

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE MODELOS NUMÉRICOS BIDIMENSIONAIS E TRIDIMENSIONAIS NO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES MISTAS VIGA-PILAR

Marcela Novischi Kataoka¹ & Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs²

Resumo

A análise do comportamento das estruturas através de meios computacionais está cada vez mais sendo realizada em função da economia proporcionada. Neste artigo é estudado o comportamento de uma ligação parafusada entre pilar metálico preenchido com concreto, viga mista com chapa de topo e laje com forma de aço incorporada. A análise foi realizada com base em dados experimentais e numéricos, enfatizando os resultados das simulações computacionais de modelos bidimensionais e tridimensionais. O objetivo principal do trabalho foi definir até que ponto um modelo plano é capaz de representar o comportamento da ligação e quando é necessário utilizar um modelo refinado para realizar análises mais aprofundadas. A comparação entre os resultados numéricos mostrou que o modelo plano pode ser utilizado em análises mais superficiais, como o comportamento força versus deslocamento, já em análises que necessitem das tensões e deformações, um modelo tridimensional é o mais indicado.

Palavras-chave: Estrutura Mista. Análise Numérica. Ligação viga-pilar.

COMPARISON BETWEEN THE RESULTS OF COMPUTER SIMULATION OF TWO-DIMENSIONAL AND THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODELS IN THE STUDY ON THE BEHAVIOR OF COMPOSITE BEAM-COLUMN CONNECTION

Abstract

The behavior analysis of the structures by computational methods is increasingly being performed because of the cost savings. In this paper the behavior of a bolted connection between steel column filled with concrete, composite beam with endplate and slab with steel shape was studied. The analysis was based on experimental and numerical results, which the results of computer simulations of two-dimensional and three-dimensional models were compared. The main objective was to define how far a plane model is able to represent the behavior of the connection and when it is necessary to use a refined model to perform further analysis. The comparison between the numerical results showed that the plane model can be used in simple analyzes, such as force versus displacement behavior, when the analysis requires tensions and deformations, a three dimensional model is indicated.

Keywords: Composite Structure. Numerical Analysis. Beam-Column Connection.

¹ Doutor em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, kataoka@sc.usp.br

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

1 INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento de estruturas está a cada dia mais rápido e menos oneroso em função do desenvolvimento da informática. A simulação numérica com o emprego do método dos elementos finitos (MEF) contribuiu com a agilidade na simulação do comportamento de estruturas, dispensando, em alguns casos, a construção de um modelo físico para análise experimental. A utilização da análise numérica já está bastante difundida no meio acadêmico, principalmente em pesquisas que envolvem estruturas complexas que apresentam algum grau de não linearidade.

Existem cinco tipos de geometrias que podem ser utilizadas na construção dos modelos numéricos: os reticulados, os *bidimensionais*, os *tridimensionais*, os *mistos* e *com cabos ou membranas*. Os modelos reticulados são formados pela associação de elementos de barras, no qual a dimensão do eixo longitudinal é preponderante em relação às demais dimensões. Os modelos bidimensionais possuem duas dimensões preponderantes, com a terceira denominada espessura para o estado plano de tensões, placa e casca. Para o estado plano de deformações a espessura é tida como unitária com comportamento elástico. No caso dos modelos tridimensionais, as três coordenadas são necessárias para a descrição do comportamento da estrutura. Como o próprio nome diz, as estruturas mistas são consequência da associação dos modelos já descritos e, por fim, os modelos com cabos e membranas são aqueles com resistência apenas à tração. A Figura 1 apresenta o esquema de classificação dos modelos matemáticos.

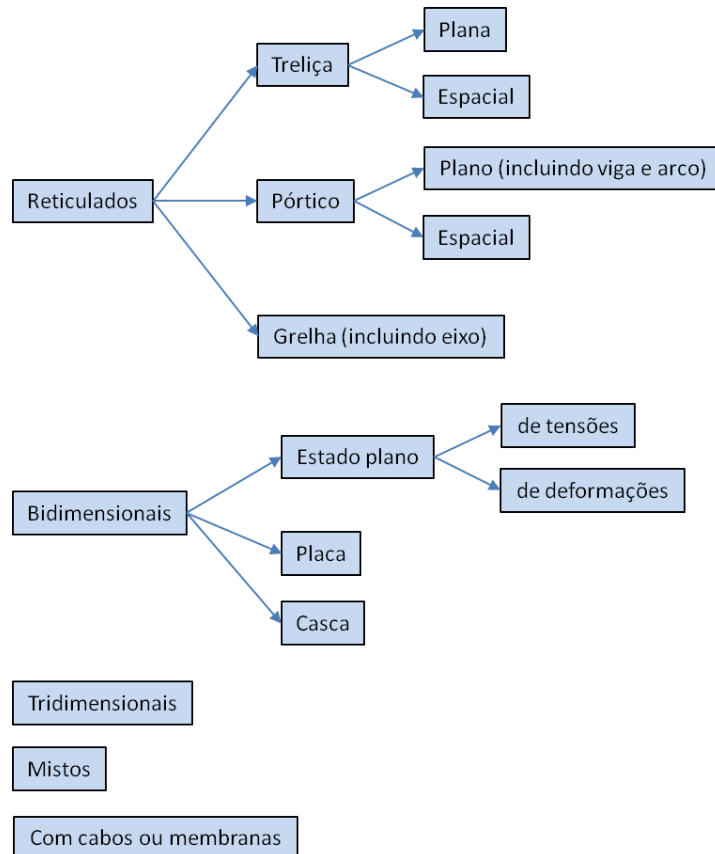


Figura 1 – Classificação dos modelos matemáticos quanto à geometria (Soriano, 2003).

Como o meio físico é sempre muito complexo, principalmente os de caráter estrutural, é comum a adoção de hipóteses simplificadoras para a criação do modelo matemático, expresso por equações matemáticas. A linearidade física se refere à adoção de relações lineares entre a tensão e a deformação. Já, a linearidade geométrica corresponde à hipótese de pequenos deslocamentos em estruturas nos quais as equações de equilíbrio possam ser escritas na configuração não deformada. A escolha do tipo de análise depende do procedimento de modelagem adotado.

Durante a revisão da literatura, muitos trabalhos relacionados à análise numérica de ligações em estruturas metálicas e mistas foram encontrados, principalmente advindos de pesquisas realizadas em centros acadêmicos do exterior, como Ásia e Europa. O grande número de pesquisas sobre o comportamento de ligações nessas regiões se explica pelo alto índice de ocorrência de terremotos, pois quanto mais rígida uma ligação melhor será o comportamento global da estrutura sob a ação de sismos.

Como exemplo de modelagens tridimensionais se pode citar o estudo de Hu *et al.* (2010) com a realização da modelagem numérica no programa ABAQUS de uma tipologia de ligação parafusada com pilar preenchido com concreto. Foram empregados nesse modelo elementos sólidos de oito nós com a incorporação da não-linearidade da propriedade dos materiais, introdução de elementos de contato e a consideração do atrito e fissuração do concreto. Tudo isso requereu um custo computacional alto para o processamento, mas segundo os pesquisadores, esse método de modelagem foi útil para fornecer uma compreensão mais detalhada e precisa do comportamento global da ligação, incluindo a distribuição de tensões nas superfícies de contato.

Outro exemplo de modelagem de ligação mista tridimensional foi encontrado em Conceição (2011). Nessa pesquisa, realizada na Universidade Federal de Minas Gerais, foram estudadas ligações parafusadas entre viga-metálica e pilar revestido com concreto. Na discretização do modelo foi utilizado elemento finito de oito nós e três graus de liberdade para o concreto e os perfis metálicos e elementos de contato foram utilizados entre o concreto e o aço da estrutura e entre a viga e o pilar.

Para simplificar o modelo e conseguir reduzir o tempo de processamento, alguns pesquisadores adotam a geometria do tipo mista, onde são utilizados elementos finitos sólidos e planos. No trabalho de Butterworth (2004) foi modelada no programa LUSA uma ligação parafusada em estrutura metálica. Nesse modelo foram utilizados elementos sólidos para a discretização das mesas da viga, chapa de topo e mesa do pilar onde ocorre a ligação, elementos de casca para a alma da viga e pilar, enrijecedores e mesa do pilar oposta à ligação, elementos de interface entre a chapa de topo e a mesa do pilar e elementos de barras para os parafusos. Observa-se que os elementos tridimensionais são utilizados nas regiões de maior interesse para análise do comportamento.

Em Choi *et al.* (2006) também foi encontrado modelo de ligação com geometria mista. A simulação numérica foi feita no programa Ansys, onde foram utilizados elementos de casca para a discretização dos elementos de aço e elementos sólidos para o concreto de preenchimento do tubo. Para não considerar a aderência perfeita entre o concreto e o tubo metálico, e simular o comportamento mais próximo do obtido em laboratório, elementos de contato foram inseridos entre esses materiais, no qual foi considerada apenas a transmissão de esforços de compressão, negligenciando a presença do atrito.

A modelagem plana também é utilizada no estudo do comportamento de ligações, principalmente em trabalhos mais antigos, como o caso de Mistakidis *et al.* (1997) que modelou uma ligação com T-stud bastante utilizada em estruturas metálicas. Segundo os autores, os efeitos primários de flexão e a distribuição de tensões puderam ser facilmente analisados com a modelagem plana, mas os secundários não foram identificados, o que não invalidou a análise por esses parâmetros não influenciarem drasticamente todo o campo de tensões devido ao tipo de carga aplicada.

Tendo como base os trabalhos citados, é apresentada neste artigo a comparação entre os resultados da simulação numérica de dois tipos de modelos matemáticos representativos da mesma ligação ensaiada experimentalmente, um bidimensional e outro tridimensional. O objetivo é analisar o quanto um modelo é melhor que o outro no estudo do comportamento da estrutura, levando em consideração aspectos como custo computacional e resultados fornecidos.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os resultados experimentais utilizados neste trabalho foram retirados da pesquisa de doutorado de Kataoka (2011), que estudou o comportamento de ligações mistas parafusadas envolvendo pilares preenchidos com concreto. Foram realizados ensaios com carregamento cíclico reversível, no qual se estudou a influência da laje e sua taxa de armadura, assim como da utilização de um sistema novo de ancoragem da armadura de continuidade no comportamento da ligação. Nesse trabalho foram utilizados os resultados de apenas um dos modelos ensaiados para comparação com os resultados das simulações numéricas.

2.1 Detalhamento do modelo experimental

Os pilares mistos preenchidos com concreto apresentavam seção transversal quadrada de dimensões de 200x200 mm com paredes de 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 mesas de 7,5 mm de espessura e alma com 6,3 mm. A chapa de topo, soldada em uma das extremidades das vigas, possuía 22,2 mm de espessura. Todos os perfis eram constituídos por aço ASTM A-36. As ligações foram dimensionadas com oito parafusos passantes de 16 mm de diâmetro constituídos por aço SAE 1020.

Os conectores de cisalhamento utilizados para proporcionar a ação conjunta da viga 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. A forma de aço da laje mista era de chapa metálica de 0,80 mm de espessura, com nervuras de altura igual a 59 mm. A Figura 2 apresenta o projeto completo dos elementos componentes dos modelos de ligações com suas respectivas dimensões.

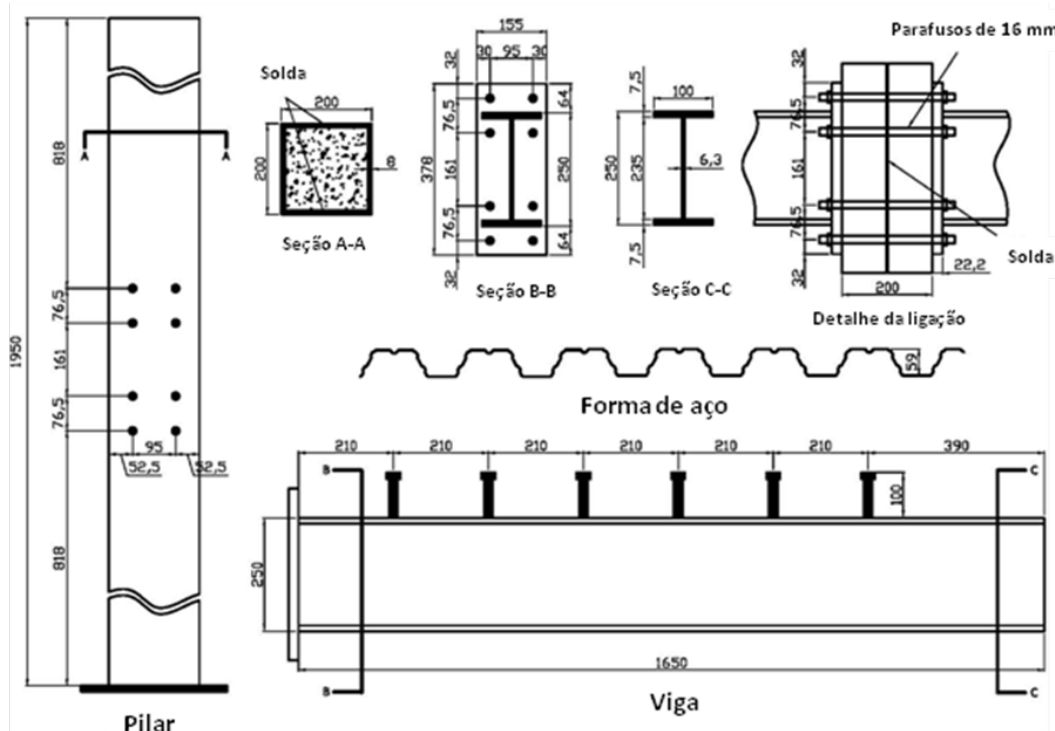


Figura 2 – Dimens dos elementos componentes da ligação.

A ligação era constituída de um pilar, duas vigas em balanço, com seis conectores de cisalhamento cada uma, e laje com forma de aço incorporada de 120 mm de altura e 800 mm de largura. As dimensões totais dos modelos eram de 1950 mm de altura e comprimento de 3544,4 mm, como ilustrado na Figura 3.

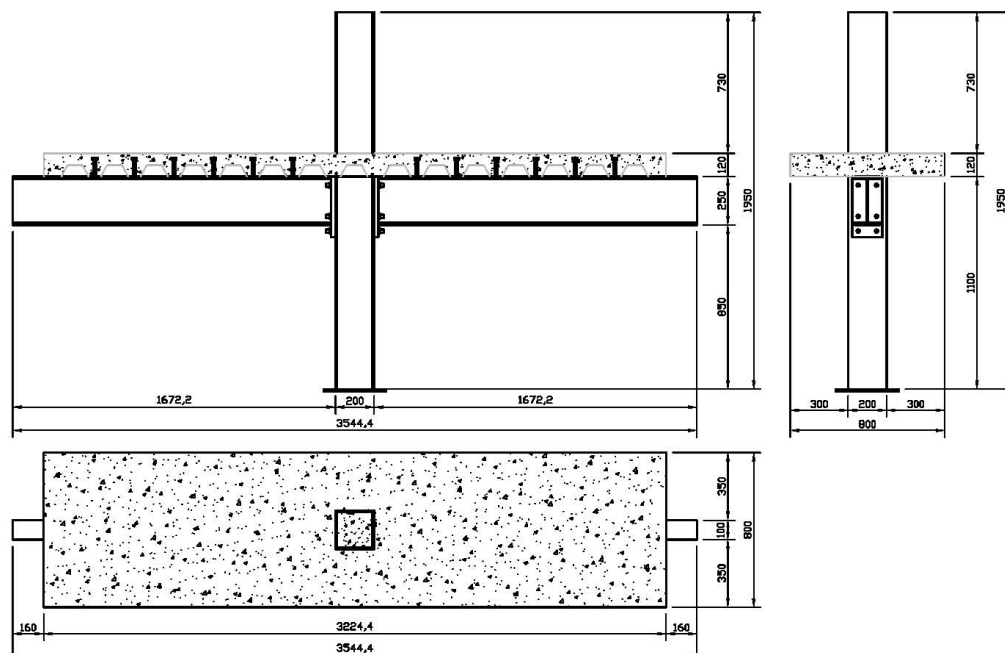


Figura 3 – Dimensões do modelo de ligação ensaiado.

A laje mista foi construída apenas com armaduras negativas, pois que a forma de aço desempenha a função da armadura positiva. Foram utilizadas na armadura apenas barras de 12,5 mm de diâmetro, totalizando de 8 barras na longitudinal. A armadura transversal era composta por 24 barras de 8,0 mm, dispostas ao longo de toda a laje. A área total de aço utilizado no sentido longitudinal do foi de 981,75 mm², correspondendo à aproximadamente 1% da área da seção transversal. A Figura 4 apresenta a disposição das barras de aço na laje.

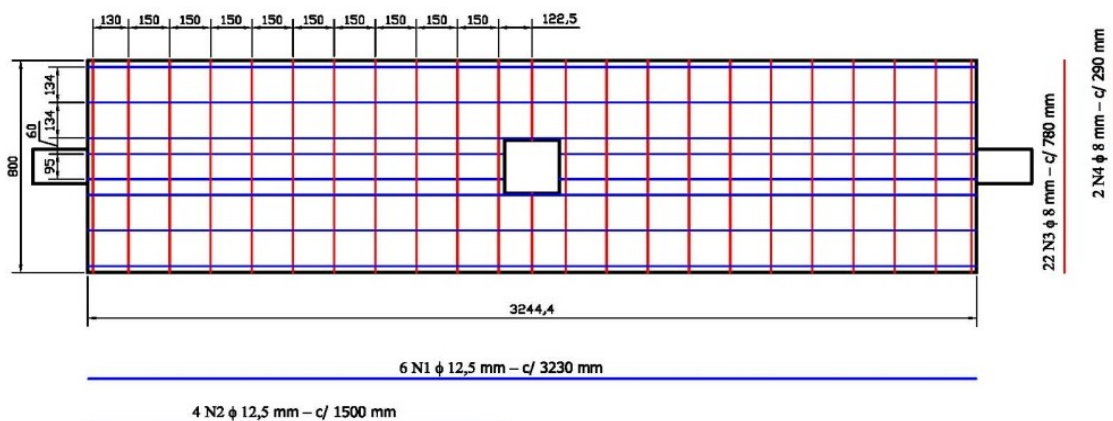


Figura 4 – Posição das barras de aço na laje mista.

Para proporcionar a continuidade das barras centrais que entravam em contato com o pilar, foram utilizadas luvas rosqueadas soldadas ao tubo metálico. As luvas no interior do pilar foram conectadas por barras de aço da mesma bitola que a armadura da parte externa para proporcionar a ligação mais rigidez com a continuidade das barras. Todo o processo de soldagem das luvas ao pilar foi feito anteriormente a sua concretagem. O posicionamento dos oito parafusos de 16 mm também foi realizado antes do lançamento do concreto, para que ficassem aderentes ao núcleo. A Figura 5 mostra a sequência de montagem do modelo de ligação, desde a preparação das peças isoladas até a concretagem final.



Figura 5 – Sequência de montagem do modelo físico.

2.2 Resultados Experimentais

Para comparação com os resultados das simulações numéricas foram considerados os resultados experimentais referentes à força aplicada e deslocamento vertical da viga, tensões nas vigas e tensões na armadura de continuidade.

Os deslocamentos verticais máximos das vigas, obtidos sob o ponto de aplicação da força, foram de 55,85 mm para o lado direito e de 54,46 mm para o lado esquerdo, para uma força correspondente a 75 kN. Pode-se notar ao observar as curvas da Figura 6 que as histereses força *versus* deslocamento não são simétricas, apresentando maior rigidez ao momento fletor negativo, no qual o principal elemento resistente é a armadura da laje.

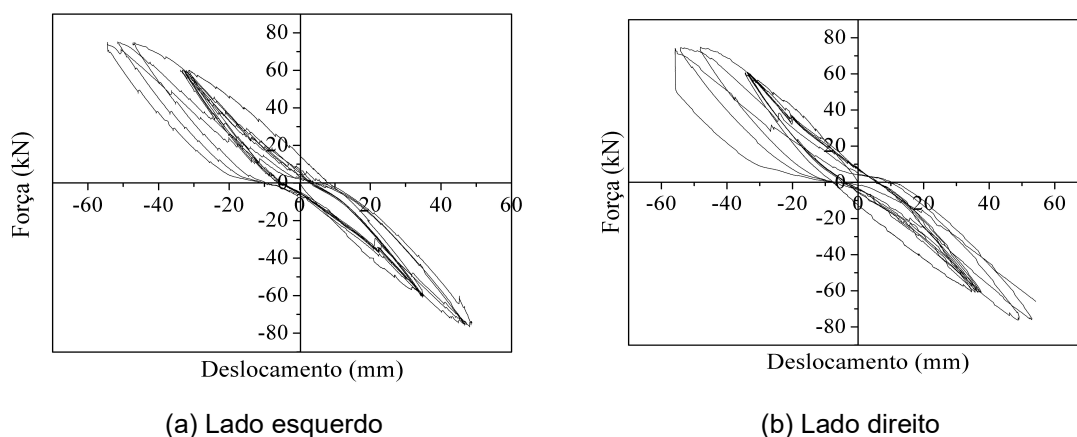


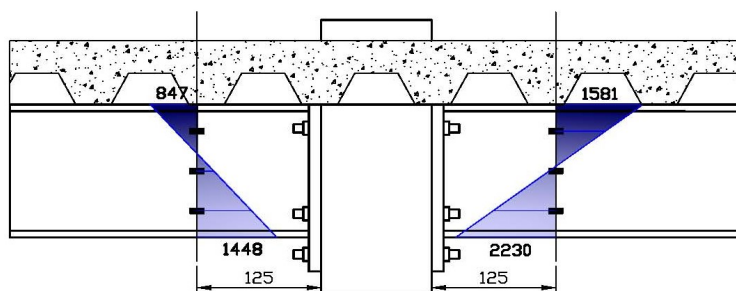
Figura 6 – Curvas força *versus* deslocamento experimentais.

O ensaio foi interrompido quando ocorreu a ruptura do concreto na região do último conector de cisalhamento, em função do deslocamento vertical elevado da viga que causou forças de tração

nessa região. Quando esses esforços atingiram a resistência à tração do concreto houve a ruptura e descolamento da laje. No momento da ruptura, as vigas apresentaram grandes deformações, cerca de 1489×10^{-6} mm/mm, indicando estar próxima do escoamento. Quando tracionadas, para o último estágio de carregamento, a viga direita atingiu 1581×10^{-6} mm/mm de deformação e a viga esquerda 1448×10^{-6} mm/mm, como indicado na Figura 7. Para a deformação máxima de 1581×10^{-6} mm/mm a tensão corresponde na viga é de 347 MPa, valor próximo a tensão de escoamento do material que é de 350 MPa.



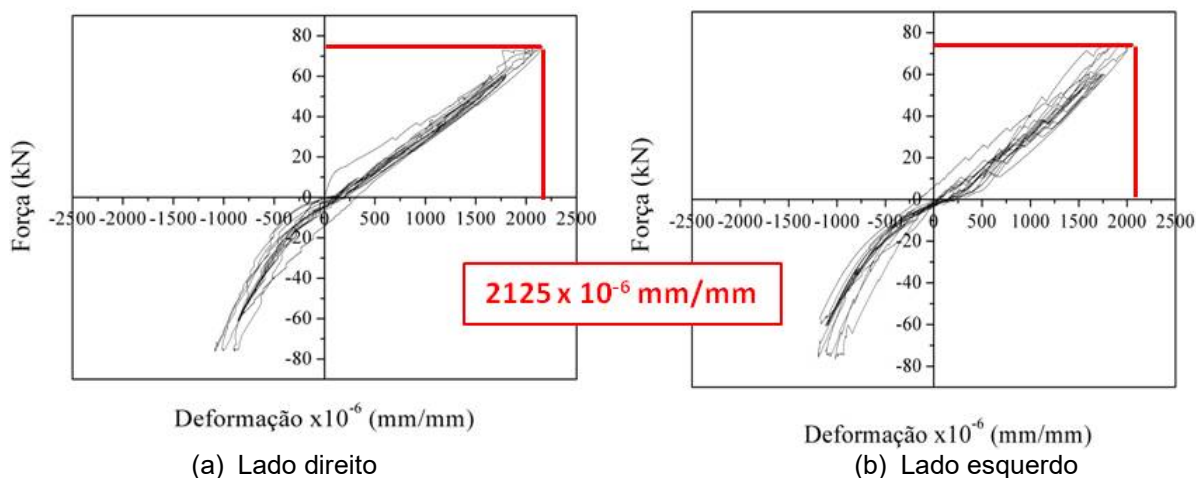
(a) Desprendimento da laje



(b) Deformações nas vigas ($\times 10^{-6}$ mm/mm)

Figura 7 – Falha na ligação e deformações nas vigas.

As curvas força *versus* deformação da armadura de continuidade, Figura 8, foram traçadas para o lado esquerdo e direito, tendo como base a deformação média das duas barras fixadas ao pilar por meio de luvas rosqueadas. As deformações máximas dessas barras de aço não ultrapassaram 2223×10^{-6} mm/mm à tração e -1250×10^{-6} mm/mm à compressão, apresentando curvas muito semelhantes para os dois lados. A média da deformação à tração máxima atingida pelas barras foi de 2125×10^{-6} mm/mm. Como módulo de elasticidade do material é de 201245,00 MPa, tensão correspondente é de 430 MPa, inferior a tensão de escoamento que é de 525,81 MPa e de acordo com os ensaios de caracterização do material. A Figura 8 apresenta as curvas força *versus* deformação da armadura de continuidade.



Deformação $\times 10^{-6}$ (mm/mm)

(a) Lado direito

Deformação $\times 10^{-6}$ (mm/mm)

(b) Lado esquerdo

Figura 8 – Curvas força *versus* deformação da armadura de continuidade.

3 ANÁLISE NUMÉRICA

A ligação em estudo foi submetida à análise não-linear pelo método dos elementos finitos, utilizando o programa comercial DIANA. Esse programa é uma implementação do Método dos Deslocamentos desenvolvida de acordo com o Método dos Elementos Finitos, aplicado juntamente com vários modelos físicos e materiais, incluindo modelos para materiais frágeis ou quase-frágeis, como o concreto.

Foram criados para comparação um modelo numérico bidimensional e um tridimensional. Para ambos foram utilizadas as mesmas propriedades dos materiais, que são aquelas obtidas nos ensaios de caracterização. A Tabela 1 resume todas as propriedades adotadas para cada elemento da ligação.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais

CONCRETO DO PILAR			
Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Poison (ν)
3,59	54,81	38415,51	0,2
CONCRETO DA LAJE			
Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Poison (ν)
3,77	51,41	34333,65	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 CISLHAMENTO			
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 (Barras de ϕ 12,5 mm)	201245,00		0,3

3.1 Modelos constitutivos

Os modelos constitutivos dos materiais utilizados nas modelagens tanto bidimensional quanto tridimensional foram os mesmos para todos os elementos. A seguir são descritos cada material.

- **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**

Foi adotado 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**

Para as duas interfaces consideradas no modelo numérico, 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**

Foram discretizados como REINFORCE, um recurso do programa DIANA específico para simular o comportamento de 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 elementos de aço foi utilizado também o modelo de VON MISES com plasticidade ideal.

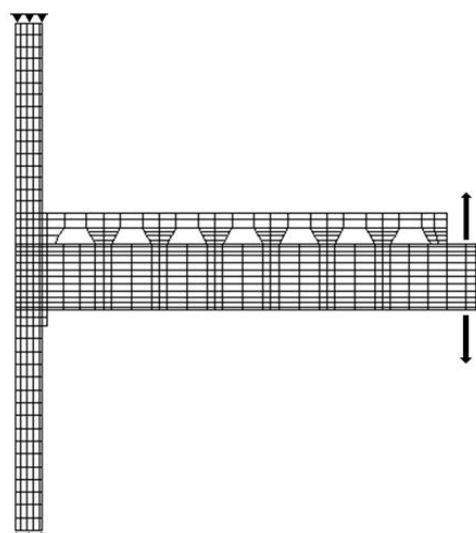
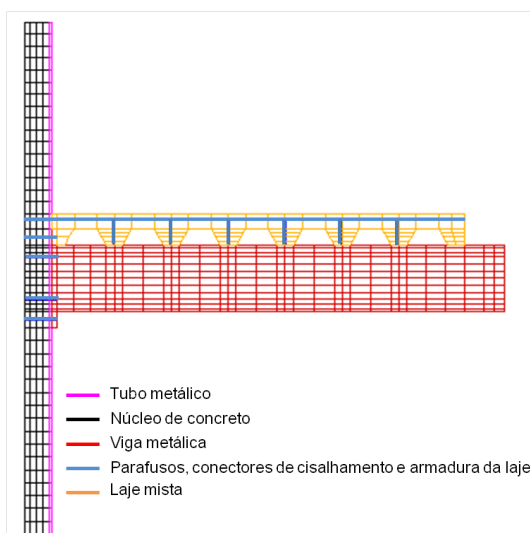
3.2 Modelo bidimensional

- **Geometria, malha e condições de contorno**

Na construção do modelo numérico bidimensional foi utilizada simétrica, na qual apenas metade do modelo físico foi representada, como ilustrado na Figura 9.a. Por ser um modelo plano, a linha da armadura e dos parafusos foram definidas com a área de aço referente ao número de elementos naquela direção. Dessa maneira, para os parafusos foi utilizada a área de dois elementos, 402 mm², e para a armadura a área de aço foi considerada a área da armadura de continuidade mais a área das duas barras mais próximas ao pilar, totalizando 490 mm². Essa consideração foi feita devido a deformação apresentada pelas barras durante o ensaio, quanto mais distantes da ligação, menos eram solicitadas.

Na interface entre a viga e o tubo metálico foi inserida uma interface, assim como entre a viga e a laje. O núcleo de concreto foi considerado com aderência perfeita às paredes do tubo. Por ter sido utilizado o estado plano de tensões, as espessuras atribuídas aos elementos foram as mesmas do modelo físico.

A malha de elementos finitos gerada apresentou 903 nós e 775 elementos. As condições de contorno adotadas foram às restrições aos deslocamentos em x e y na base do pilar e em x no topo do pilar, garantindo as mesmas condições do ensaio em laboratório. A representação das condições de contorno e da malha é apresentada na Figura 9.b.



(a) Geometria do modelo

(b) Condições de contorno

Figura 9 – Geometria e condições de contorno do modelo bidimensional.

- **Elementos finitos**

Na construção do modelo numérico bidimensional foram utilizados na construção da malha dois tipos de elementos finitos: elementos de estado plano de tensão e elementos de interface. 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.

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 e função de interpolação linear (Figura 10.a).

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 10.b.

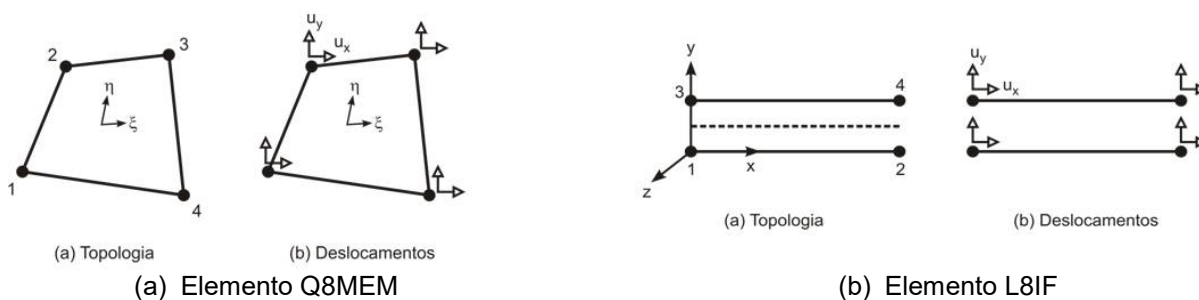


Figura 10 – Elementos finitos utilizados na discretização do modelo numérico bidimensional (TNO, 2005).

- **Resultados**

Do mesmo modo que no ensaio foram aplicados 75 kN de força máxima, na simulação numérica foi aplicada a mesma intensidade de força no sentido positivo e negativo. No sentido do momento fletor positivo o deslocamento obtido foi de 53,4 mm e no sentido oposto foi de 51,3 mm. A curva força *versus* deslocamento, mostrada na Figura 11.c, não apresentou perda de rigidez significativa com a aplicação dos ciclos de carregamento, mesmo para a força de 75 kN, fato que pode ser decorrente do comportamento do pilar, como representado na Figura 11.a e Figura 11.b.

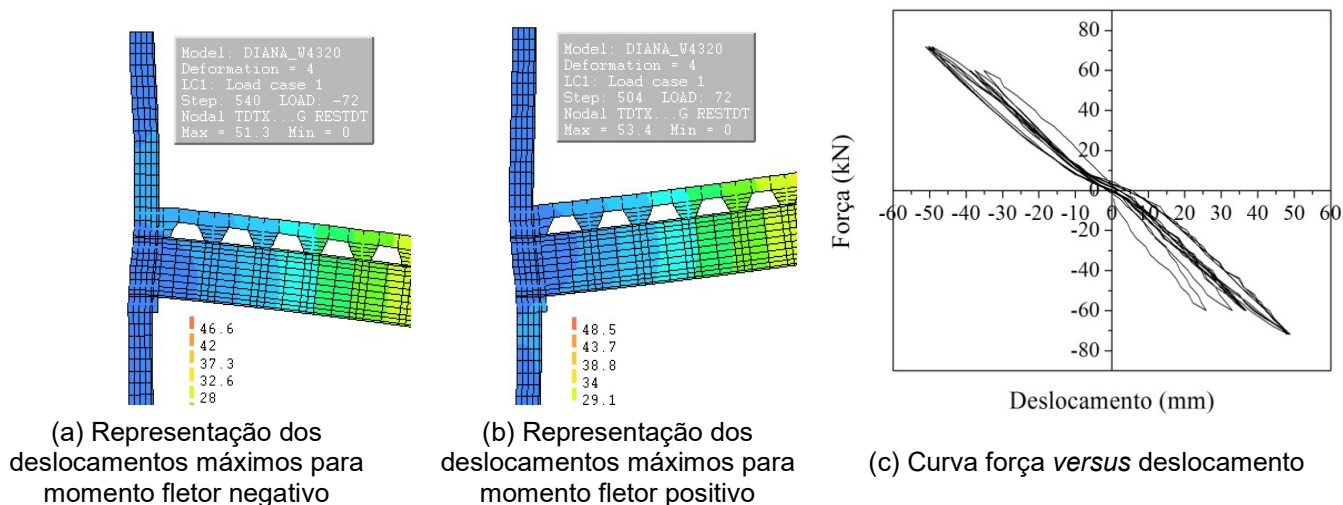


Figura 11 – Representação dos deslocamentos verticais e curva força *versus* deslocamento do modelo bidimensional.

Outro ponto importante para a análise do comportamento da ligação é a distribuição das tensões. A Figura 12 ilustra a distribuição das tensões principais ao longo da estrutura para o último ciclo de força nos sentidos positivo e negativo de momento fletor. Como as tensões principais não levam em consideração a influência da tensão de cisalhamento, os valores de tensão obtidos são superiores a tensão de escoamento do material, ficando entre 396 MPa e 400 MPa, mas são importantes para a identificação dos locais mais tracionados e comprimidos da estrutura. De acordo com os resultados, as mesas superior e inferior atingiram o escoamento.

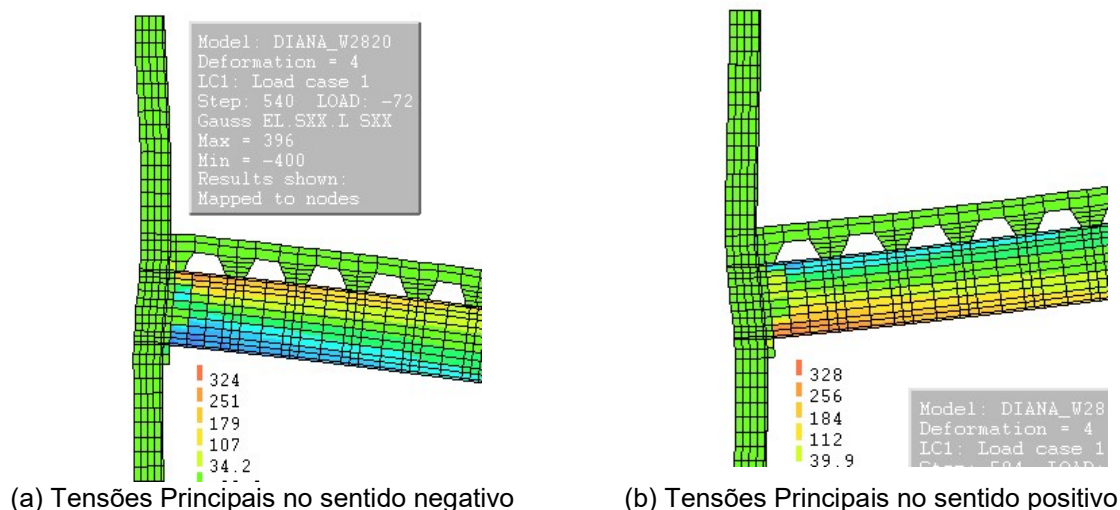


Figura 12 – Representação das tensões no modelo bidimensional.

Na Figura 13 estão representadas as tensões na armadura e nos parafusos. As tensões apresentadas mostram que a armadura da laje atingiu 395 MPa no sentido de momento fletor negativo, não alcançando o escoamento, pois a tensão de escoamento desse material é de 525,81 MPa. Considerando também o momento fletor negativo, o parafuso mais solicitado atingiu 345 MPa, chegando próximo a sua resistência ao escoamento que é de 350 MPa. O mesmo ocorreu no sentido oposto, para momento fletor positivo, no qual o parafuso mais solicitado foi submetido a tensões de 348 MPa.

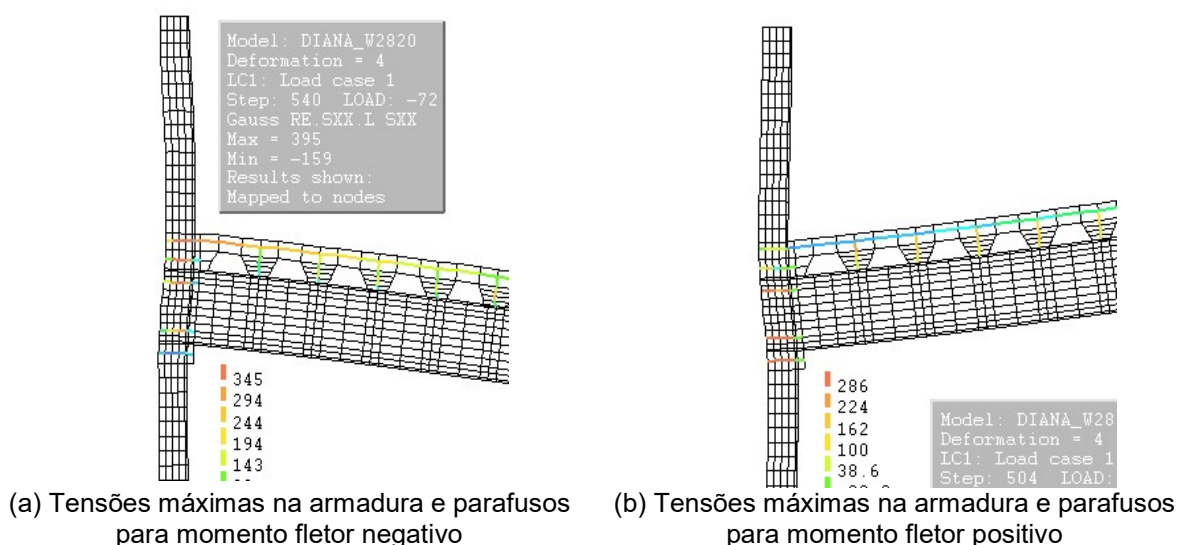


Figura 13 – Representação das tensões nas armaduras e parafusos do modelo bidimensional.

3.3 Modelo tridimensional

- **Geometria, malha e condições de contorno**

Para a obtenção de resultados mais próximos do comportamento apresentado pela ligação ensaiada, optou-se pela utilização de um modelo numérico tridimensional sem simetria, ou seja, modelo completo. A criação do modelo teve início com o núcleo de concreto, depois o tubo metálico, vigas, chapas, parafusos, conectores de cisalhamento e laje com as armaduras, como ilustrado na Figura 14.

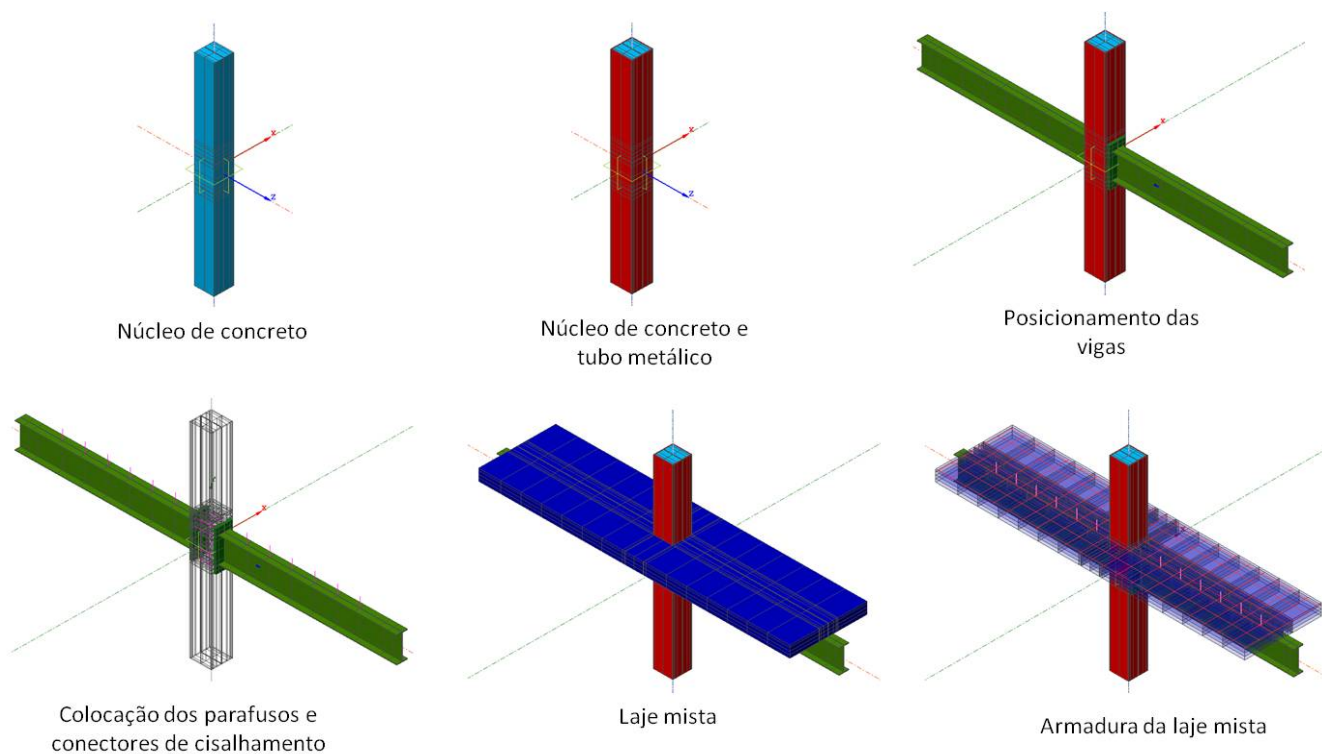


Figura 14 – Sequência da criação do modelo tridimensional.

Entre o tubo metálico e o núcleo de concreto foi introduzida uma interface, devido não haver aderência perfeita nesse local; entre a chapa de topo e o tubo foi feita a mesma coisa, mas com uma interface de resistência nula, apenas para simular o contato entre esses elementos, pois são os parafusos que resistem aos esforços nessa área. Outro local onde uma interface de resistência nula foi introduzida foi entre a laje e a viga, no qual os elementos resistentes são os conectores de cisalhamento.

Para a discretização da ligação optou-se por uma modelagem tridimensional mais refinada para obtenção de dados importantes sobre o comportamento, como a distribuição das tensões nos elementos metálicos e laje. A malha de elementos finitos gerada apresentou 15730 nós e 11312 elementos. Durante o processo de definição da malha foi imposto que os elementos finitos não apresentassem dimensões superiores a 50 mm. A malha de elementos finitos pode ser observada na Figura 15.a.

As condições de contorno adotadas para a simulação numérica foram as restrições ao deslocamento em x e y no topo do pilar. Na base foram restringidos os deslocamentos nas três direções, garantindo as mesmas condições do ensaio em laboratório. A aplicação dos esforços foi feita próximo à extremidade da viga, à 1580 mm da ligação, com a realização de controle de força. A representação das condições de contorno consta na Figura 15.b.

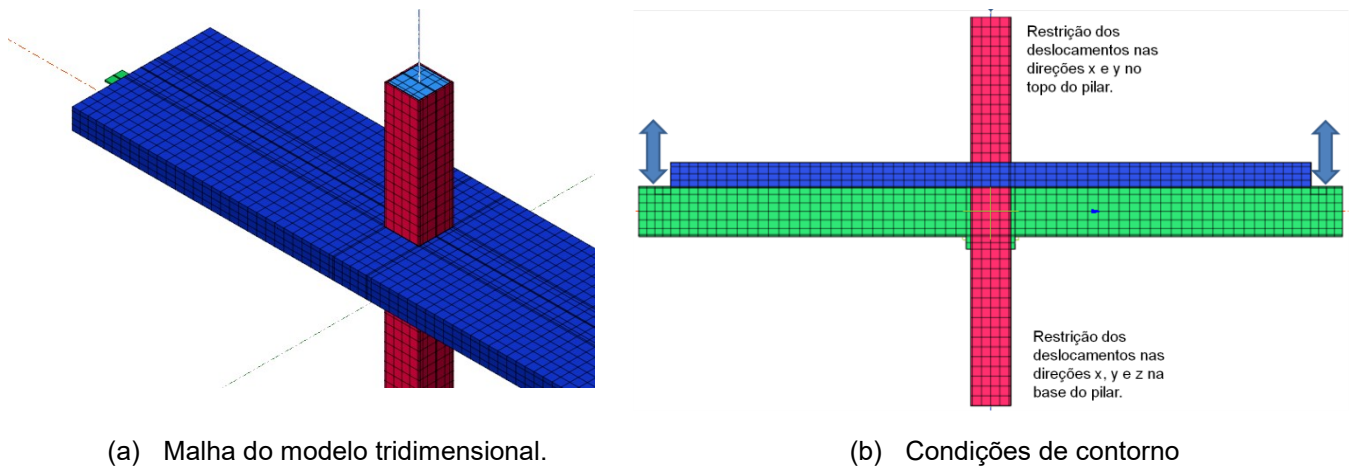


Figura 16 – Representação da malha e as condições de contorno adotadas no modelo tridimensional.

• **Elementos finitos**

Na construção do modelo numérico tridimensional foram utilizados na construção da malha dois tipos de elementos finitos: elementos sólidos e elementos de interface. Os elementos sólidos 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.

O elemento utilizado para o concreto e o aço foi o elemento sólido isoparamétrico HX24L. Esse elemento possui oito nós, três graus de liberdade por nó, os quais representam os deslocamentos em x, y e z e função de interpolação linear (Figura 15.a).

Nas ligações entre o pilar e a viga, e entre a viga e a laje, foi utilizado o elemento de interface Q24IF, que possui 4 + 4 nós com três graus de liberdade referentes aos deslocamentos em x, y e z. Esse elemento é representado por dois planos, como mostra a Figura 15.b.

5.3 HX24L – br

12.2.14 Q24IF – plane qua

(a) Elemento finito HX24L

(b) Elemento finito de interface Q24IF

Figura 15 – Elementos finitos utilizados na discretização do modelo tridimensional (TNO, 2005).

• **Resultados**

De acordo com os resultados obtidos com a simulação numérica do modelo tridimensional, para uma força equivalente a 75 kN e -75 kN, o deslocamento vertical correspondente no sentido do momento fletor positivo foi de aproximadamente 49,96 mm e para momento fletor negativo 39,06 mm. Os valores de deslocamento evidenciam que a rigidez maior da ligação ocorre quando a laje colabora na resistência aos esforços. Na Figura 17 pode ser observada a curva força *versus* deslocamento.

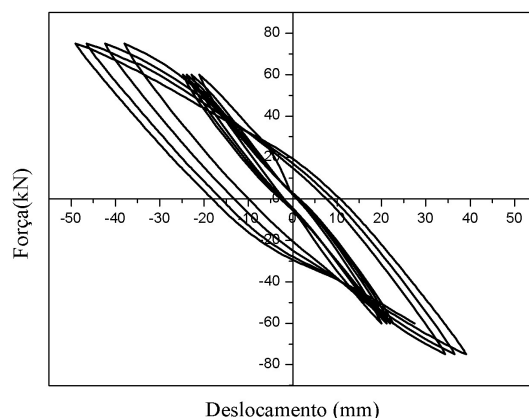


Figura 17 – Curva força versus deslocamento resultante da simulação do modelo tridimensional.

Os perfis metálicos também apresentaram tensões elevadas, principalmente na parede lateral do tubo metálico que, de acordo com a simulação, ultrapassou a tensão de escoamento ao atingir 478 MPa. Com relação às vigas, as maiores solicitações se concentraram nas mesas inferiores, onde a tensão atingiu 361 MPa, superior à tensão de escoamento do material. A Figura 18 apresenta a distribuição de tensões em todo o modelo para o último ciclo de carregamento.

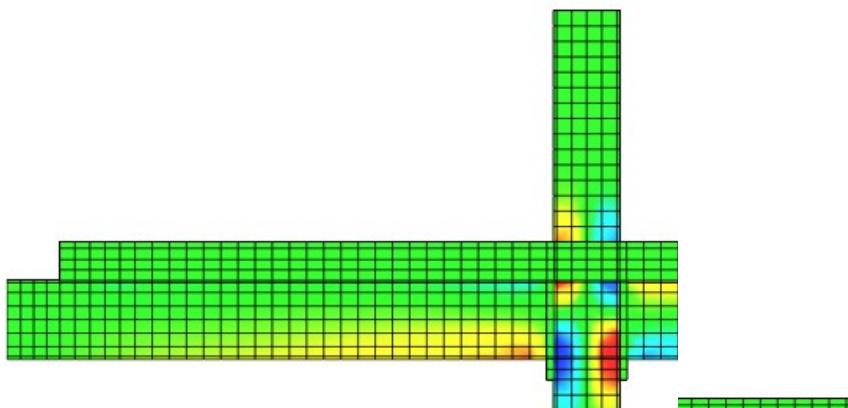


Figura 18 – Representação das tensões nos perfis metálicos e laje do modelo tridimensional.

Analisando os resultados das tensões nas armaduras observa-se que as barras mais solicitadas foram as que transpassavam o pilar, ou seja, a armadura de continuidade. Essas barras atingiram sua tensão de escoamento (525 MPa) na região mais próxima ao pilar. Para comparação com os resultados experimentais a tensão considerada será a de 459 MPa, pois foi nessa região da armadura que as deformações foram medidas no modelo físico. Quanto aos parafusos, apenas os localizados na parte inferior foram mais solicitados, atingindo 328 MPa. A Figura 19 ilustra a distribuição das tensões na armadura e parafusos.

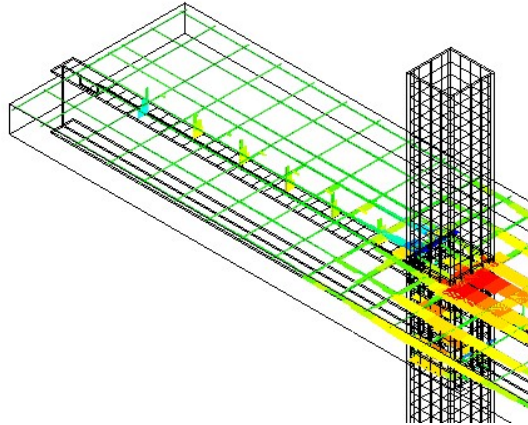


Figura 19 – Representação das tensões nas armaduras e parafusos do modelo tridimensional.

4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Na análise dos resultados são comparadas as curvas força *versus* deslocamento, para comparação das rigidezes, das tensões nos perfis e também nas armaduras e parafusos para identificação do modo de ruptura da ligação.

- **Curvas força *versus* deslocamento**

A comparação entre as curvas força *versus* deslocamento experimental e numéricas mostrou uma boa correlação entre a curva experimental e do modelo bidimensional. Já a curva do modelo tridimensional apresentou rigidez superior às outras duas curvas, fato que pode ser atribuído a simplificação adotada na discretização da laje, que no caso foi modelada como sendo do tipo maciça de concreto, e o modelo físico foi construído com laje mista.

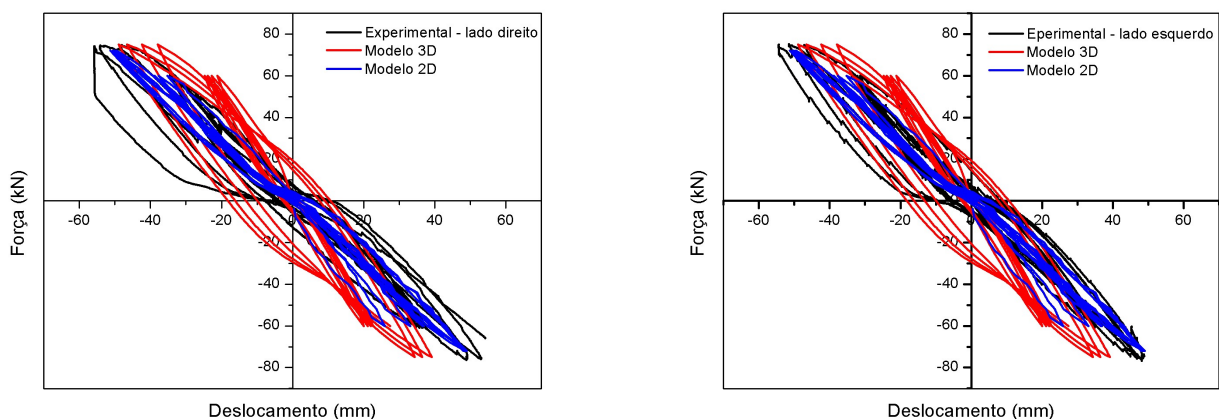


Figura 20 – Comparação entre as curvas força *versus* deslocamento.

- **Tensões nos perfis metálicos**

A verificação da tensão nos perfis metálicos foi realizada para identificar falhas nas vigas. De acordo com o ensaio, a uma distância de 125 mm da face do pilar, a tensão máxima na mesa tracionada da viga foi de 347 MPa, determinado com base na deformação medida. Nesse mesmo

local, o resultado da simulação do modelo bidimensional indicou tensão da ordem de 400 MPa e do modelo tridimensional a tensão foi de 361 MPa.

Considerando os resultados experimentais como referência, a tensão fornecida pelo modelo bidimensional foi 15% maior, enquanto o modelo tridimensional apresentou uma tensão apenas 4% superior. A melhor correlação dos resultados do modelo tridimensional com o experimental pode ser atribuída a representação total do modelo, sem a utilização da simetria, pois as deformações do pilar decorridos dos momentos aplicados de ambos os lados afetam o comportamento da ligação.

- **Tensões nas armaduras da laje**

Da mesma forma que as tensões nos perfis metálicos foram determinadas a partir das deformações, as tensões nas barras de aço também foram definidas com base na leitura dos *strain gages*. Para a análise, para o modelo experimental foi considerado o comportamento das barras da armadura de continuidade, sendo que para cada lado do pilar, foi realizada a média das deformações das duas barras correspondentes, medidas a uma distância de 125 mm da face do pilar.

A tensão média das barras do modelo experimental foi de 430 MPa. Tendo como referência os dados experimentais, na mesma região de medição, a armadura do modelo bidimensional apresentou tensão igual a 345 MPa, por volta de 20% inferior, e no modelo tridimensional a tensão foi da ordem de 393 MPa, 9% menor. Vale salientar que de acordo com o modelo tridimensional, na região mais próxima ao pilar houve o escoamento da armadura de continuidade, fato que não foi constatado no modelo bidimensional, no qual a tensão máxima foi de 395 MPa. Nesse caso é válido repensar se a área de aço adotada no modelo bidimensional seria mesmo a área referente às quatro barras mais próximas ao pilar, ou apenas da armadura de continuidade, ou até mesmo um valor intermediário que represente a pequena contribuição das barras laterais.

Os valores das tensões analisados anteriormente são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados das tensões nos modelos de ligação

Modelo	Tensão dos perfis (MPa)	Relação	
		$\sigma_{\text{experimental}} / \sigma_{\text{numérico}}$	$\sigma_{\text{experimental}} / \sigma_{\text{numérico}}$
Experimental	347	-	-
Bidimensional	400	115	80
Tridimensional	361	104	91

5 CONCLUSÕES

Como principal conclusão deste trabalho tem-se o bom resultado na representação do comportamento da ligação por meio de modelos numéricos. A utilização de elementos como REINFORCE e INTERFACE na simplificação da estrutura não acarretam prejuízos aos resultados da simulação, mas a utilização de laje maciça no modelo tridimensional pode ter levado a diferenças no comportamento da curva força versus deslocamento, que se mostrou mais rígida que o experimental.

De acordo com a comparação dos resultados experimentais e numéricos, o modelo bidimensional forneceu bons resultados relacionado ao comportamento força *versus* deslocamento, mas as tensões ficaram mais distantes dos valores observados no modelo experimental do que as tensões apresentadas pelo modelo tridimensional. Logo, no momento da escolha de qual tipo de modelo adotar na análise numérica, primeiro é preciso determinar quais parâmetros se deseja obter, pois análises mais aprofundadas pedem modelos mais refinados.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP e a Fapesp e CNPq pelo suporte financeiro concedido à pesquisa.

7 REFERÊNCIAS

BUTTERWORTH, J. Finite element analysis of structural steelwork beam to column bolted connections. **Constructional Research Unit. School of Science & Technology**, University of Teesside, UK. 2004.

CHOI, S. M.; HONG, S. D.; KIM, Y. S. Modeling analytical moment-rotation curves of semi-rigid connections for CFT square columns and steel beams. **Advances in Structural Engineering**, 2006. Vol. 9, No. 5.

CONCEIÇÃO, J. L. **Ligação mista viga-pilar resistente a momento**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 2011. 155p.

HU, J. W.; LEON, R. T. Analyses and evaluations for composite-moment frames with SMA PR-CFT connections. **Springer Science**. 2010. v.65, p. 433 – 455.

KATAOKA, M. N. (2011). **Estudo do comportamento de ligações viga-pilar preenchido submetidas a ações cíclicas**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2011. 192p.

MISTAKIDIS, E. S.; BANIOPOULOS, C. C.; BISBOS, C. D.; PANAGIOTOPOULOS, P. D. Steel T-Stub connections under static loading: an effective 2D numerical model. **Journal of Constructional Steel Research**, 1997, v.44, p.51 – 67.

SORIANO, H. L. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2003

TNO BUILDING AND CONSTRUCTION RESEARCH, **Diana User's Manual – Release 9**, Delft, Netherlands, 2005, 622 p.