

Parametric study on the behaviour of bolted composite connections

Estudo paramétrico do comportamento de ligações mistas parafusadas



M. N. KATAOKA ^a
kataoka@sc.usp.br

A. L. H. C. EL DEBS ^b
analucia@sc.usp.br

Abstract

The studied connections are composed of concrete filled steel tubes (CFT) connected to composite beams by passing through bolts, endplates and steel deck, which also contributes to support the applied loads. The parametric analysis presented in this work is based on numerical simulations performed with software TNO Diana, using experimental results to calibrate the reference numerical model. The influence of three main parameters, being them the bolts diameter, the slab height and the beams cross section, was evaluated. According to the obtained bending moment versus rotation curves, it was concluded that, among the three parameters analyzed, the most important one was the bolts diameter. About the beams cross section, inconclusive results were achieved, probably due to the incompatibility between the 16 mm bolts and the robust beam cross sections considered in the parametric analysis.

Keywords: composite connection, numerical simulation, mixed column (CFT).

Resumo

A ligação em estudo é constituída por pilar misto preenchido com concreto ligado às vigas mistas por meio de parafusos passantes, chapa de topo e laje com forma de aço incorporada, que também contribui no combate aos esforços aplicados. O estudo paramétrico do presente trabalho é baseado em simulações numéricas realizadas no programa TNO Diana. O modelo numérico de ligação considerado como referência foi calibrado a partir de resultados experimentais e para o estudo do seu comportamento foram variados parâmetros importantes como o diâmetro dos parafusos, altura da laje e seção da viga. Como resultado das análises concluiu-se que dentre os três parâmetros analisados o que mais influenciou o comportamento da ligação, tendo como base a curva momento fletor versus rotação, foi o diâmetro dos parafusos, obtendo resultados inconclusivos no caso da seção da viga, pois seções mais robustas não foram compatíveis com os parafusos de 16 mm de diâmetro utilizados no modelo de ligação de referência.

Palavras-chave: ligação mista, simulação numérica, pilar misto.

^a Department of Structural Engineering, School of Engineering of São Carlos, University São Paulo, kataoka@sc.usp.br, Trabalhador Saocarlense Avenue, nº 400, CEP: 13566-580, São Carlos, SP, Brazil.

^b Department of Structural Engineering, School of Engineering of São Carlos, University São Paulo, analucia@sc.usp.br, Trabalhador Saocarlense Avenue, nº 400, CEP: 13566-580, São Carlos, SP, Brazil.

1. Introdução

Com o desenvolvimento tecnológico, a análise numérica tem avançado bastante no sentido de descrever o comportamento das estruturas. Uma das ferramentas utilizadas, nesse caso, é o método dos elementos finitos (MEF) associado à consideração de modelos de ruptura para os materiais utilizados na composição dos sistemas estruturais, principalmente nos sistemas estruturais mistos. O programa DIANA é uma ferramenta de modelagem computacional que utiliza esse método.

A análise numérica tem sido cada vez mais utilizada para estudar o comportamento de estruturas com algum grau de não linearidade, o que antes não era possível em virtude da ausência de recursos computacionais. Também, estruturas de grande porte, que antes só poderiam ser estudadas com o auxílio de modelos em escala reduzida e miniaturas, os quais não representam exatamente o comportamento real da estrutura original, haja vista a existência do chamado efeito escala, agora podem ser analisadas com as dimensões reais, bastando para isto os recursos computacionais necessários, que hoje em dia estão à disposição com relativa facilidade.

Nesse contexto, a realização de modelagens numéricas como forma de complementar a análise experimental, ou até mesmo substituí-la, quando esta é inviável, tem se tornado cada vez mais comum no meio acadêmico, opinião esta compartilhada por diversos autores como [1, 2], que ainda complementam incluindo o fator custo, pois a substituição de modelos físicos por modelos numéricos desonera o custo final da pesquisa.

Durante a revisão da literatura foram encontrados diversos trabalhos envolvendo pilares mistos e análise numérica. Em sua maioria, as pesquisas envolvendo estruturas mistas provem de países onde a incidência de terremotos é muito frequente em função do seu bom comportamento nessas situações. Um exemplo é o trabalho de [3], realizado na Coreia do Sul, onde constam resultados de análises paramétricas realizadas a partir de ensaios e simulações numéricas de ligações envolvendo pilares mistos preenchidos com concreto e diafragmas. Outra pesquisa considerada de grande importância é a de [4] que propôs uma tipologia de ligação parafusada para utilização com pilares preenchidos com seção transversal circular. Nesse trabalho foi realizado um estudo puramente analítico, com a utilização de um modelo tridimensional refinado que proporcionou uma compreensão mais detalhada e precisa do comportamento global da ligação, incluindo o distribuição de tensões nas superfícies de contato. No Brasil não existem muitas pesquisas e informações técnicas a respeito de estruturas mistas. Esse sistema construtivo foi introduzido no país por volta da década de 1950, mas sua utilização não teve grande crescimento devido sua cultura preferencial por estruturas de concreto armado. Atualmente, os estudos sobre esse sistema construtivo estão crescendo, como por exemplo, na Universidade Federal de Minas Gerais, onde foram encontrados estudos de ligações parafusadas entre viga-metálica e pilar misto de aço e concreto totalmente revestido [5]. Na Escola de Engenharia de São Carlos – USP uma linha de pesquisa sobre estruturas mistas vem sendo desenvolvida a muitos anos, no qual podemos destacar os trabalhos de [6], que realizou um estudo teórico-experimental de pilares preenchidos isolados submetidos à compressão axial e [7] que já passou para a análise de ligações mistas.

O modelo de ligação viga-pilar estudado neste artigo envolve pilar misto preenchido com concreto parafusado às vigas mistas por meio de chapa de topo. A análise numérica envolve a variação de alguns parâmetros estruturais no modelo computacional, cujo modelo de referência foi calibrado com base em resultados experimentais. Foram variados o diâmetro dos parafusos, altura da laje e seção transversal da viga, uma de cada vez, mantendo as outras características iguais ao do modelo de referência.

Optou-se pelo estudo de uma ligação mista viga-pilar porque a utilização de sistemas construtivos mistos amplia consideravelmente as possíveis soluções em concreto armado e em aço, o que possibilita a obtenção de benefícios arquitetônicos e econômicos. Comparada às características da construção em concreto armado, a construção em sistema misto de aço e concreto é competitiva quando utilizada em estruturas de vãos médios a elevados, caracterizando-se pela rapidez de execução e pela significativa redução do peso total da estrutura, o que proporciona fundações mais econômicas. A proteção contra o fogo é um fator que influencia a escolha entre as estruturas de concreto, mista e de aço, pois afeta consideravelmente seu custo final.

Como nesse tipo de estrutura as ligações podem não ter a rigidez característica de uma estrutura monolítica, o desempenho das ligações é de grande importância. Durante muito tempo, a análise estrutural foi realizada considerando as ligações com comportamento de nó rígido ou rotulado. Com a realização de pesquisas e também com a prática, foi possível demonstrar a inadequação de classificar as ligações somente como rígidas ou rotuladas. O comportamento usual das ligações é, na verdade, intermediário às duas situações idealizadas e, para definir este comportamento, utiliza-se o termo “ligações semi-rígidas”.

2. Projeto da ligação

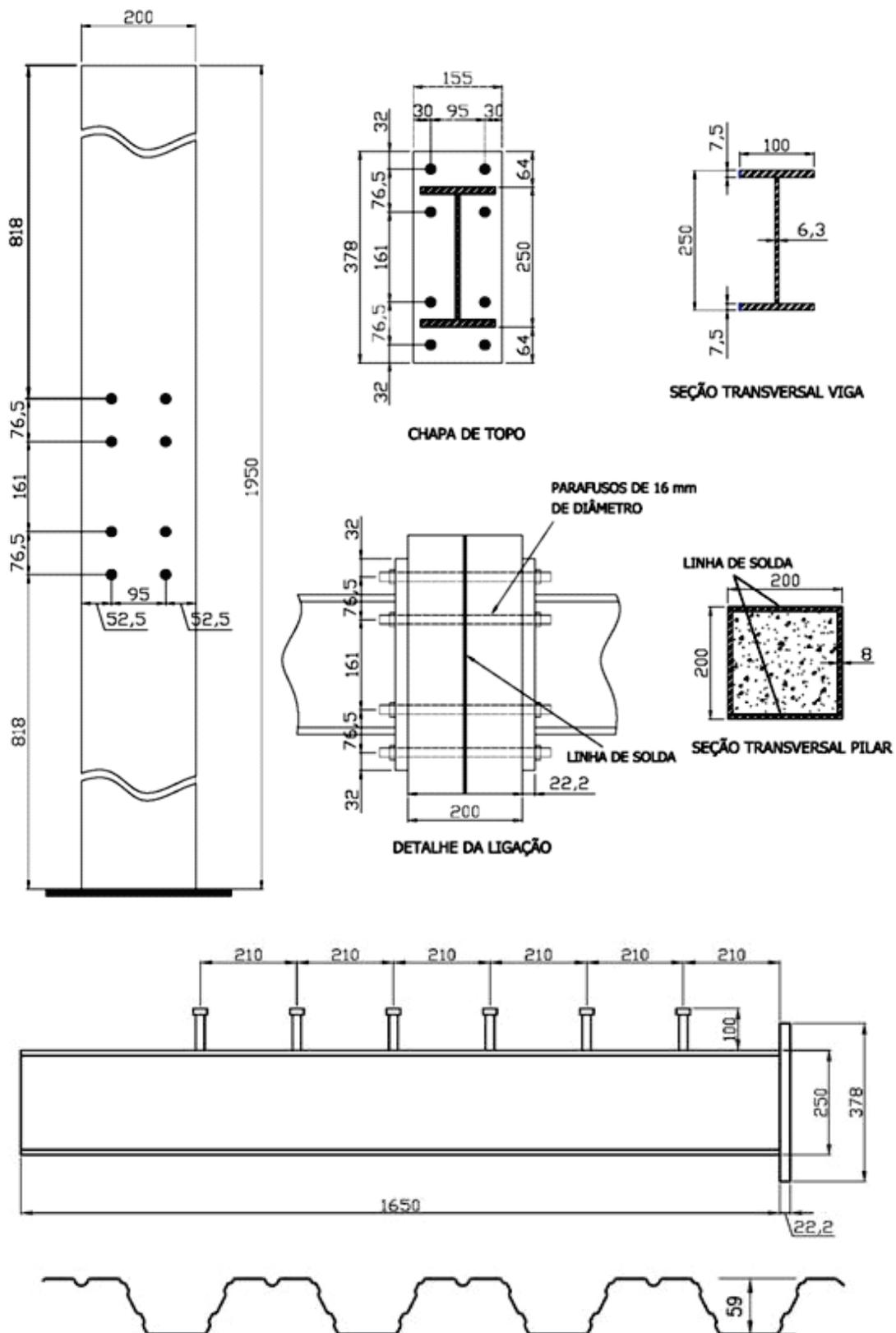
O pilar misto preenchido com concreto utilizado no modelo físico da ligação apresentava seção transversal quadrada de dimensões de 200x200 mm com as paredes do tubo metálico com espessura de 8 mm, formados pela união de dois perfis “U”. As vigas metálicas de seção transversal “I” possuíam 250 mm de altura e 100 mm de largura, com as mesas de 7,5 mm de espessura e a alma com 6,3 mm. Todos os perfis eram constituídos por aço ASTM A-36.

A ligação foi dimensionada com oito parafusos passantes de 16 mm de diâmetro constituídos por aço SAE 1020 e chapa de extremidade de 22,2 mm de espessura formada por aço ASTM A-36. O pilar possuía 1950 mm de altura e as vigas metálicas possuíam 1650 mm de comprimento.

Os conectores de cisalhamento utilizados para proporcionar a ação conjunta da viga metálica com a laje tinham diâmetro de 19 mm, altura de 100 mm e resistência à ruptura de 415 MPa, de acordo com informações do fabricante. Em cada viga foram soldados seis conectores de cisalhamento espaçados de 210 mm (Figura 1).

A largura da laje, do tipo com forma de aço incorporada, era de 800 mm e 120 mm de altura com forma de aço metálica de 0,80 mm de espessura e altura de 59 mm. As formas de aço são fornecidas com dimensões de 840 mm de largura por 2500 mm de comprimento e de acordo com especificação do fabricante, possuíam 9,14 kgf/m². Foi utilizado cobrimento de 25 mm para

Figura 1 - Dimensões dos elementos que compoem a ligação (Unidade: milímetro)



as armaduras da laje. A Figura 1 apresenta o esquema completo da ligação que foi realizado de acordo com as especificações da ABNT NBR 8800:2008 [8].

A configuração final do modelo de ligação foi em formato cruciforme, com a simulação de um pilar central ligado a duas vigas em

balanço. As dimensões totais do modelo foram 1950 mm de altura e 3544,4 mm de comprimento, com indicado na Figura 2.

Como mostra a Figura 3, foram utilizadas na armação da laje apenas barras de 12,5 mm de diâmetro na longitudinal, totalizando 8 barras e armadura de distribuição composta por barras de

Figura 2 - Projeto do modelo de ligação

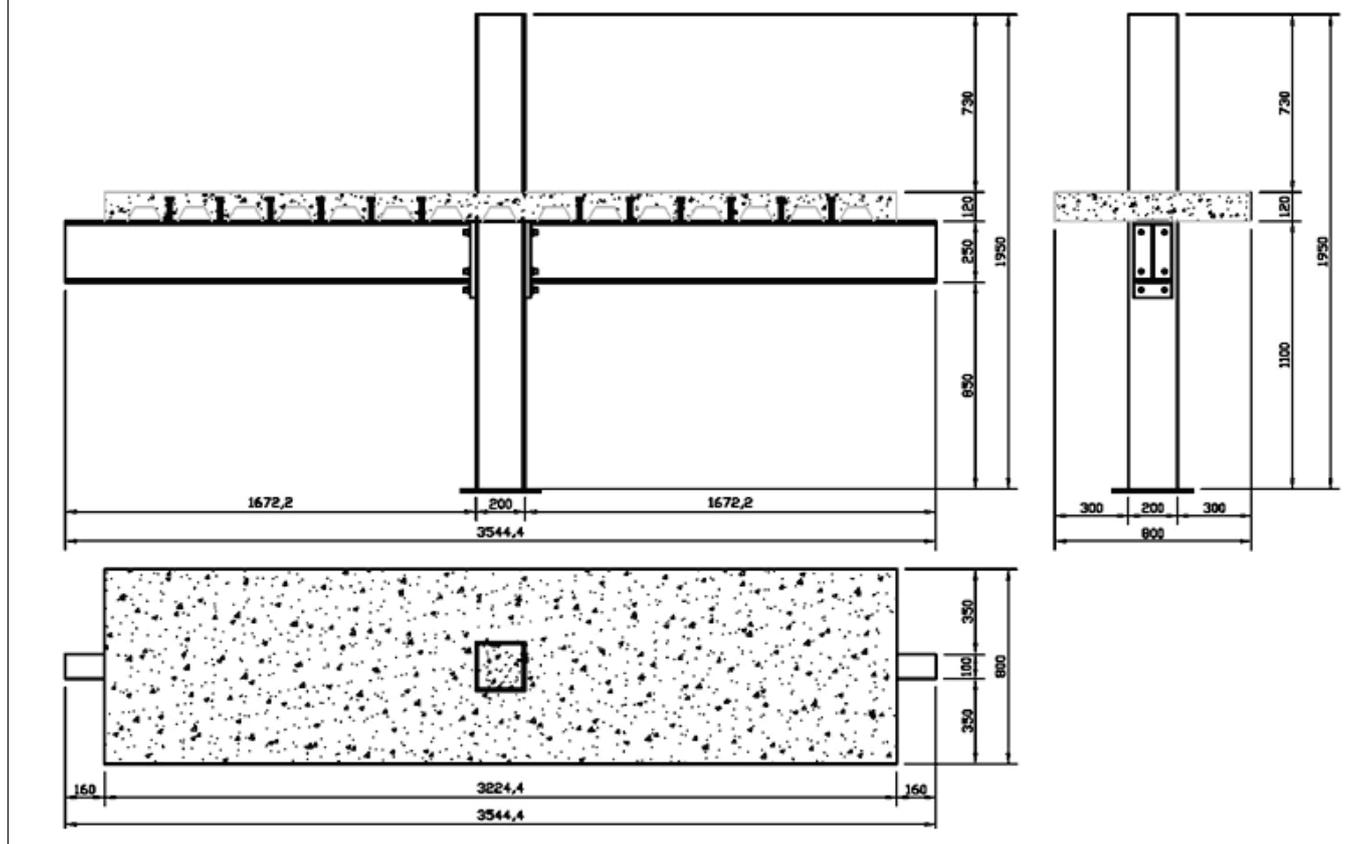


Figura 3 - Projeto da armadura da laje

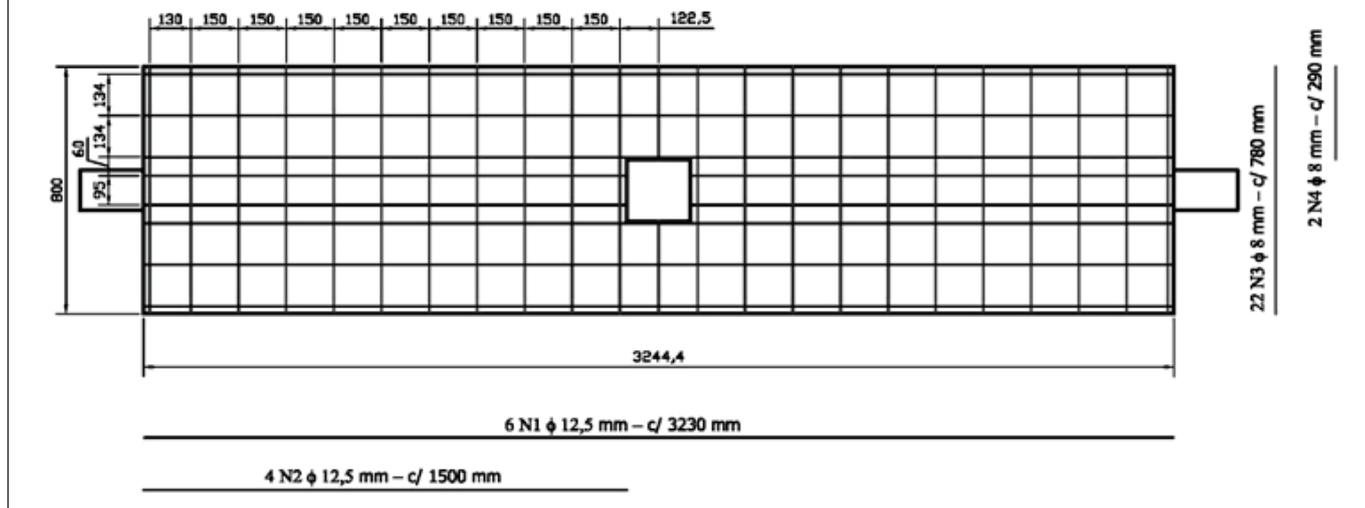


Figura 4 - Detalhe da armadura da laje



A Armadura da laje



B Armadura de continuidade rosqueada ao pilar

8,0 mm. As barras centrais que entram em contato com o pilar foram conectadas a ele por meio de luvas, que em seu interior também eram ligadas, na tentativa de proporcionar continuidade a essas barras e aumentar a rigidez da ligação (Figura 4). A área total de aço utilizado no sentido longitudinal foi igual a 981,75 mm²

Os resultados obtidos no ensaio foram utilizados para calibração do modelo numérico a partir do qual foram variados alguns parâmetros importantes para estudo do seu comportamento segundo a rigidez apresentada. Dados dos ensaios de caracterização dos materiais também foram aproveitados para descrever a propriedades dos elementos. Neste trabalho a ligação ensaiada é deno-

3. Programa experimental

O programa experimental desenvolvido neste trabalho foi realizado no Laboratório de Estruturas (LE) do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Tal programa consistiu de ensaio cíclico reversível de uma tipologia de ligação mista viga-pilar, realizados de acordo com a representação da Figura 5.

Figura 5 - Esquema de aplicação do carregamento cíclico

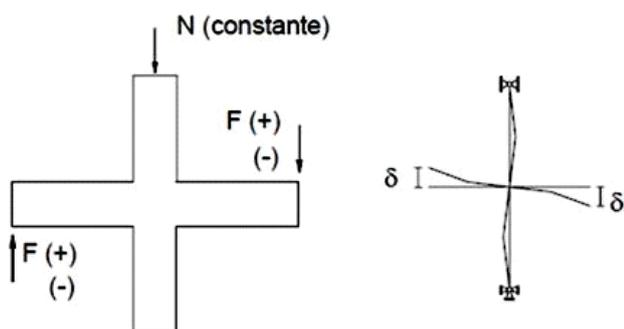


Figura 6 - Esquema de realização do ensaio

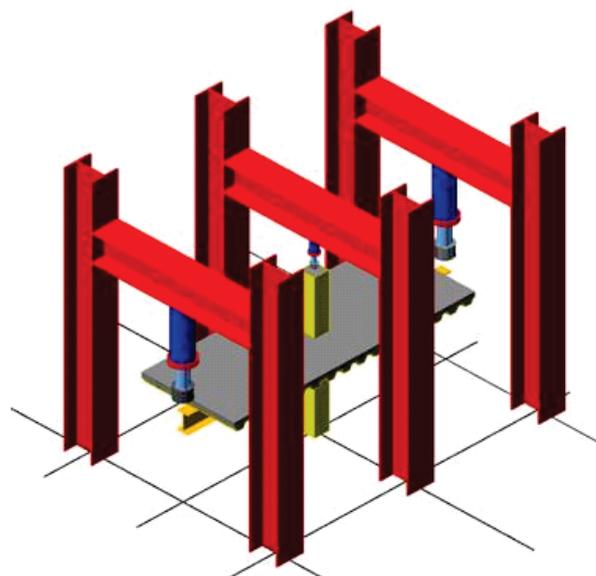


Figura 7 – Posição dos transdutores

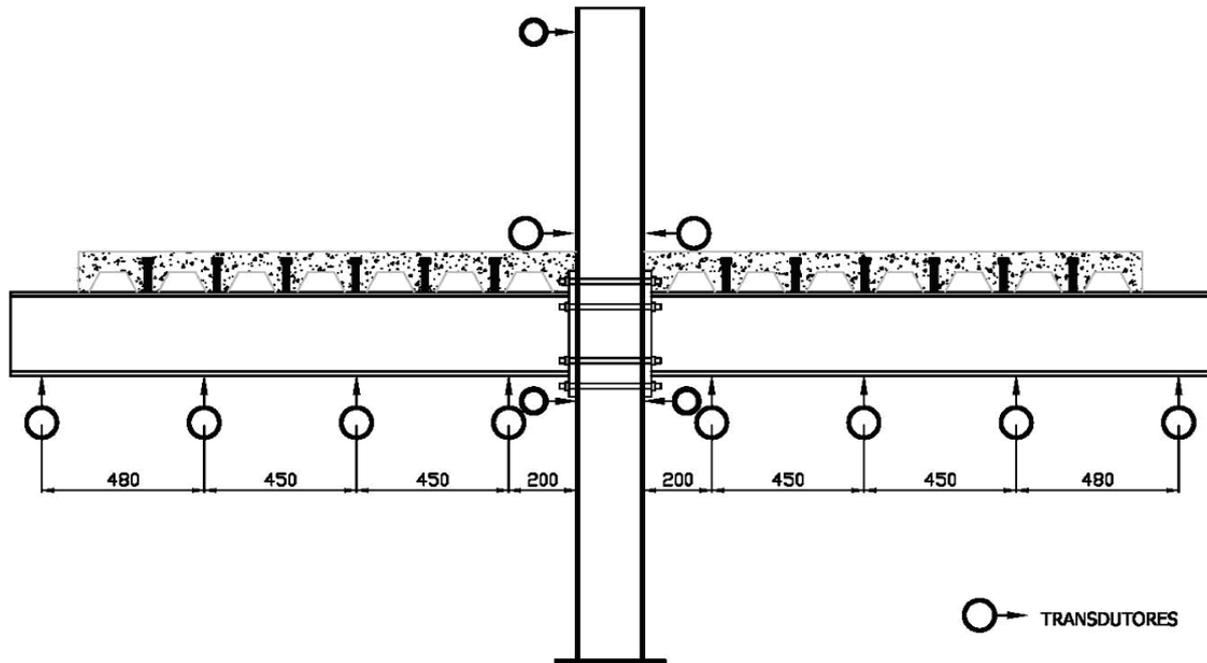


Figura 8 – Rótula utilizada para aplicação da força das vigas

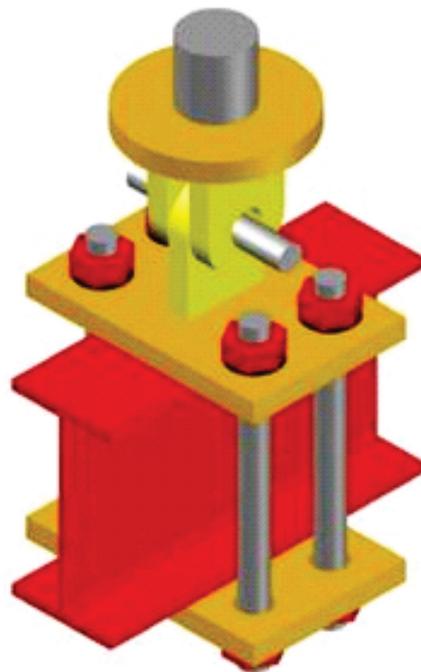
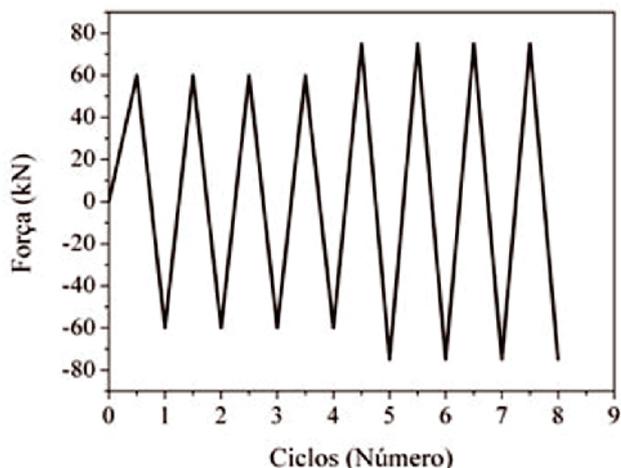


Figura 9 – Representação dos ciclos de carregamento do Modelo 1



minada Modelo 1 ou Modelo de Referência por ter seu comportamento utilizado como base para a calibração do modelo numérico e para as análises paramétricas.

Foram utilizados para a aplicação dos esforços três atuadores hidráulicos com capacidade de 500 kN. Dois atuadores foram posicionados próximos às extremidades das vigas, a 1580 mm da ligação, e o terceiro atuador foi utilizado para aplicar uma força constante no topo do pilar, na tentativa de causar o mesmo efeito dos esforços oriundos dos pavimentos superiores de um edifício (Figura 6). Essa força foi aplicada com a utilização de uma chama metálica que distribuiu os esforços em toda a seção transversal do topo do pilar, com uma intensidade de 150 kN mantida constante durante todo o ensaio. As leituras de deslocamento e deformação foram realizadas com transdutores posicionados abaixo da viga

(Figura 7) e *strain gages* colados nas barras de aço e nos perfis metálicos, respectivamente, com o intuito de identificar o momento de escoamento desses elementos.

Com base nas leituras de deslocamento e força aplicada foi gerada a curva momento fletor *versus* rotação, a partir da qual se determinou a rigidez da ligação. Para a determinação da rotação foi utilizada a leitura do deslocamento vertical do primeiro transdutor (o mais próximo da ligação, Figura 7) e a distância desse transdutor até a ligação. A partir desses valores foi calculado o arco tangente do ângulo produzido com a posição inicial da viga, que corresponde, aproximadamente, ao giro da ligação.

O carregamento cíclico foi aplicado à estrutura por um dispositivo desenvolvido especificamente para essa função, denominado rótula. Essa rótula possibilitou a aplicação de esforços que geraram na ligação momentos fletores positivos e negativos e ao mesmo tempo, em função de uma folga no furo da parte presa a viga, impedia o surgimento de esforços horizontais que pudessem danificar o atuador. Detalhes desse dispositivo podem ser observados na Figura 8.

O carregamento foi iniciado com 60 kN, aplicados em quatro ciclos, partindo depois para uma força 25% superior, igual a 76 kN, com mais quatro ciclos (Figura 9), estágio no qual houve a falha da estrutura, com o descolamento da laje mista ocasionado pela ruptura do concreto na região dos conectores de cisalhamento localizados próximos do ponto de aplicação da força, como mostra a Figura 10. A intensidade dos ciclos de força foram definidos com base em estudos analíticos prévios a respeito da resistência da ligação com base em prescrições normativas. Cabe salientar, que estava programado mais um estágio de carregamento com intensidade de força igual a 95 kN, que em virtude da ruína da estrutura ter ocorrido na ligação viga-laje, não pode ser realizado.

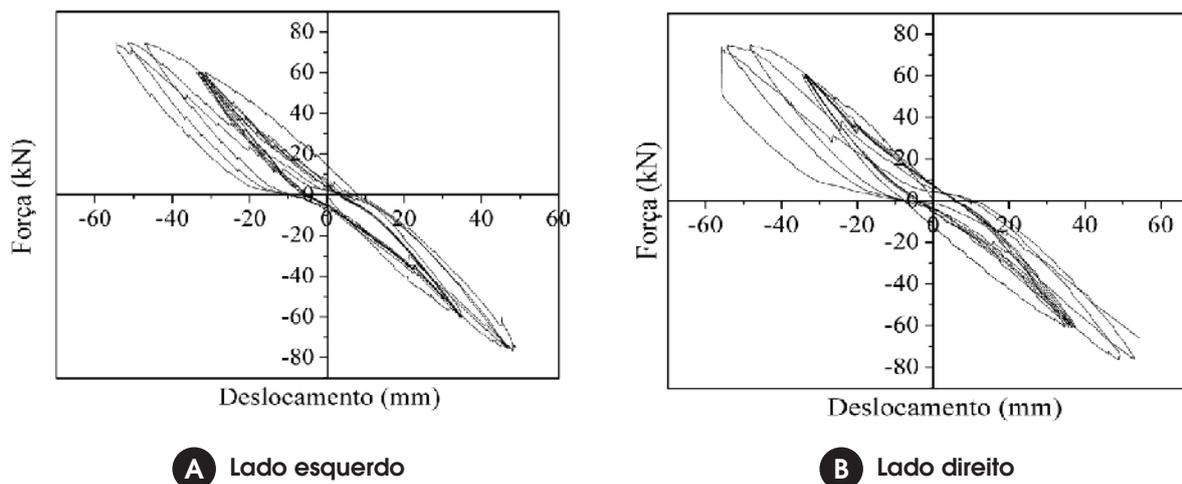
4. Resultados experimentais

Os deslocamentos verticais máximos obtidos sob o ponto de aplicação da força foram de 55,85 mm para o lado direito e de

Figura 10 – Ruptura da ligação viga-laje



Figura 11 – Curvas força versus deslocamento do Modelo 1



54,46 mm para o lado esquerdo, para força correspondente a 76 kN. A ruína do modelo ocorreu com o rompimento da ligação entre a viga e a laje, realizada por meio de conectores de cisalhamento. Em função desse ocorrido, não foi possível atingir o limite de resistência da ligação viga-pilar, que de acordo com cálculos analíticos prescritos pela norma vigente [8] seria de aproximadamente 95 kN.

Pode-se notar na Figura 11 que as curvas força *versus* deslocamento não são simétricas, para o sentido positivo e negativo de momento fletor. Em consequência da assimetria do modelo, devido à presença da laje, as curvas momento fletor *versus* rotação apresentadas na Figura 12 mostram que a parte inferior da liga-

ção, tanto para o lado esquerdo como direito, girou mais quando solicitada em comparação com a parte superior.

As rigidezes para o último ciclo de carregamento para o lado esquerdo foram 26398,87 kNm/rad para a parte inferior da ligação e 33656,42 kNm/rad para a parte superior, ou seja, para momento fletor positivo e negativo, respectivamente. Para o lado direito a diferença entre as rigidezes foi menor devido ao descolamento da laje ter ocorrido desse lado, apresentando rigidez para a parte inferior da ligação igual a 28311,42 kNm/rad contra 23178,00 kNm/rad para a parte superior. Tendo como base de análise a envoltória traçada a partir da histerese, a rigidez inicial apresentada pelo lado esquerdo do Modelo 1 foi de 34324,29 kNm/rad e pelo lado

Figura 12 – Curvas Momento Fletor versus Rotação e envoltória do Modelo 1

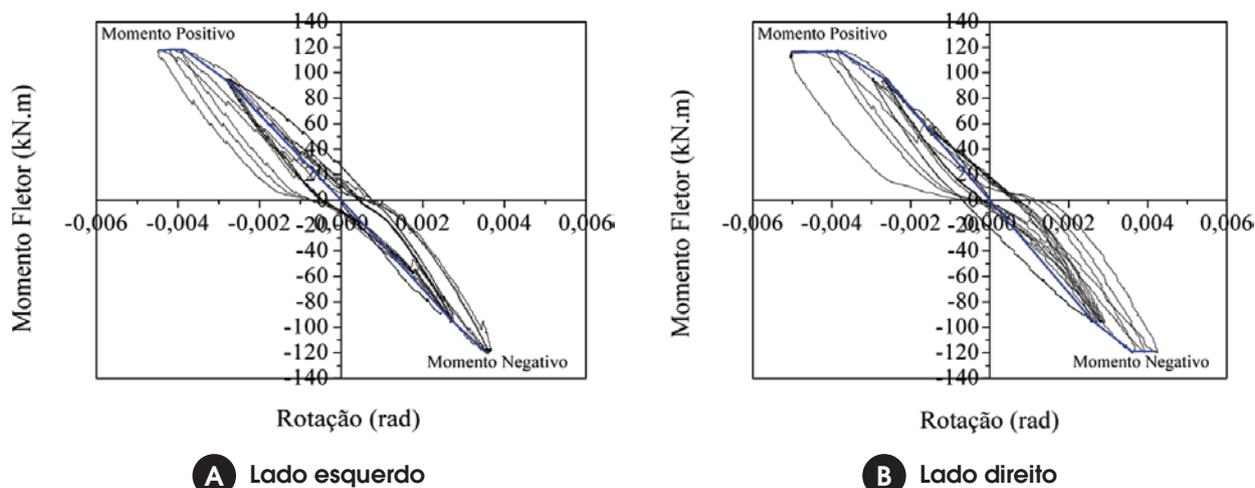


Tabela 1 – Rigidezes experimentais do modelo de referência

	Lado Esquerdo			Lado Direito		
	Inicial	Final		Inicial	Final	
		Momento Positivo	Momento Negativo		Momento Positivo	Momento Negativo
Rigidez (k) kNm/rad	34324,29	26398,87	33656,42	36360,76	28311,42	23178,00
$k_{final}/k_{inicial}$	-	0,77	0,98	-	0,77	0,64

Tabela 2 – Propriedades da viga utilizadas na classificação da rigidez

Propriedades da Viga	
Momento de Inércia (Iz) cm ⁴	2887,30
Módulo de Resistência Plástico (Zx) cm ³	253,60
Momento de Plastificação (Mp) kNm	88,76
Comprimento (Lb) mm	1650,00
Tensão de escoamento (fy) MPa	350,00
Módulo de Elasticidade (E) MPa	230000,00

direito, 36360,76 kNm/rad, sendo a média para a rigidez dessa ligação igual a 35342,52 kNm/rad. Para esse cálculo foi determinado o coeficiente angular da reta que passa pela origem, cujo valor corresponde a rigidez da ligação.

Ao comparar as perdas de rigidez, foi notado que para momento fletor positivo, para ambos os lados, a redução da rigidez foi a mesma, caindo cerca de 23%. Para o momento fletor negativo, o qual é resistido principalmente pela armadura da laje, houve cer-

ta disparidade, justificada pelo fato do descolamento da laje ter ocorrido do lado direito do modelo. Do lado esquerdo a perda de rigidez foi de apenas 2%, como mostra a Tabela 1.

A ligação analisada experimentalmente também foi classificada segundo seu grau de rigidez para momento fletor negativo de acordo com as indicações do Eurocode 3 [9]. Para isso algumas propriedades geométricas da viga tiveram que ser determinadas, como momento de inércia, módulo de resistência plástico e momento de plastificação, que estão apresentados na Tabela 2. A Figura 13 mostra o sistema de classificação das ligações do Eurocode 3 [9] para estruturas contraventadas e não-contraventadas.

A classificação foi realizada para a situação em que a ligação foi submetida a momento fletor negativo, ou seja, tração na parte superior, por ser a sollicitação imposta a estrutura na maior parte de sua vida útil. O resultado obtido, tanto para o lado esquerdo quanto para o direito, foi que a laje da estrutura contribuiu no combate aos esforços, fazendo com que a ligação ganhasse resistência e atingisse a classificação de rígida com resistência completa para estruturas contraventadas, como pode ser observado na Figura 14.

Figura 13 – Especificação para classificação de ligações segundo o Eurocode 3

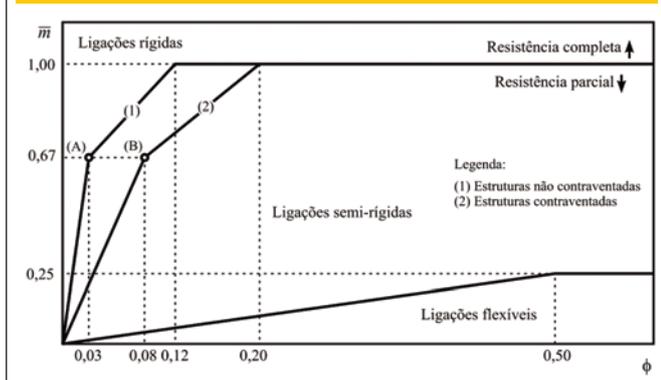
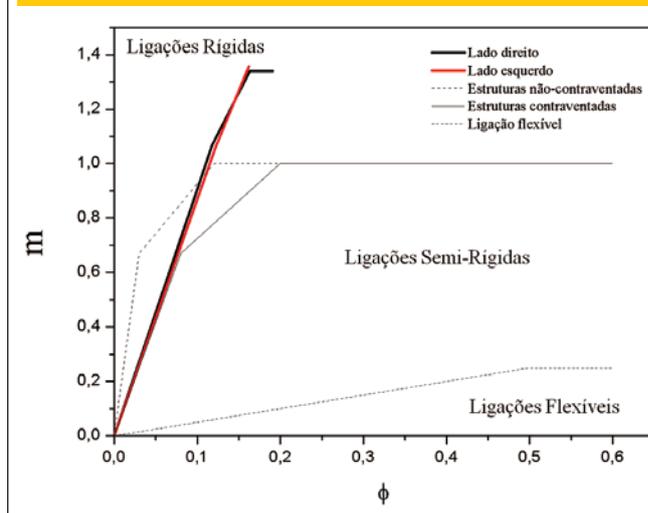


Figura 14 – Classificação do Modelo 1 segundo Eurocode 3



5. Modelagem numérica

5.1 Materiais

5.1.1 Propriedades

As propriedades dos materiais utilizadas na simulação numérica foram àquelas determinadas nos ensaios de caracterização, e outras, como energia de fratura do concreto, que não foi possível determinar experimentalmente, foi determinada com base em prescrições do CEB MC 90 [10] supondo que na produção dos concretos tenham sido utilizados agregados de dimensão máxima de 19 mm. Para os perfis metálicos o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento foram determinados por ensaios de tração de acordo com a ABNT NBR 6892:2002 [11].

Os conectores de cisalhamento utilizados foram os mesmos da pesquisa de [7], de onde foram retiradas suas propriedades. Para informações como módulo de elasticidade dos parafusos e conectores de cisalhamento que ficaram faltando em função de problemas nos ensaios de tração e falta de informações do fabricante respectivamente, foram adotados valores nominais característicos de cada material.

Com relação às barras de aço da armadura da laje, as propriedades adotadas foram as médias aritméticas dos valores obtidos dos ensaios de tração. A Tabela 3 resume todas as propriedades adotadas para cada elemento.

5.1.2 Modelos constitutivos

■ Concreto

O modelo constitutivo utilizado para o concreto foi o indicado para materiais frágeis ou quase-frágeis (CONCRETE AND BRITTLE MATERIALS). Para a caracterização da distribuição da fissuração foi utilizado o modelo TOTAL STRAIN, cuja grande vantagem oferecida é sua simplicidade conceitual, sendo esse fato representado no programa DIANA pelo ROTATING CRACK MODEL e pelo FIXED CRACK MODEL. Nos modelos de ligação mista deste trabalho foi utilizado o FIXED CRACK MODEL. O comportamento do concreto à tração foi admitido como sendo frágil e quanto à compressão foi utilizado um modelo de comportamento ideal elasto-plástico.

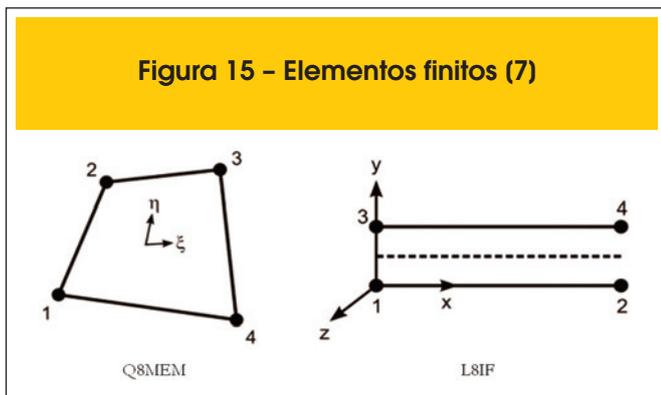
■ Aço

Com relação aos perfis metálicos, seu modelo constitutivo preci-

Tabela 3 – Propriedades dos materiais adotadas na modelagem

CONCRETO DO PILAR				
Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Energia de Fratura (Nm/m ²)	Poison (ν)
3,59	54,81	38415,51	0,136	0,2
CONCRETO DA LAJE				
Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Energia de Fratura (Nm/m ²)	Poison (ν)
3,77	51,41	34333,65	0,136	0,2
PERFIS METÁLICOS				
Tensão de Escoamento (MPa)		Módulo de Elasticidade (MPa)	Poison (ν)	
350,00		235000,00	0,3	
PARAFUSOS				
Tensão de Escoamento (MPa)		Módulo de Elasticidade (MPa)	Poison (ν)	
350,00		200000,00	0,3	
CONECTORES DE CISALHAMENTO				
Tensão de Escoamento (MPa)		Módulo de Elasticidade (MPa)	Poison (ν)	
250,00		200000,00	0,3	
ARMADURA				
Tensão de Escoamento (MPa)		Módulo de Elasticidade (MPa)	Poison (ν)	
525,81 (f12,5mm)		201245,00	0,3	

Figura 15 – Elementos finitos (7)



sa descrever apenas dois fenômenos: o escoamento e o encruamento. Quanto à plasticidade, os modelos de Tresca e Von Mises são os aplicáveis aos metais, por serem materiais dúcteis. O modelo da energia de distorção máxima de Von Mises, escolhido para os elementos metálicos, impõe que a máxima energia acumulada somente na distorção do material analisado não pode ser igual ou maior que a máxima energia de distorção encontrada para o mesmo material num ensaio uniaxial de tração. Em resumo, foi adotado o modelo METAL com os critérios de plasticidade de VON MISES com PLASTICIDADE IDEAL, sem a consideração do endurecimento ou encruamento. No modelo de plasticidade ideal, ou também conhecido como perfeitamente plástico, o material não suporta esforços após o escoamento.

■ Interface

O programa DIANA possui duas famílias de elementos de interfaces: interface estrutural, para análise estrutural e interface

fluido-estrutura, utilizado em análises dinâmicas entre fluido e estrutura. Há ainda outro tipo de elemento finito que pode ser usado em substituição aos elementos de interface, os elementos de contato. Esses elementos geralmente são utilizados para analisar o contato entre elementos estruturais. Os elementos de interface utilizados nos modelos deste trabalho foram do tipo estrutural.

Para as duas junções consideradas nos modelos numéricos, entre a chapa e o pilar e entre a viga e a laje, a interface foi discretizada pelo modelo constitutivo de fissuração (CRACKING), com fissuração discreta (DISCRETE CRACKING) e comportamento frágil.

■ Armadura, parafusos e conectores de cisalhamento

Os parafusos, a armadura da laje e os conectores de cisalhamento foram discretizados como REINFORCE, um recurso do programa DIANA específico para simular o comportamento e barras de aço. O REINFORCE enrijece o elemento finito que atravessa, causando o mesmo efeito que barras de aço causam nas estruturas de concreto armado. Como se trata de aço, foi utilizado também para esses elementos o modelo de VON MISES com plasticidade ideal, como já explicado.

5.2 Elemento finito

Na construção de todos os modelos numéricos deste trabalho foram utilizados na construção da malha dois tipos de elementos finitos: elementos de estado plano de tensão e elementos de interface.

Figura 16 – Representação da malha de elementos finitos

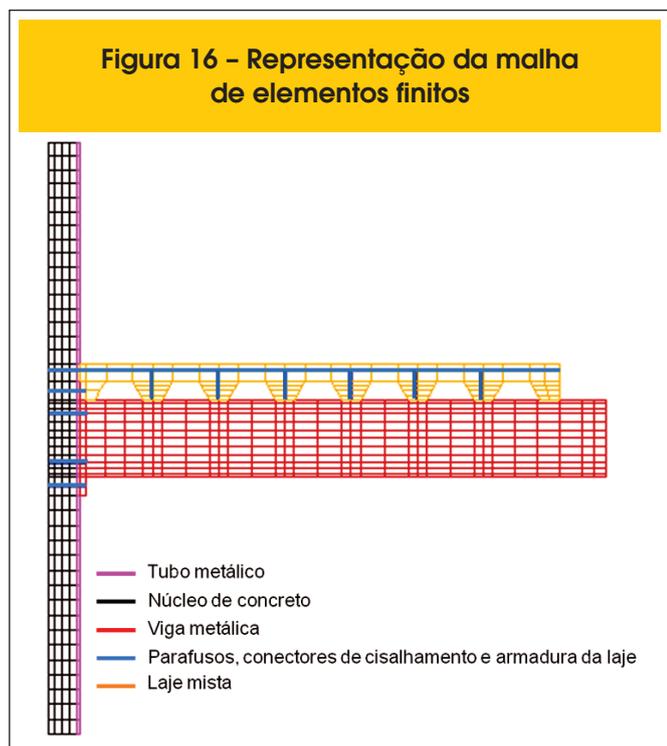


Figura 17 – Condições de contorno do modelo numérico

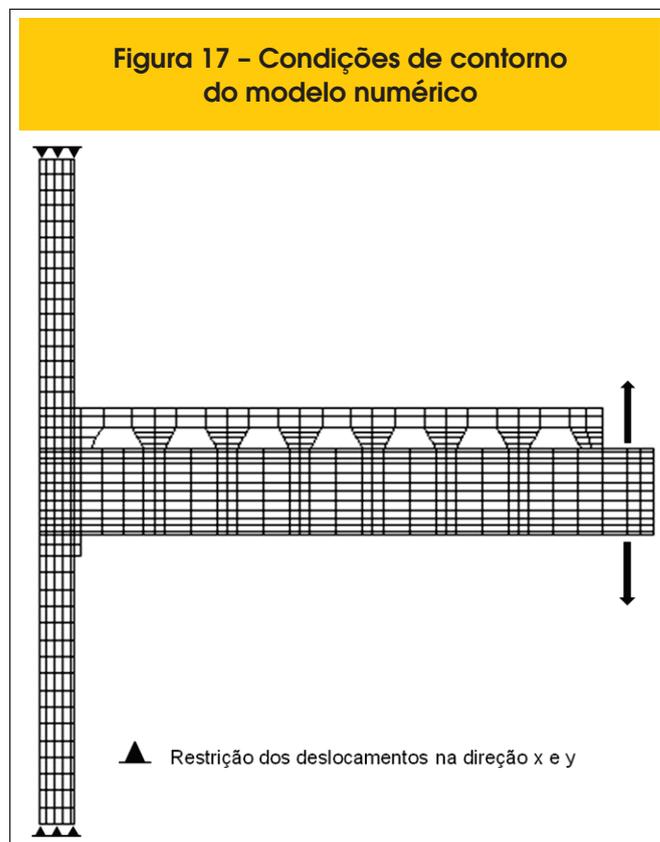
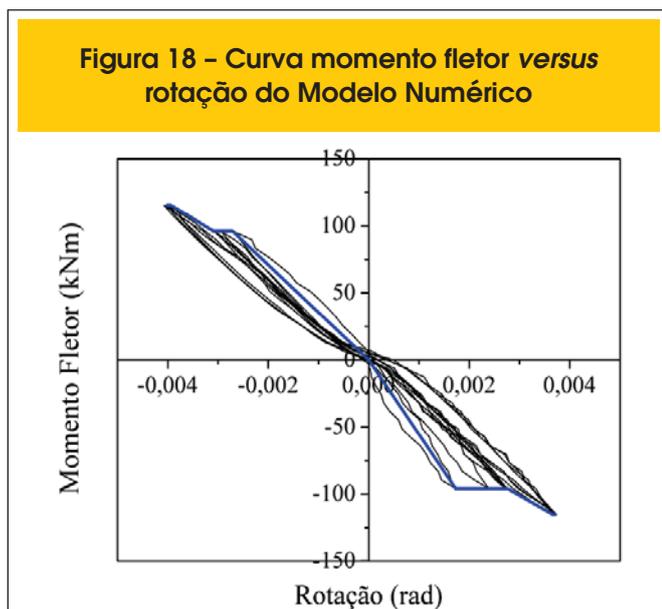


Figura 18 - Curva momento fletor versus rotação do Modelo Numérico



Os elementos de estado plano foram utilizados para discretizar o concreto e o aço, enquanto os elementos de interface foram usados na junção da chapa de topo com o pilar e entre a mesa superior da viga e a laje, quando ela existir.

O elemento utilizado para o concreto e o aço foi o elemento quadrilateral isoparamétrico Q8MEM. Esse elemento possui quatro nós, dois graus de liberdade por nó, os quais representam as translações em x e em y, função de interpolação linear (Figura 15). Nas ligações entre o pilar e a viga, e entre a viga e a laje, foi utilizado o elemento de interface L8IF, que possui 2 + 2 nós com dois graus de liberdade referentes às translações em x e em y. Esse elemento é representado por duas linhas paralelas em uma configuração plana, como mostra a Figura 15.

A estrutura desses elementos descreve o comportamento da in-

terface em termos da relação entre as forças normal e de cisalhamento no local. De acordo com [12], esses elementos são comumente utilizados na construção de malhas para representação numérica de estruturas de alvenaria, ligações e para descrever a aderência ao longo das armaduras, se enquadrando às necessidades deste trabalho.

5.3 Malha

Para a discretização da ligação optou-se pela modelagem plana, por essa fornecer as informações necessárias às análises e também para maior agilidade no processamento dos modelos numéricos, que foram vários em função da análise paramétrica. Outro artifício utilizado para diminuir o tempo gasto com modelagem foi a representação numérica de apenas metade do modelo físico. A malha de elementos finitos final gerada apresentou 903 nós e 775 elementos. A Figura 16 apresenta a malha de elementos finitos com a indicação dos elementos estruturais que compõem o modelo numérico.

5.4 Condições de contorno

As condições de contorno adotadas para a simulação numérica foram as restrições ao deslocamento em x e y na base e no topo do pilar, garantindo as mesmas condições do ensaio em laboratório. A aplicação dos esforços foi feita próximo a extremidade da viga, à aproximadamente 1580 mm da ligação, com a realização de controle de força. A representação das condições de contorno consta na Figura 17.

5.5 Análise não-linear

A análise utilizada na simulação numérica foi a não-linear, com a consideração apenas da não linearidade física dos materiais. Para a resolução do sistema não-linear foi adotado o método secante com critério de verificação da convergência por normas de força e deslocamento.

Com relação à aplicação da força, foram realizados 557 passos de carga de 4 kN, sendo 15 passos de carga por semi-ciclo de amplitude igual a 60 kN e 19 passos para amplitude de 76 kN. Optou-se por passos dessa magnitude para tornar o processamento mais rápido, já que não ocorrem problemas de convergência.

6. Resultados numéricos

A Figura 18 apresenta a curva momento fletor versus deslocamento obtida com a simulação numérica com carregamento cíclico. Nota-se ao observar essa curva uma rigidez um pouco superior no sentido negativo do momento fletor, vale ressaltar, que nos dois sentidos de momento fletor o esforço máximo aplicado foi de 115,20 kNm, provocando no sentido positivo uma rotação de 0,004 rad e no sentido negativo 0,0037 rad. De acordo com a envoltória, a rigidez inicial apresentada pela ligação foi de 42552,23 kNm/rad.

Na análise dos resultados foi possível observar uma boa correlação entre as envoltórias numérica e experimental, principalmente no sentido positivo do momento fletor, como ilustrado na Figura 19. A rigidez inicial apresentada pela envoltória numérica foi de 42552,23 kNm/rad e a média entre os lados do modelo experimen-

Figura 19 - Envoltórias experimentais e numérica do Modelo 1

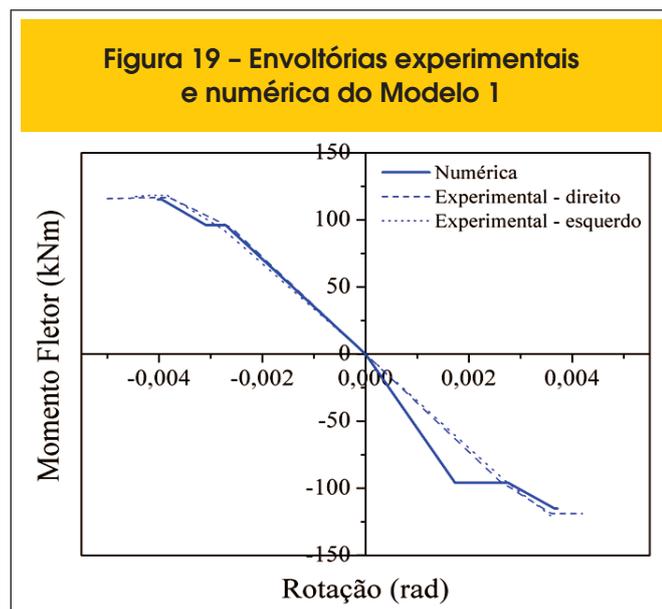


Tabela 4 – Relação entre as rigidezes da análise paramétrica do diâmetro dos parafusos

Diâmetro do Parafuso (mm)	Rigidez (kNm/rad)	$k_i/k_{i,16}$
16	42552,23	-
12,5	29385,91	0,69
20,0	42219,78	0,99
25,0	49017,47	1,15

tal foi de 35342,52 kNm/rad. A rigidez numérica foi 17% superior a rigidez experimental.

O valor superior da rigidez numérica da ligação com relação à rigidez experimental pode ter ocorrido por causa da área de aço adotada na simulação, pois é difícil saber ao certo qual a área de aço exata que está contribuindo no combate aos esforços aplicados, desse modo, foi adotada a área correspondente às quatro barras mais próximas ao pilar, totalizando 490 mm² (4 f 12,5 mm). Esse critério foi adotado em observância aos resultados experimentais de deformação das barras de aço. Para os parafusos foi considerada a área de dois elementos, igual a 400 mm², para cada linha.

7. Análise paramétrica

A análise paramétrica foi realizada com a intenção de identificar variáveis no dimensionamento da tipologia de ligação mista estudada no presente trabalho que melhorasse seu comportamento com relação à rigidez apresentada.

7.1 Diâmetro dos parafusos

Com relação ao diâmetro dos parafusos, foram utilizadas na análise paramétrica uma bitola inferior a utilizada no modelo físico e duas

Tabela 5 – Relação entre as rigidezes da análise paramétrica da altura da laje

Altura da laje	Rigidez (kNm/rad)	$k_i/k_{padrão}$
Referência $L_{laje} = 120$ mm	42552,23	-
$L_{laje} = 140$ mm	42171,03	0,99
$L_{laje} = 160$ mm	45381,65	1,06
$L_{laje} = 180$ mm	46042,11	1,08

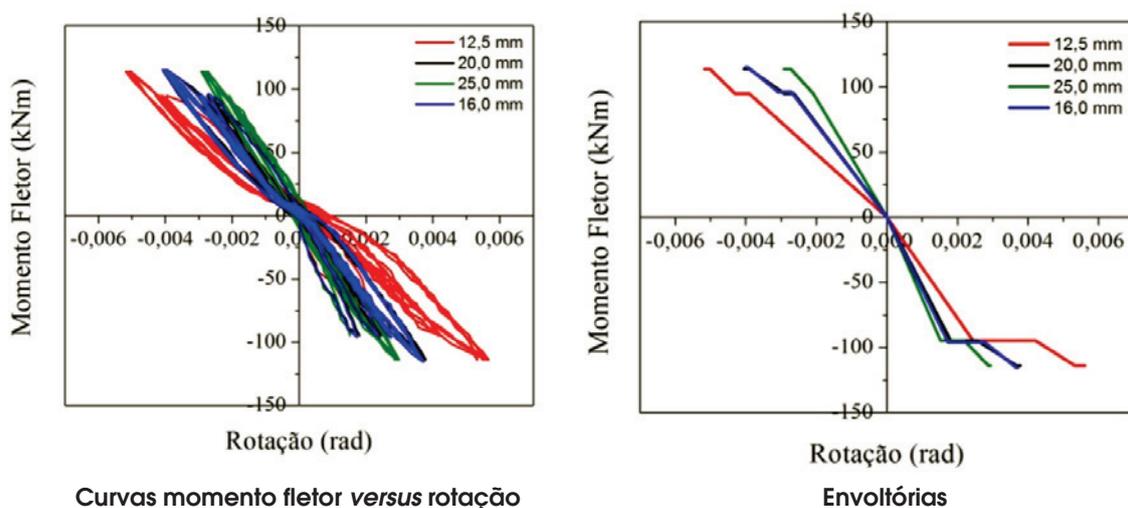
bitolas superiores, sendo elas de 12,5 mm, 20 mm e 25 mm. As outras características da ligação foram mantidas as mesmas, assim como as propriedades dos materiais. Os ciclos de carregamento aplicado nas simulações realizadas foram os mesmos utilizados na simulação do modelo de referência e também nos ensaios.

Tendo como base a rigidez do modelo de referência, que é de 42552,23kNm/rad, com a utilização de parafusos de diâmetro menor, de 12,5 mm, a rigidez caiu por volta de 31%. Ao aumentar os diâmetros, no caso da utilização de diâmetro de 20 mm, com aumento de 25% no diâmetro, a rigidez praticamente manteve-se a mesma. No outro caso, para o diâmetro de 25 mm, o aumento sofrido foi de 15%, como mostram os dados da Tabela 4. A representação das curvas momento fletor versus rotação e as envoltórias estão na Figura 20.

7.2 Altura da laje

No Modelo de ligação considerado como referência neste trabalho foi utilizada laje com 120 mm de altura e para o estudo da influência desse parâmetro foram utilizadas alturas de 140 mm, 160 mm e 180 mm. Cabe salientar que a altura da armadura longitudinal e de distribuição também é alterada, sendo posicionada mais para

Figura 20 – Comparação das curvas momento fletor versus rotação e envoltórias utilizadas na análise paramétrica do diâmetro dos parafusos



cima, acompanhando a altura da laje, deixando um cobrimento de 25 mm, como especificado em [13].

Na Figura 17 estão apresentadas as envoltórias resultantes da análise paramétrica da altura da laje comparadas com a envoltória do modelo de referência. Como já era esperado, todos os modelos de ligação com laje de maior espessura apresentaram maior rigidez, mas as diferenças encontradas foram pequenas. Como consta na Tabela 5, para a laje com 140 mm, quase não houve diferença na rigidez apresentada pela ligação quando comparada ao modelo de referência, chamado de Modelo 1 na Figura 21. Para a ligação com laje de 160 mm de altura a diferença percentual foi de 6% e para a laje mais alta, com 180 mm, a diferença encontrada foi de 8%. Como pode ser observado também na Figura 21, a rigidez ao momento fletor negativo foi superior para todos os casos, confirmando a contribuição da laje na resistência aos esforços. Outra observação que pode ser feita é que espessura

da laje não influenciou de maneira diferente a rigidez da ligação levando-se em consideração os sentidos do momento fletor. Tanto no sentido positivo quanto negativo a tendência foi a mesma para todas as espessuras.

7.3 Seção transversal da viga

Para a análise paramétrica da influência da seção transversal da viga metálica no comportamento da ligação foram variadas as espessuras das mesas e da alma e a largura das mesas. Essas variações foram realizadas compondo três seções transversais de viga: a primeira com mesa de espessura de 10 mm, a segunda com a largura das mesas igual a 140 mm e a terceira, na tentativa de aumentar ainda mais a rigidez, com mesas e alma com espessura de 10 mm. As seções transversais das seções utilizadas na análise paramétrica se encontram na Figura 22.

Figura 21 - Comparação das curvas momento fletor versus rotação e envoltórias utilizadas na análise paramétrica da altura da laje

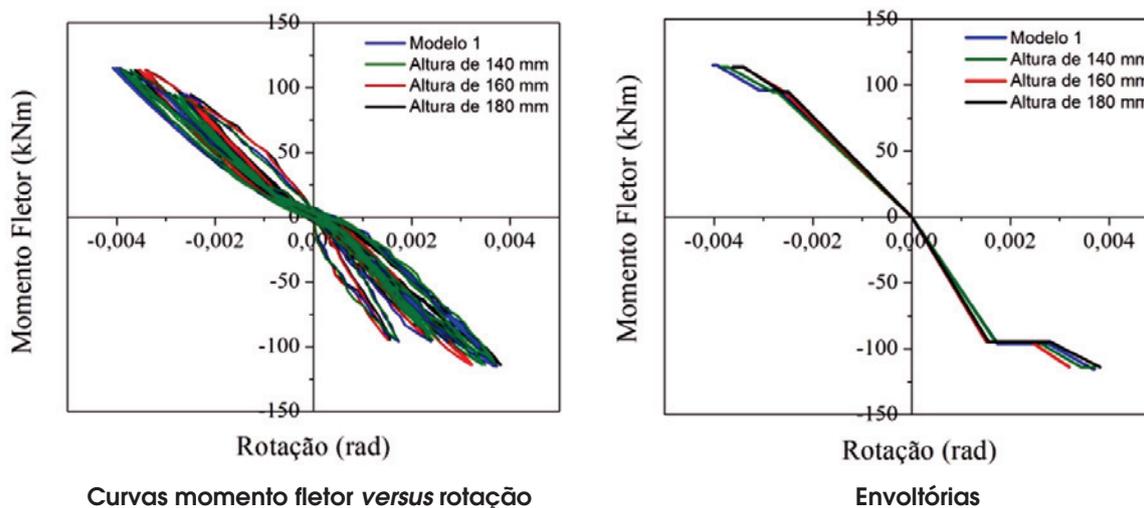


Figura 22 - Seções transversais das vigas utilizadas na análise paramétrica

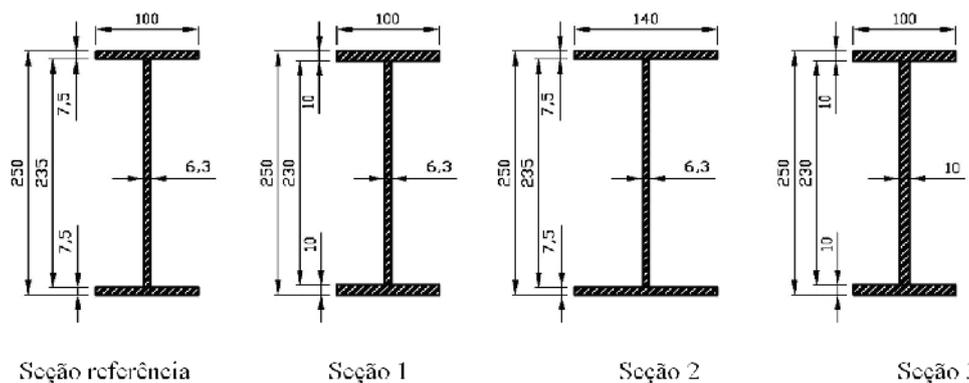
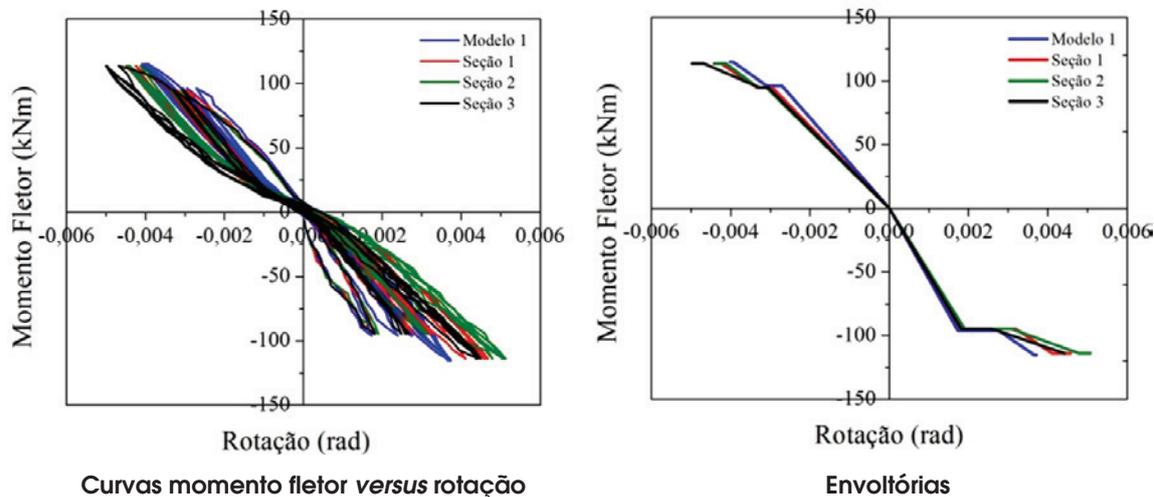


Figura 23 – Comparação das curvas momento fletor versus rotação e envoltórias utilizadas na análise paramétrica da seção transversal da viga



Na comparação das curvas momento fletor versus rotação de todas as seções transversais de viga com a curva do modelo de referência (Figura 23), notou-se que a rigidez de todas ligações com vigas mais robustas foram inferior e considerada menos rígida pelo fato de possuir viga com mesas e alma mais espessas. Ao analisar o processo de dimensionamento da ligação, a justificativa para a menor rigidez encontrada para os modelos da análise paramétrica da seção da viga foi encontrada. Como todos os outros parâmetros da ligação do modelo de referência foram mantidos, incluído o diâmetro dos parafusos e suas propriedades, com a utilização de vigas mais resistentes e menos deformáveis, estes elementos foram mais solicitados se tornando o ponto fraco da ligação, incompatíveis com os elementos conectados.

A Tabela 6 apresenta as rigidezes obtidas para as ligações analisadas, incluindo sua comparação com a ligação de referência. A ligação, no qual, a viga com mesas mais espessas foi utilizada, apresentou rigidez 8% inferior. Já, as rigidezes para as outras duas ligações com seção transversal com mesas mais largas (seção 2) e com mesas e alma mais espessas (seção 3), a diferença foi mais significativa, atingindo aproximadamente 12%.

De acordo com os resultados da análise paramétrica da seção transversal da viga não foi possível retirar informações conclusivas em

função do diâmetro dos parafusos não ser adequado para vigas utilizadas. Apesar disso, o ocorrido foi importante para atentar os engenheiros projetistas sobre o correto dimensionamento das ligações.

8. Conclusões

A partir da comparação dos resultados experimentais com os numéricos foi possível concluir que a modelagem bidimensional retratou de maneira satisfatória o comportamento da tipologia de ligação mista estudada no presente trabalho, proporcionando vantagens como facilidade e rapidez para compor o modelo e reduzido tempo de processamento.

Quanto a análise paramétrica, essa foi realizada tendo como referência os resultados obtidos no trabalho de [14]. Foram variados o diâmetro dos parafusos, a seção transversal da viga e a altura da laje. Para cada parâmetro foram adotadas três variações e quando um era alterado, todos os outros se mantinham fixos para facilitar as comparações. As principais conclusões obtidas foram:

- A utilização de parafusos com diâmetros maiores foi o parâmetro que mais influenciou o comportamento da ligação dentre todos os analisados. Com o aumento do diâmetro dos parafusos de 16 mm para 25 mm, ou seja 50% de aumento, o ganho de rigidez foi de 15%. Utilizando parafusos de 20 mm praticamente não ocorreu mudança na rigidez.
- A variação da altura da laje também proporcionou alterações no comportamento da ligação. Quando foi utilizada a altura de 140 mm a rigidez praticamente não se alterou, mas para a altura de 160 mm ocorreu um incremento de 6%. Quando a altura da laje foi aumentada para 180 mm, a rigidez também aumentou cerca de 8% em comparação ao modelo de referência. Esses dados comprovam que o aumento da altura da laje contribui no aumento da rigidez da ligação, mas existe um limite para essa altura no qual esse parâmetro deixa de influenciar significativamente na rigidez apresentada.
- Com base nos resultados da análise paramétrica da seção

Tabela 6 – Relação entre as rigidezes da análise paramétrica da seção da viga

Seção da viga	Rigidez (kNm/rad)	$k_i/k_{padrão}$
Seção referência	42552,23	-
Seção 1	39227,41	0,92
Seção 2	37157,68	0,88
Seção 3	38189,66	0,88

transversal da viga não foi possível retirar informações conclusivas a respeito da influência desse parâmetro no comportamento da ligação. Isso ocorreu devido o diâmetro dos parafusos, 16,0 mm, não ser adequado para vigas mais resistentes, como é o caso das seções 1, 2 e 3. Apesar disso, o ocorrido foi importante para atentar os engenheiros projetistas sobre o correto dimensionamento das ligações.

Como conclusão final do trabalho pode-se afirmar que, para a tipologia de ligação estudada, dentre os três parâmetros analisados o que mais influenciou no comportamento, no que tange a rigidez da ligação, foi o diâmetro dos parafusos, pois mantendo todos os outros parâmetros iguais e aumentando em 50% o diâmetro, a rigidez foi incrementada em 15%.

9. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de doutorado concedida, à FAPESP pelo projeto temático “Nucleação e incremento da pesquisa, inovação e difusão em concreto pré-moldado e estruturas mistas para a modernização da construção civil”, que financiou a construção do modelo experimental, ao Laboratório de Estruturas (LE) do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, assim como, todos os técnicos que contribuíram para a realização do ensaio.

10. Referências bibliográficas

- [01] TRAJANOSKA, B.; ARSOVA-MILOSHEVSKA, G.; BOGATINOSKI, Z. (2000). Numerical modeling of welded rigid beam-column connections at multi-storey structures. Balkanski. Sofia, Bulgaria.
- [02] MAGGI, Y. I. (2004). Análise do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo estendida. Tese (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 269p.
- [03] CHOI, S. M.; HONG, S. D.; KIM, Y. S. (2006). Modeling analytical moment-rotation curves of semi-rigid connections for CFT square columns and steel beams. *Advances in Structural Engineering*, Vol. 9, No. 5.
- [04] HU, J. W.; LEON, R. T. (2010). Analyses and evaluations for composite-moment frames with SMA PR-CFT connections. *Springer Science*. v.65, p. 433 – 455.
- [05] CONCEIÇÃO, J. L. (2011). Ligação mista viga-pilar resistente a momento. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 155p.
- [06] DE NARDIN, S. (1999). Estudo teórico-experimental de pilares mistos compostos por tubos de aço preenchidos com concreto de alta resistência. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 148p.
- [07] DE NARDIN, S. (2007). Investigação de dispositivos de ligação entre pilares preenchidos e vigas mistas em pavimentos mistos delgados. Relatório científico de Pós-doutorado. São Carlos. 149p.
- [08] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2008). NBR 8800: Projeto de execução de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro – RJ.
- [09] EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION (1993). Eurocode 3 – Design of steel structures. Part 1.8: Design of joints. Brussels.
- [10] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, CEB-FIP Model Code 1990 – Design Code, Thomas Telford Services Ltd., London, 1993, 437 p.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2002). NBR 6892: Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente. 34p. Rio de Janeiro – RJ.
- [12] TNO BUILDING AND CONSTRUCTION RESEARCH, Diana User’s Manual – Release 9, Delft, Netherlands, 2005, 622 p.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2002). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro – RJ.
- [14] KATAOKA, M. N. (2011). Estudo do comportamento de ligações viga-pilar preenchido submetidas a ações cíclicas. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 192p.