para esta análise, foi aumentada a altura do perfil de aço, respeitando os limites de esbeltez local de mesa e alma, mas utilizando seções não padronizadas. Os resultados obtidos nesta análise (Figura 12b) mostram que o aumento da altura do perfil implica em ganho de momento resistente na ligação mista, no entanto, em alguns casos, o ganho foi pouco expressivo. Os valores obtidos de força e momento máximo, assim como a rigidez inicial para os modelos com variação de perfil da viga mista são expostos na Tabela 4.

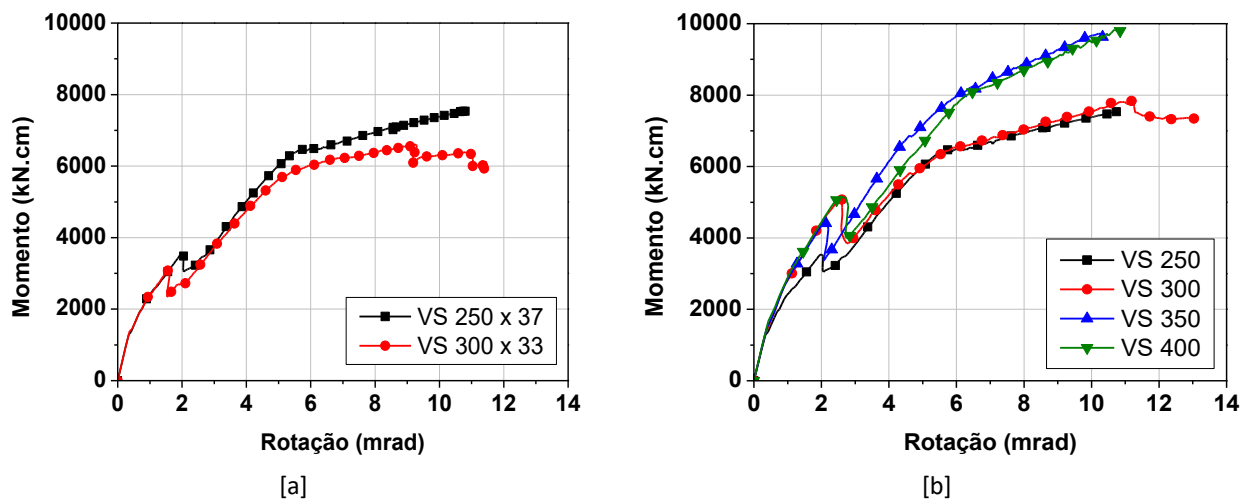


FIGURA 12: Momento vs. Rotação - influência do perfil de aço da viga mista, sendo: [a] Perfil padronizado da viga mista e [b] Altura do perfil da viga mista.

FONTE: Autoria própria.

TABELA 4: Influência dos perfis da viga mista.

Perfil I	Força (kN)	Momento Máximo (kN.cm)	Rigidez inicial S_i' (kN.cm/mrad)
Seção comercial (VS 300x33)	39,99	6598,14	1208,45
VS 250*	45,39	6807,75	1117,86
VS 300	47,55	7845,29	1304,29
VS 350	58,91	9719,59	1524,64
VS 400	59,59	9833,03	1326,99

(*) modelo experimental (físico)

FONTE: Autoria própria.

Os resultados expressos na Figura 12b, Figura 13 e na Tabela 4, revelaram que a capacidade da ligação quanto ao momento transmitido aumenta com a altura da viga mista. Acréscimos consideráveis de capacidade de momento foram observados para os modelos com alturas 300 mm e 350 mm. Com relação ao modelo de 250 mm (modelo experimental) foram observados ganhos da ordem de 15,2% e 42,8%, respectivamente. Por outro lado, o modelo com altura de 400 mm mostrou acréscimo de momento relativamente pequeno se comparado com o modelo com altura de 350 mm, ou seja, um aumento relativo de apenas 1,2%.

Observa-se que os modelos com altura da viga mista de 300 mm e 350 mm apresentaram aumentos também quanto à rigidez inicial da ligação (Figura 13). Porém, o modelo com altura de 400 mm

não manteve a tendência dos demais modelos, apresentando uma rigidez inicial menor comparado com o modelo com 350 mm de altura. Desta forma, pode-se concluir que até a altura de 350 mm tem-se tanto aumento de capacidade de momento como de rigidez inicial. Já para os modelos com alturas superiores, como no caso de 400 mm, tem-se pequeno acréscimo de momento associado a uma relativa diminuição de rigidez inicial.

Outro parâmetro geométrico avaliado foi a espessura da alma do perfil “I” da viga mista. Novamente, os demais parâmetros, tanto do perfil quanto da laje foram mantidos constantes. O aumento da espessura da alma resultou em aumentos consideráveis do momento máximo (Figura 14). Assim, quanto maior a espessura da alma do perfil da viga mista maior é a capacidade de transmitir momento da ligação mista.

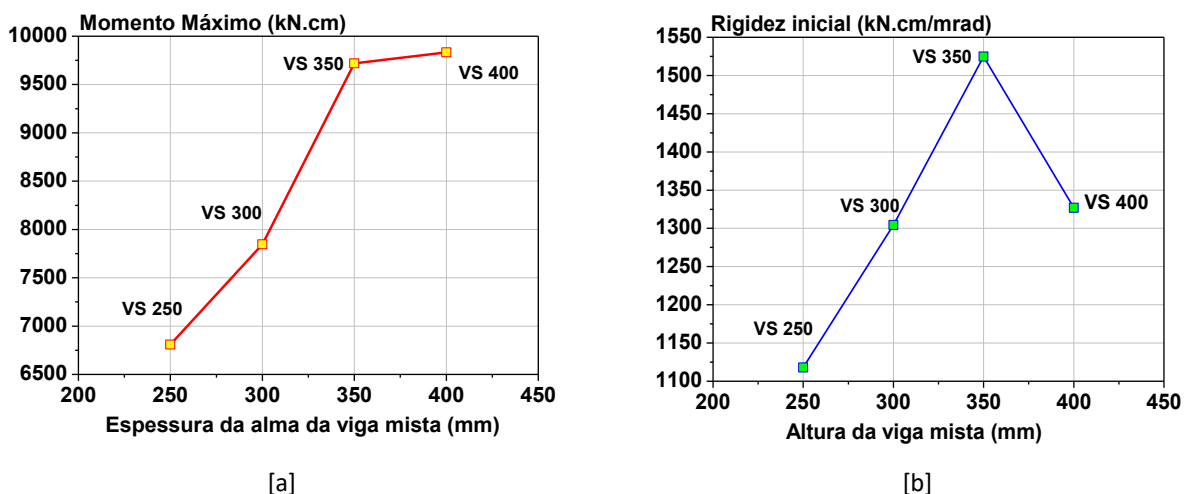


FIGURA 13: Influência da altura da viga mista, sendo: [a] Momento máximo; [b] Rigidez inicial.

FONTE: Autoria própria.

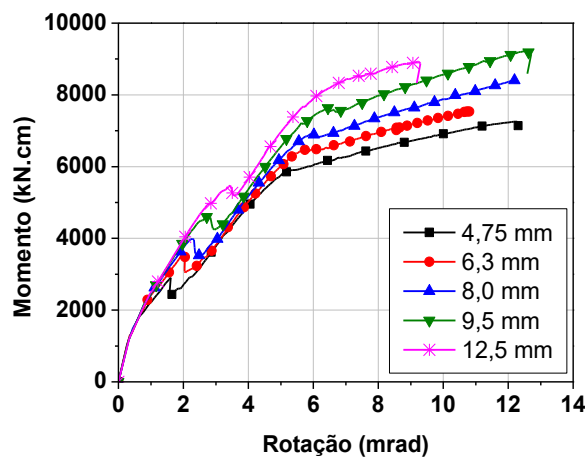


FIGURA 14: Influência da espessura da alma do perfil: curvas Momento vs. Rotação.

FONTE: Autoria própria.

Os valores expressos na Tabela 5 mostram a influência da espessura da alma do perfil da viga mista, tanto do ponto de vista da força, momento máximo quanto da rigidez inicial da ligação.

Com relação aos momentos máximos, observaram-se, em geral, aumentos em função da espessura da alma do perfil da viga mista (Figura 15). Em contrapartida do modelo experimental, o modelo com espessura menor, 4,75 mm, assim como os demais, também apresentou capacidade de momento maior. Os demais modelos mantiveram o acréscimo de momento com a espessura, salvo o modelo com espessura de 12,5

mm, o qual apresentou capacidade de momento menor que o modelo com espessura de 9,5 mm.

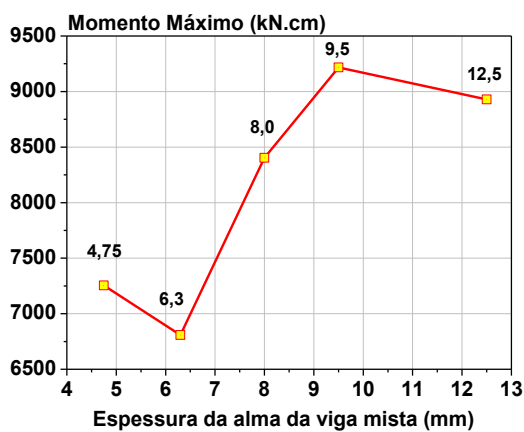
A rigidez inicial dos modelos foi maior que a apresentada pelo modelo experimental, inclusive para o modelo com espessura de 4,75 mm, como observado através da Figura 15. Seguiu-se uma tendência de aumento juntamente com o acréscimo da espessura da alma do perfil da viga mista. Ou seja, observou-se que modelos com espessuras maiores apresentaram rigidezes iniciais também maiores. Sendo que o maior aumento relativo, com acréscimo de espessura, foi identificado de 6,3 mm para 8,0 mm (14,4%).

TABELA 5: Influência da espessura da alma da viga mista.

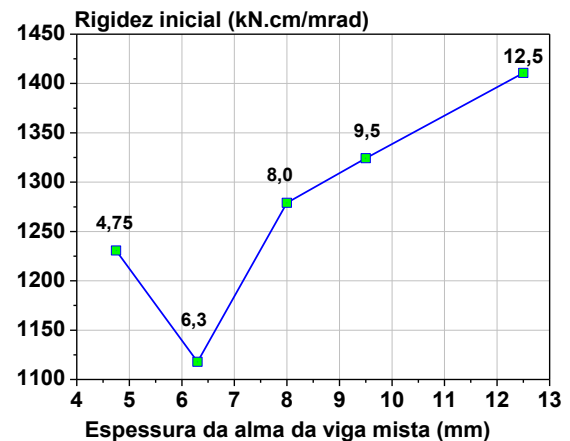
Espessura (mm)	Força (kN)	Momento Máximo (kN.cm)	Rigidez inicial S_i' (kN.cm/mrad)
4,75mm	43,97	7254,57	1230,63
6,3mm*	45,39	6807,75	1117,86
8mm	50,93	8403,02	1279,00
9,5mm	55,86	9216,93	1324,27
12,5mm	54,12	8929,17	1410,61

(*) modelo experimental (físico)

FONTE: Autoria própria.



[a]



[b]

FIGURA 15: Influência da espessura da alma da viga mista: [a] Momento máximo; [b] Rigidez inicial.

FONTE: Autoria própria.

5.2.3 Diâmetro dos parafusos

A contribuição da ligação parafusada é fundamental para o comportamento da ligação mista como um todo. Levando-se em consideração sua influência, buscou-se analisar o comportamento da ligação com a variação do diâmetro dos parafusos. Assim, foi avaliada a influência dos seguintes diâmetros: 12,5 mm, 16 mm (experimental) e 19 mm. Os resultados da Figura 16 mostram que, em comparação com os demais, o modelo com parafuso de 19 mm de diâmetro não consegue convergir para pequenos valores de momento (Figura 16a). Isso ocorreu porque as tensões nas bordas dos furos da alma do perfil atingiram os valores máximos, levando à não-convergência do modelo e, por consequência, à paralisação da análise numérica.

Desta análise ficou nítido que a espessura da alma era um parâmetro a ser considerado em conjunto com o parafuso de 19 mm de diâmetro. Assim, novas análises foram conduzidas considerando, para o parafuso de 19 mm, alma com 12,5 mm de espessura (Figura 16b). Na Figura 17 são mostradas as curvas momento vs. rotação para o parafuso com 19 mm e as diversas espessuras de alma do perfil “I”; percebe-se que a convergência do modelo numérico só ocorre quando a alma do perfil tem espessura de 12,5 mm. Para os demais modelos, o aumento da espessura da alma não

resultou em mudanças de comportamento ou de capacidade resistente. Feito isso, foi possível avaliar a influência do diâmetro do parafuso (Figura 16b). Quanto ao comportamento, percebem-se leves mudanças entre as curvas momento vs. rotação para os diâmetros de 12,5 mm e os demais. Em relação ao momento máximo, quanto maior o diâmetro, maior o valor do momento resistido pela ligação mista.

Com base na Tabela 6 e na Figura 18 observa-se que ocorre, com relação à capacidade de momento da ligação, aumento considerável apenas para o modelo com parafusos de 19 mm de diâmetro. Relativamente ao modelo experimental, obteve-se um acréscimo de cerca de 48%. O menor diâmetro dos parafusos analisado, de 12,5 mm, apresentou momento ligeiramente superior ao modelo experimental, cerca de 2% maior.

Quanto à rigidez inicial, observou-se que houve acréscimo, com o aumento do diâmetro dos parafusos, como ilustrado na Figura 18. Sendo que o aumento mais expressivo foi relativo ao modelo com parafusos de 19 mm de diâmetro. Para o modelo com parafusos de 12,5 mm de diâmetro, obteve-se uma rigidez inicial menor se comparada com o modelo experimental de 16 mm, revelando que se trata, de fato, de um parâmetro importante e influente no comportamento da ligação mista analisada.

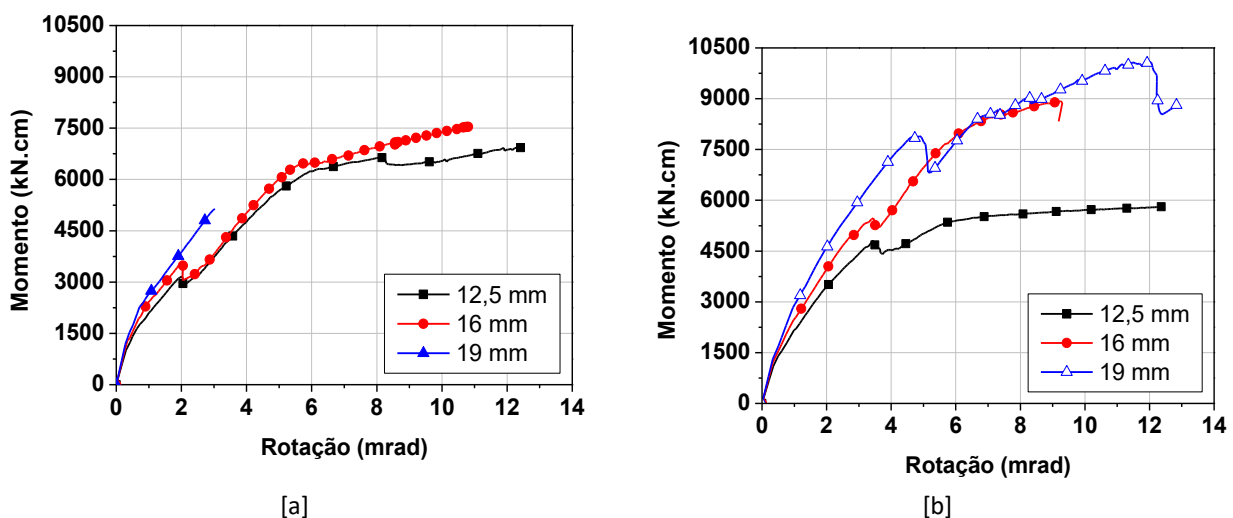


FIGURA 16: Influência do diâmetro dos parafusos: Momento vs. Rotação, sendo: [a] Espessura da alma da viga mista de 6,3mm; [b] Espessura da alma da viga mista de 12,5mm. FONTE: Autoria própria.

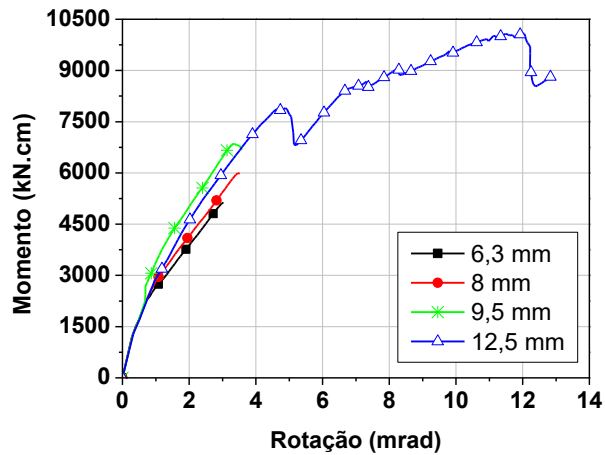


FIGURA 17: Momento vs. Rotação - Espessura da alma, parafuso φ 19mm.
FONTE: Autoria própria.

TABELA 6: Influência do diâmetro dos parafusos.

<i>Diâmetro dos parafusos (mm)</i>	<i>Força (kN)</i>	<i>Momento Máximo (kN.cm)</i>	<i>Rigidez inicial S_i' (kN.cm/mrad)</i>
12,5 (tw=6,3mm)	42,00	6930,53	956,59
16 (tw=6,3mm) *	45,39	6807,75	1117,86
19 (tw=12,5mm)	61,12	10084,29	1888,44

(*) modelo experimental (físico)

FONTE: Autoria própria.

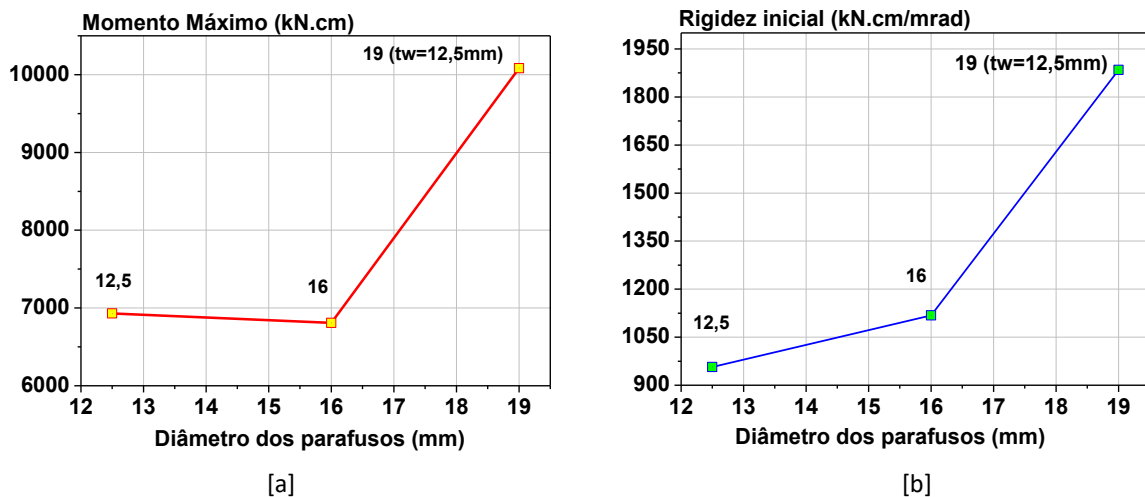


FIGURA 18: Influência do diâmetro dos parafusos, sendo: [a] Momento máximo; [b] Rigidez máxima.
FONTE: Autoria própria.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tanto a validação do modelo numérico quanto as análises paramétricas posteriores revelaram a funcionalidade dos modelos desenvolvidos e comprovaram a eficácia da utilização da plataforma numérica para simulação da ligação mista viga-pilar preenchido com chapa passante. Portanto, a utilização de ferramentas para desenvolvimento de modelos numéricos mostra-se uma opção altamente eficiente para análises complementares como é o caso das análises paramétricas aqui apresentadas. Observou-se que o modelo numérico foi capaz de reproduzir as respostas físicas com boa precisão, sobretudo no que se refere a força e momento máximos na ligação mista. Os resultados do estudo paramétrico mostraram que dentre os parâmetros geométricos avaliados, taxa de armadura negativa da laje, espessura da alma do perfil da viga mista, altura do perfil da viga mista, e o diâmetro dos parafusos, a taxa de armadura foi a que resultou em maior influência.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo apoio financeiro dado ao desenvolvimento desta pesquisa.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS INC. Documentation for Release 14, 2011.

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. 254p.

BESSA, W. O. **Análise experimental e numérica de ligações viga mista-pilar com cantoneiras de alma e assento** [Doutorado]. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos; 2009.

BROWN, N. D.; ANDERSON, D. **Structural properties of composite major axis end plate connections**. Journal of constructional steel research. Vol. 57, n. 3, 2001, 327-49 p.

Conceição, J. L. **Ligação mista viga-pilar resistente a momento** [Mestrado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2011.

DE NARDIN, S.; EL DEBS, A. L. H. **Investigação de dispositivos de ligação entre pilares preenchidos e vigas mistas em pavimentos mistos delgados**. [Relatório científico n.04 – pós-doutorado Processo Fapesp n°. 02/14209-4]. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo; 2007.

DE NARDIN, S.; SOUZA, A. S. C.; EL DEBS, A. L. H. **Detalhes de ligação entre pilares mistos preenchidos e vigas de aço**. Construção Metálica. n. 79, 2007, 23-6 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1992-1-1. **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for building**. Brussels, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1993-1-8. **Eurocode 3: Design of structures - Part 1-8: Design of joints**. Brussels, 2005.

FARIAS, R. S. **Estudo teórico-experimental do efeito da laje na transferência de forças em ligações viga-pilar misto preenchido** [Mestrado]. São Carlos: Universidade de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos; 2008.

GIL, B.; BAYO, E. **An alternative design for internal and external semi-rigid composite joints. Part II: Finite element modelling and analytical study**. Engineering Structures. Vol.30, 2008, 232-246 p.

KATAOKA, M. N.; EL DEBS, A. L. H. **Parametric study of composite beam-column connections using 3D finite element modelling**. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 102, 2014, 136-49 p.

KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga** [Mestrado]. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos; 2006.

LEON, R. T. **Semi-rigid composite construction**. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 15, n. 1-2, 1990, 99-120 p.

LI, T. Q.; NETHERCOT, D. A.; CHOO, B. S. **Behaviour of flush end-plate composite connections with unbalanced moment and variable shear/moment ratios—I. Experimental behaviour**. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 38, n. 2, 1996, 125-64 p.

LI, T. Q.; NETHERCOT, D. A.; CHOO, B. S. **Behaviour of flush end-plate composite connections with unbalanced moment and variable shear/moment ratios—II. Prediction of moment capacity**. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 38, n. 2, 1996, 165-98 p.

LI, T. Q.; NETHERCOT, D. A.; LAWSON, R. M. **Required rotation of composite connections.** Journal of Constructional steel research. Vol. 56, n. 2, 2000, 151-73 p.

MAGGI, Y. I. **Análise do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo estendida** [Doutorado]. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos; 2004.

MALASKA, M. **Behaviour of a semi-continuous beam-column connection for composite slim floors** [Dissertation]. Helsinki: Helsinki University of Technology; 2000.

SMITHA, M. S.; SATISH KUMAR, S. R. **Steel-concrete composite flange plate connections – finite element modeling and parametric studies.** Journal of Constructional Steel Research. Vol.82, 2013, 164-176 p.

TRISTÃO, G. A. **Análise teórica e experimental de ligações viga-pilar de extremidade com cantoneiras de assento e alma** [Doutorado]. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos; 2006.

XIAO, Y.; CHOO, B. S.; NETHERCOT, D. A. **Composite connections in steel and concrete. Part 2—Moment capacity of end plate beam to column connections.** Journal of Constructional Steel Research. Vol. 37 n. 1, 1996, 63-90 p.