



ANÁLISE NUMÉRICA DA FLAMBAGEM LATERAL COM DISTORÇÃO EM VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO

Janaina Pena Soares de Oliveira

João Victor Fragoso Dias

Ricardo Hallal Fakury

janainapenas@gmail.com

joaovfdias@gmail.com

fakury@dees.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Av. Presidente Antônio Carlos – 6627, 31270-901, Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani

afcalenzani@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Av. Fernando Ferrari – 514, 29075-910, Espírito Santo, Vitória, Brasil

Resumo. Nas regiões próximas aos apoios internos, as vigas mistas contínuas estão sujeitas a momento negativo e, conseqüentemente, a mesa inferior e parte da alma do perfil de aço ficam comprimidas. Se a alma do perfil não tiver rigidez suficiente para evitar a flexão lateral, ela fletirá permitindo que a mesa comprimida sofra um deslocamento lateral e uma torção, caracterizando a flambagem lateral com distorção (FLD). As normas de dimensionamento recomendam a análise da FLD por meio do mecanismo “U” invertido, que consiste de duas ou mais vigas de aço paralelas e a laje sobreposta. Alguns autores ensaiaram protótipos em escala real que simulam o mecanismo “U” invertido. Com o intuito de avaliar numericamente os estudos experimentais desses autores, um modelo numérico foi desenvolvido no software Ansys 17 (2016), considerando as imperfeições iniciais, geométrica e de material, e uma análise não linear geométrica e física foi implementada. O modelo numérico apresentou comportamento semelhante ao do protótipo ensaiado com valor aproximadamente igual para o momento fletor de colapso por FLD. O máximo deslocamento lateral obtido se localiza a uma distância, em relação ao apoio, próxima de duas a três vezes a altura do perfil de aço.

Keywords: Flambagem lateral com distorção, Viga mista de aço e concreto, Análise não linear geométrica e física.

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC,
Brazil, November 5-8, 2017.

INTRODUÇÃO

As vigas mistas de aço e concreto podem ser biapoiadas, semicontínuas e contínuas. Nas biapoiadas as ligações nos apoios são consideradas como rótulas, estando solicitadas principalmente a esforços de cisalhamento e momento fletor positivo. As vigas semicontínuas apresentam ligação de resistência parcial nos apoios internos e as contínuas são aquelas em que o perfil de aço e a armadura da laje têm continuidade total nos apoios, ficando solicitadas a momento negativo nessa região.

Nessas regiões de momento fletor negativo, as vigas mistas contínuas e semicontínuas ficam com a mesa inferior e parte da alma do perfil de aço submetidas a tensões de compressão que podem ocasionar a flambagem da mesa inferior em relação ao seu eixo de maior inércia (eixo situado no plano de flexão), já que a alma impede a flambagem em relação ao seu eixo de menor inércia. O deslocamento lateral da mesa, δ , que necessariamente é acompanhado de uma torção, θ , ocorre se a alma fletir lateralmente (distorcer), caracterizando um estado limite último denominado flambagem lateral com distorção (FLD). Facilitam a manifestação desse fenômeno a flexão da laje e a deformação da conexão da laje com a face superior do perfil de aço (conexão de cisalhamento), que possibilitam a torção da seção de aço praticamente como corpo rígido. A Figura 1 mostra esse fenômeno.

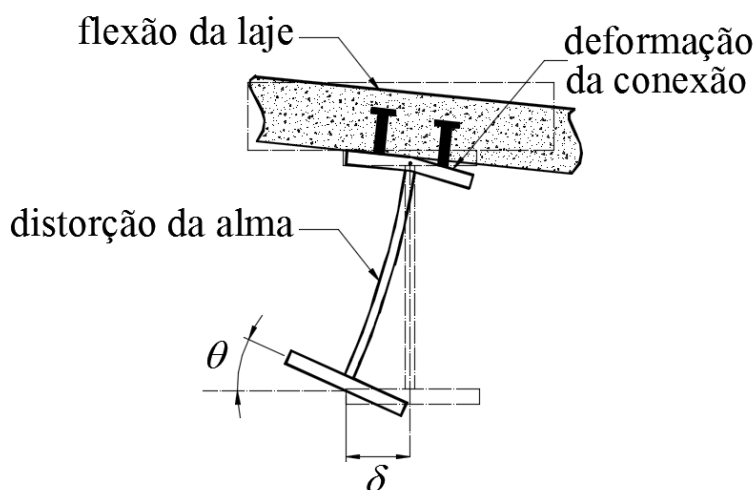


Figura 1. Flambagem lateral com distorção

De acordo com Johnson (2004), o deslocamento lateral (δ) e a torção da mesa comprimida do perfil de aço (θ) na FLD consistem de uma semi-onda em cada lado do apoio interno, com o ponto de máximo deslocamento lateral situado entre duas a três vezes a altura do perfil de aço (d) em relação ao apoio interno (Fig. 2). É importante ressaltar que nos projetos de vigas mistas contínuas e semicontínuas de aço e concreto devem ser previstos, obrigatoriamente, elementos que impeçam o deslocamento lateral da seção transversal nos apoios internos.

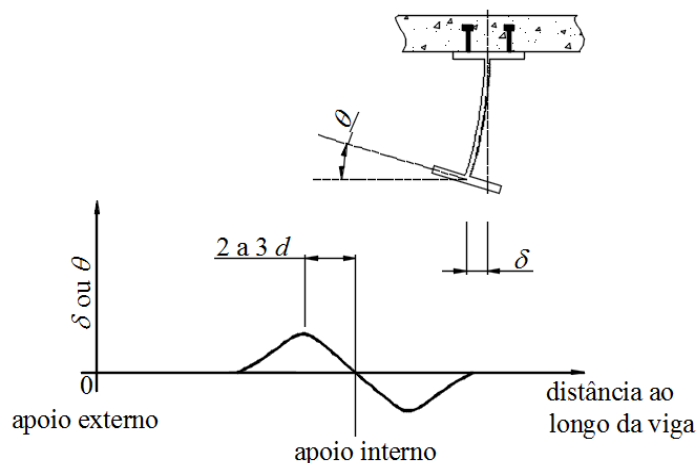


Figura 2. Deformação típica da mesa inferior na FLD. Fonte: Johnson (2004)

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 fornece um procedimento aproximado para a verificação da FLD, similar ao da norma europeia EN 1994-1-1:2004, que consiste na determinação do momento crítico elástico (M_{cr}) como passo inicial para obtenção do momento fletor resistente, com o M_{cr} obtido por meio do mecanismo “U” invertido. Nesse método é considerado que a laje de concreto esteja apoiada por duas ou mais vigas de aço paralelas, conforme ilustrado na Fig. 3.

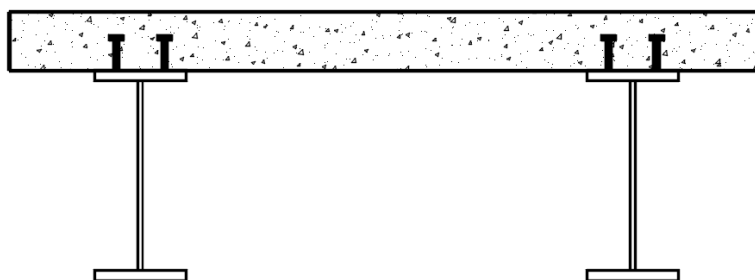
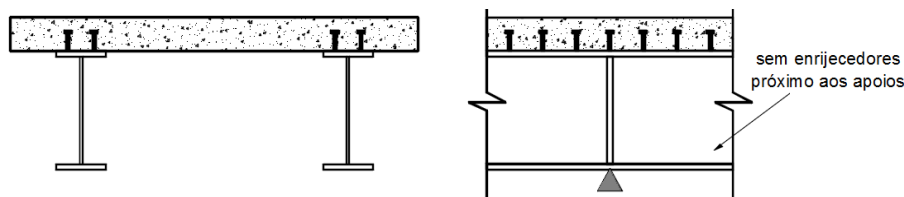


Figura 3. Mecanismo “U” invertido

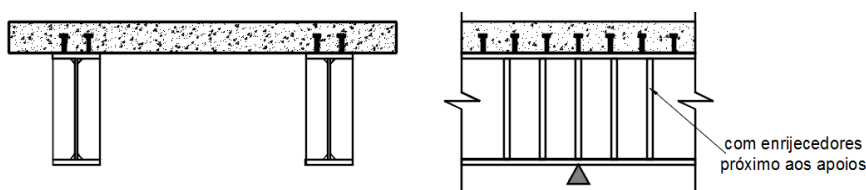
Conforme destacado por Fan (1990), ao comparar o modelo de uma viga mista em “T”, composto por um único perfil de aço sobreposto por uma laje de concreto, com o mecanismo “U” invertido, observa-se que o mecanismo “U” é mais adequado para representar o comportamento de uma viga mista à FLD, retratando de forma bastante realista as restrições ao deslocamento lateral e à torção impostas à mesa inferior do perfil de aço pela sua alma, pela laje de concreto e pela conexão de cisalhamento. Adicionalmente, a consideração do mecanismo “U” tem relação direta com a prática da construção, uma vez que, em boa parte das construções, utilizam-se sistemas de pisos compostos por vigas de aço paralelas igualmente espaçadas para apoiar a laje de concreto.

Na literatura constam dois tipos de mecanismo “U” invertido, o contínuo e o discreto. No mecanismo “U” contínuo (Fig. 4-a), a viga mista de aço e concreto possui enrijecedores verticais e contraventamentos laterais somente nos apoios internos. Neste tipo de mecanismo, a restrição contínua é fornecida à mesa comprimida apenas por meio da laje de concreto e da

alma dos perfis de aço não enrijecidos. No mecanismo “U” discreto (Fig.4-b) há enrijecedores transversais soldados à alma do perfil de aço em toda a região de momento negativo, sendo função desses enrijecedores contribuir na restrição à FLD.



a) Mecanismo “U” contínuo



b) Mecanismo “U” discreto

Figura 4. Tipos de mecanismo “U” invertido. Fonte: Calenzani (2008)

1 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Por volta de 1990, apenas as normas BS 5400:1982 e ENV 1994-1-1:1991 apresentavam métodos para avaliação da FLD de vigas mistas contínuas de aço e concreto adotando o mecanismo “U” invertido. Nesses métodos, não era previsto o uso de enrijecedores ao longo da região de momento negativo. Com o intuito de propor um método de cálculo que contemple o mecanismo “U” discreto, Chen (1992) ensaiou dois protótipos em escala real, sendo um em viga mista com mecanismo “U” contínuo, U4, e outro com mecanismo “U” discreto, U5.

O protótipo U4 (Fig. 5) foi composto por duas vigas soldadas (U4A e U4B), com enrijecedores duplos soldados à alma na região de apoio. Para impedir o movimento lateral e vertical entre as vigas, sem restringir a rotação em relação ao eixo vertical, foram acrescentados contraventamentos internos na região do apoio.

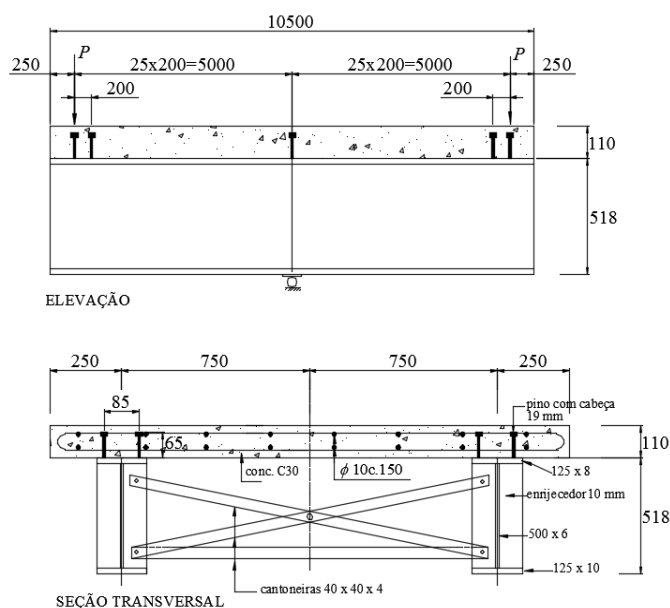


Figura 5. Elevação e seção transversal do protótipo U4. Fonte: Chen (1992)

O protótipo U5 também foi composto por duas vigas soldadas (U5A e U5B), com as seções transversais idênticas aos de U4A e U4B. A diferença entre eles está na consideração dos enrijecedores na região do momento negativo. Em uma metade do comprimento da viga U5 foram adotados enrijecedores duplos, espaçados a cada 1200 mm. Na outra metade, os enrijecedores foram projetados somente de um lado do perfil, espaçados a cada 600 mm.

Com os resultados experimentais, Chen (1992) observou que as deformações laterais medidas no protótipo U4 mostraram os modos óbvios de FLD, que são aproximadamente simétricos em relação à seção central. Além disso, Chen (1992) constatou que as rotações na mesa superior do perfil de aço e na laje de concreto são muito menores do que as rotações na mesa inferior do perfil. O momento fletor que teve início à FLD no protótipo U4 foi bem inferior ao momento de escoamento das duas vigas, ficando em torno de 317 kNm.

No protótipo U5 (mecanismo “U” discreto), Chen (1992) inicialmente observou a ocorrência de flambagem local da alma do perfil de aço próximo ao apoio interno, não sendo constatada a FLD na viga U5A. No perfil de aço da viga U5B foi observada a FLD, sendo que a FLD foi acompanhada por uma severa deformação fora do plano do painel de alma enrijecido perto do apoio.

Em resumo, dois modos de flambagem lateral da mesa inferior do perfil de aço foram encontrados nos ensaios de Chen (1992), conforme ilustrado na Fig. 6. As deformações laterais das vigas no protótipo U4 apresentaram a forma senoidal aproximada, simétrica em relação à seção central, típica de FLD, sobre todo o comprimento da região de momento negativo (Fig. 6-a). No ensaio do protótipo U5, ocorreram deformações laterais concentradas próximas à região do apoio (Fig. 6-b). Pelos resultados obtidos dos ensaios dos protótipos U4 e U5, Chen (1992) constatou que os enrijecedores na alma do perfil de aço contribuem para a redução das distorções, particularmente nas regiões afastadas do apoio central, aumentando a resistência à FLD.

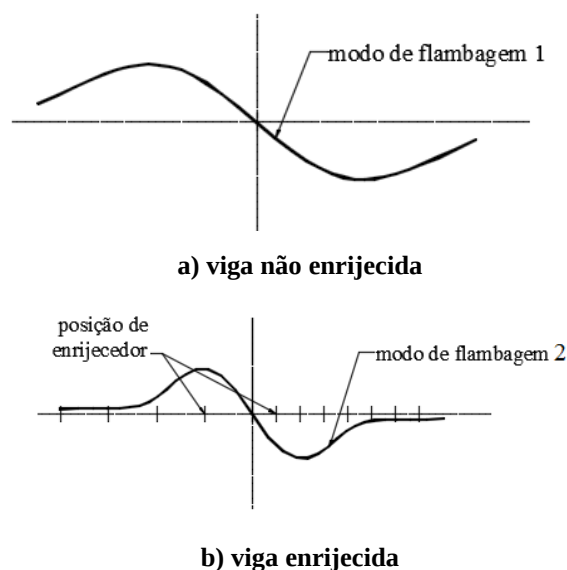


Figura 6. Modos de flambagem lateral com distorção dos ensaios. Fonte: Chen (1992)

Para simular numericamente o ensaio do protótipo U4 realizado por Chen (1992), no presente trabalho foi desenvolvido um modelo numérico no programa Ansys 17.0 (2016), considerando as imperfeições iniciais, geométrica e de material, e uma análise não linear geométrica e física foram implementadas. Os resultados numéricos foram confrontados com os resultados obtidos por Chen (1992), obtendo-se uma boa avaliação para os principais parâmetros que caracterizam a FLD.

2 DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Apesar dos ensaios experimentais retratarem de forma realística os diferentes aspectos do comportamento estrutural de vigas mistas submetidas a momento fletor negativo, eles são onerosos e de difícil execução, uma vez que é necessário trabalhar com modelos em escala real para a obtenção de resultados mais consistentes. O estudo numérico é uma excelente metodologia de pesquisa que possibilita a análise do comportamento dessas vigas nas regiões de momento fletor negativo, sem a necessidade de elevados investimentos.

O modelo numérico desenvolvido neste trabalho avalia a FLD de vigas mistas contínuas por meio de uma análise numérica não linear, via método dos elementos finitos, utilizando o programa Ansys 17.0 (2016).

2.1 Elementos utilizados

O modelo numérico visa retratar o mecanismo “U” invertido de uma viga mista de aço e concreto para a obtenção do momento fletor resistente nominal à FLD. Esse modelo é constituído por uma laje de concreto armado, conectores de cisalhamento e perfil de aço de seção transversal “I”. Como há simetria em relação ao plano médio paralelo à alma do perfil que passa pelo meio da laje, o modelo numérico é composto por apenas um dos perfis de aço e a metade da laje do mecanismo “U”. Ao adotar essa condição de simetria há uma redução

no número de nós e elementos no modelo numérico e, conseqüentemente, um ganho no desempenho computacional.

Os elementos utilizados no modelo numérico são: elementos de casca, *Shell181*, para o perfil de aço, elementos sólidos, *Solid65*, para a laje de concreto armado, e elementos de viga, *Beam188*, para os conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça. Para simular o contato entre a laje de concreto armado e a mesa superior do perfil de aço, utilizou-se os elementos *Conta173* e *Targe170*, Fig. 7. A armadura é assumida na forma dispersa, considerando sua taxa definida como a razão entre o volume da armadura e o volume total do concreto, em cada uma das direções dos eixos locais do elemento *Solid65*. Os elementos do perfil de aço apresentam um tamanho máximo igual a 30 mm e os elementos da laje possuem um tamanho máximo igual a 60 mm.

O par de elementos *Conta173* e *Targe170* foi empregado para representar o contato existente na interface entre a laje de concreto armado e a mesa superior do perfil de aço. Esses elementos são utilizados em análises tridimensionais com contato do tipo superfície-superfície, sendo capazes de simular a existência de pressão entre os elementos, quando há contato, e a separação entre os mesmos elementos, quando não há contato. O elemento *Conta173* é usado para representar o contato e o deslizamento entre uma superfície deformável, definida por esse elemento, e superfícies alvos tridimensionais, definidas pelo elemento *Targe170*. O *Conta173* pode ser definido por superfícies de elementos sólidos ou de cascas lineares, possuindo quatro nós. Haverá contato entre as superfícies definidas quando o elemento *Conta173* penetrar na superfície alvo, definida pelo elemento *Targe170*. Para modelar o par de elementos de contato, foram criadas duas áreas iguais a área da mesa superior do perfil, uma área no nível da mesa superior, onde foi adicionado o elemento *Conta173* e outra área no nível da superfície inferior da laje, onde foi adicionado o elemento *Targe170*.

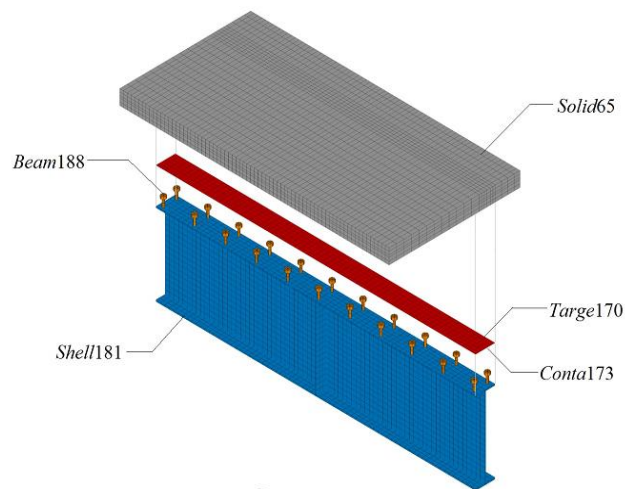


Figura 7. Tipos de elementos adotados no modelo numérico

2.2 Relações constitutivas dos materiais

O modelo numérico desenvolvido neste trabalho considera o comportamento não linear dos materiais. O comportamento uniaxial dos aços do perfil e da armadura é tomado como elastoplástico bilinear, onde a primeira reta é elástica linear até a resistência ao escoamento, f_y ,

com módulo tangente igual ao módulo de elasticidade do aço, E_a . A segunda reta possui módulo tangente igual a 1/10000 do módulo de elasticidade do aço, para evitar problemas de convergência numérica.

As propriedades mecânicas adotadas para o aço do perfil são aquelas descritas em Chen (1992), isto é, módulo de elasticidade (E_a) igual a 205 GPa e resistência ao escoamento (f_y) igual a 386,5 MPa. Para a modelagem do comportamento mecânico do aço da armadura passiva, considera-se o módulo de elasticidade, E_s , igual a 210 GPa, conforme ABNT NBR 8800:2008, e a resistência ao escoamento (f_{ys}) igual a 500 MPa, correspondente ao aço CA-50.

O comportamento uniaxial do concreto da laje foi descrito pela curva tensão *versus* deformação mostrada na Fig. 8. Essa curva é fornecida pela ABNT NBR 6118:2014 e nela uma relação linear elástica do concreto é assumida até a metade da resistência à compressão do concreto ($0,5 f_{ck}$) e uma relação parabólica de $0,5 f_{ck}$ a f_{ck} , considerando que a resistência à compressão do concreto corresponda à uma deformação de compressão igual a 2 ‰. Entre a deformação correspondente a 2 ‰ e 3,5 ‰ a resistência do concreto é constante, com valor igual a f_{ck} . O módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto são adotados de acordo com o valor fornecido no trabalho de Chen (1992), sendo o módulo de elasticidade (E_c) igual a 32 GPa e a resistência à compressão (f_{ck}) igual a 38,6 MPa.

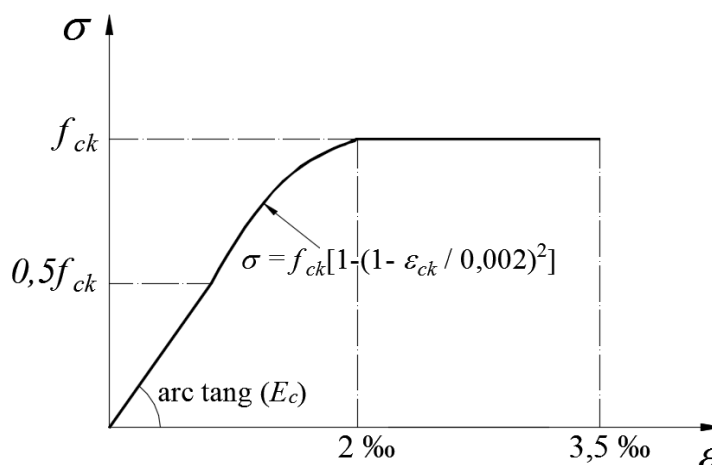


Figura 8. Curva tensão *versus* deformação do concreto

O critério de falha de Willam-Warnke, “*default*” do elemento *Solid65*, foi utilizado neste trabalho. Esse critério permite simular a fissuração e o esmagamento do concreto quando submetido a tensões normais maiores que a resistência à tração e a resistência à compressão, respectivamente. A resistência à tração do concreto foi tomada simplificada como 10% da resistência à compressão, por falta dessa informação em Chen (1992). Os coeficientes de transferência de cisalhamento para fissuras abertas e fechadas foram tomadas iguais, respectivamente, a 0,6 e 0,9, conforme sugerido em Contamine *et al* (2011). O intervalo para esses coeficientes é de 0 a 1,0, onde 0 representa uma fissura lisa (perda completa de transferência de cisalhamento) e 1 representa uma fissura rugosa (nenhuma perda de transferência de cisalhamento).

O elemento *Conta173* apresenta vários parâmetros que definem seu comportamento e podem ser modificados pelo usuário. A rigidez normal do contato é definida por meio das

constantes reais FKN e FTOLN do elemento. A constante FKN é um fator de rigidez normal do contato e possui um intervalo de 0,01 a 1, sendo 1 o valor preestabelecido pelo Ansys 17.0 (2016). Neste trabalho, adota-se o valor de 0,1 para FKN, pois o Ansys 17.0 (2016) recomenda este valor quando a deformação predominante é a de flexão. A constante FTOLN é o fator de tolerância que verifica a compatibilidade da penetração, sendo adotado o valor igual a 0,1 preestabelecido pelo Ansys 17.0 (2016). Um coeficiente de atrito nulo entre as superfícies foi definido para o par de elementos de contato.

2.3 Técnicas de soluções numéricas

No modelo numérico desenvolvido neste trabalho são realizadas análises não lineares com grandes deslocamentos. Foram consideradas as imperfeições iniciais geométrica, oriunda do processo de fabricação do perfil de aço, e de material, devido as tensões residuais do aço, além da consideração do comportamento não linear dos materiais, concreto armado e aço. Devido ao contato entre a laje e a mesa superior do perfil de aço, tem-se também a não linearidade de *status*.

As imperfeições iniciais geométricas da mesa inferior relativa à mesa superior do perfil de aço foram medidas por Chen (1992) antes do ensaio. Na Fig. 9, a linha azul mostra a imperfeição inicial geométrica da viga U4A obtida por Chen (1992) e digitalizada com auxílio do *software Web Plot Digitizer*, o que possibilitou a obtenção de uma curva de tendência e de suas equações, determinadas em função do comprimento da viga. A curva de tendência obtida está representada pela linha tracejada em vermelho da Fig. 9 e possui dois trechos de equações diferentes.

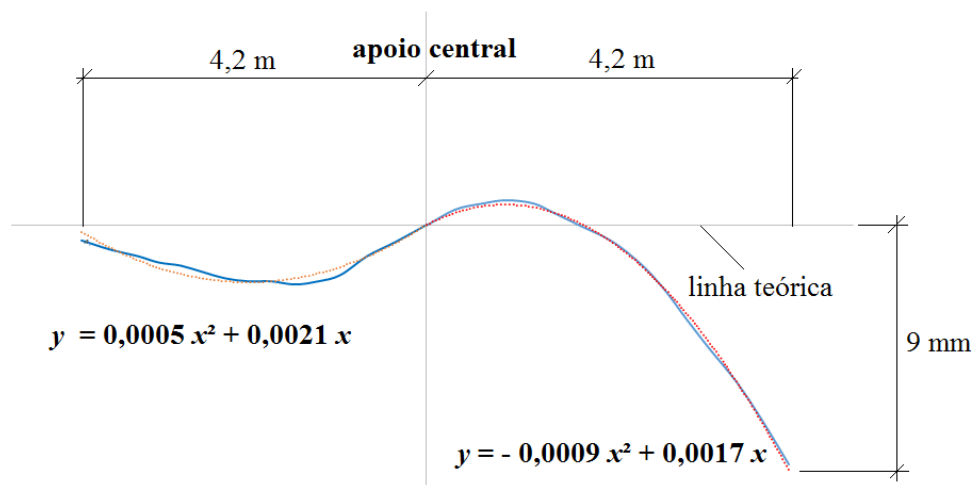


Figura 9. Imperfeição geométrica da mesa inferior do perfil de aço do protótipo U4A. Fonte: Chen (1992)

Com o intuito de se considerar na modelagem numérica a imperfeição inicial geométrica medida por Chen (1992), deslocamentos nodais na direção transversal ao modelo foram imposto à mesa inferior do perfil de aço, cujos valores foram determinados usando as equações da Fig. 9 em função da posição do nó ao longo do comprimento da viga, conforme ilustrado na Fig. 10.

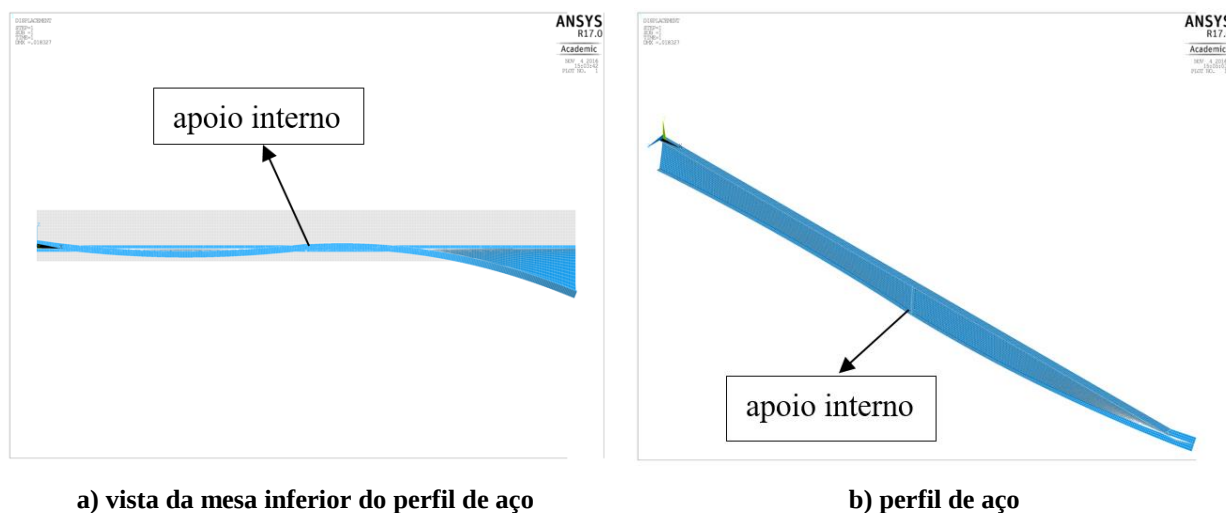


Figura 10. Imperfeição geométrica inicial implementada no modelo numérico

As tensões residuais dos perfis de aço utilizados nos ensaios de Chen (1992) não foram medidas. Como o perfil é soldado com borda laminada, no estudo numérico deste trabalho, a distribuição da tensão residual foi considerada linear nas mesas e na alma do perfil, conforme ilustrado na Fig. 11. O valor máximo da tensão foi de 30% da resistência ao escoamento do aço, conforme prescrito pela ABNT NBR 8800:2008.

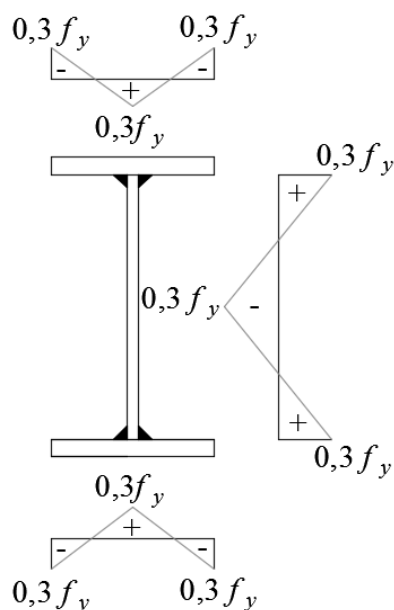


Figura 11. Distribuição da tensão residual no perfil de aço soldado com borda laminada adotado no modelo numérico. Fonte: ABNT NBR 8800:2008

Com auxílio do comando INISTATE, disponível no Ansys 17.0 (2016), aplicou-se a tensão residual nas mesas e na alma do perfil de aço, Fig. 12. Conforme descrito anteriormente, uma distribuição linear de tensões residuais na seção transversal foi utilizada de acordo com a Fig. 11.

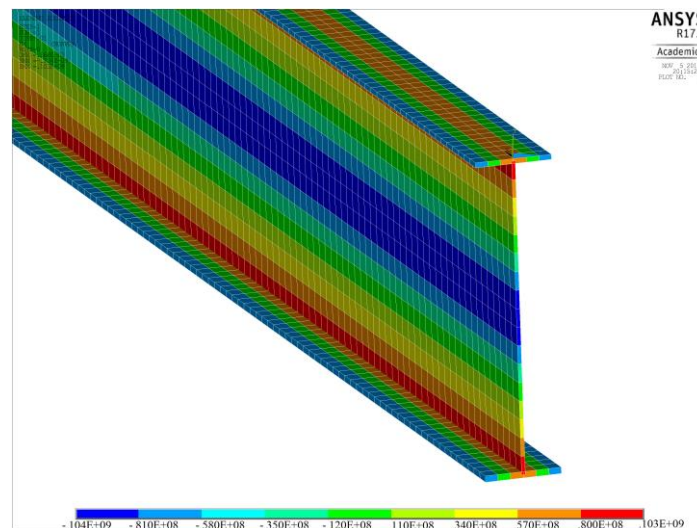


Figura 12. Tensão residual aplicada na mesa e na alma do perfil de aço

Após aplicar as imperfeições iniciais ao modelo numérico, a análise não linear considerando o procedimento incremental-iterativo de Newton Raphson total (*Full Newton-Raphson Procedure*) é realizada. Na análise numérica deste trabalho é estabelecida um valor de convergência para as forças e para os momentos, adotando-se como norma do vetor de forças e momentos desbalanceados a raiz quadrada da soma dos termos. Similarmente a Calenzani (2008), um valor igual a 0,1, ou seja, 10%, foi adotado como tolerância. O número máximo de iterações foi tomado igual a 400.

Neste modelo numérico desconsiderou-se a influência do peso próprio da estrutura. A não consideração do peso próprio neste modelo é justificável, uma vez que os resultados obtidos no ensaio de Chen (1992) foram medidos apenas a partir do instante em que iniciou a aplicação da carga nas extremidades do protótipo. Assim, o deslocamento inicial devido ao peso próprio da estrutura não foi medido por Chen (1992).

2.4 Condições de contorno

A Figura 13 ilustra o modelo numérico completo que representa o ensaio de Chen (1992). Os eixos globais de referência do Ansys 17.0 (2016), além do apoio interno e da região em que foi aplicado o carregamento P no modelo numérico, são destacados na Fig. 13.

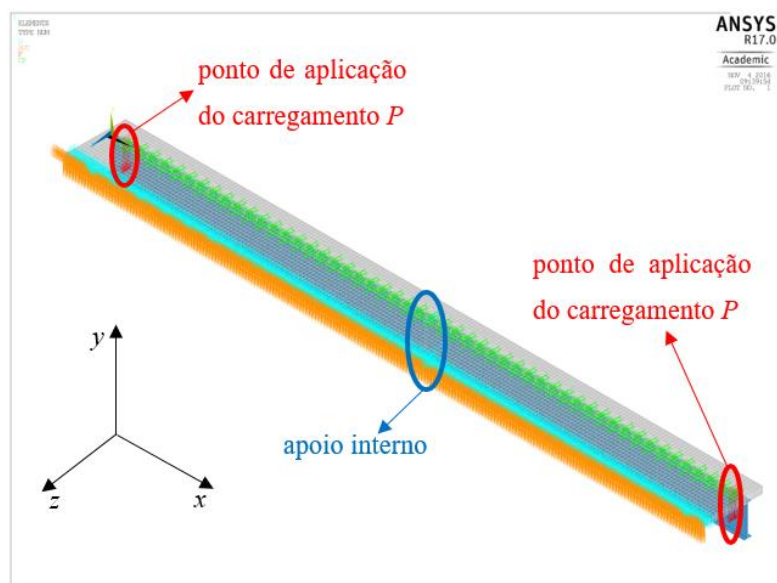


Figura 13. Modelo numérico para representar o protótipo U4A

Como o protótipo ensaiado por Chen (1992) é simétrico em relação ao plano médio paralelo à alma que passa pelo meio da laje, utilizou-se essa simetria para reduzir o número de elementos na modelagem numérica e, conseqüentemente, o tempo de processamento do modelo. Para isso, aplicou-se o comando de simetria DSYM disponível no Ansys 17.0 (2016) no plano de simetria da laje de concreto, impedindo a translação na direção global z , além das rotações em torno de x e y , conforme Fig. 14. O carregamento P foi aplicado em ambas as extremidades do modelo numérico, nos nós da face superior da laje de concreto. O valor da carga P aplicada em cada extremidade da viga mista corresponde a 100 kN, sendo esse valor aplicado no modelo com um incremento igual a 0,1 kN.

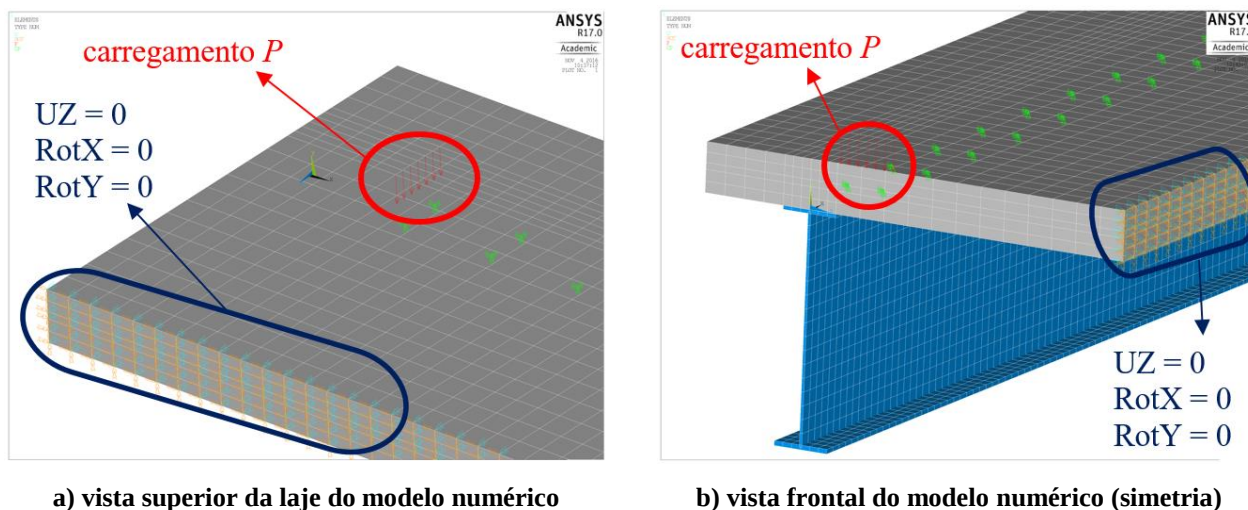


Figura 14. Travamento da laje no plano de simetria e posição do carregamento aplicado

Os nós da base de cada conector de cisalhamento foram acoplados aos nós correspondentes da mesa superior do perfil de aço, compatibilizando-se todos os graus de liberdade (rotações e translações), caracterizando o engastamento do conector, conforme

ilustrado na Fig. 15. Como os demais nós dos conectores coincidem com os nós da laje de concreto armado, não é necessário realizar o acoplamento desses nós.

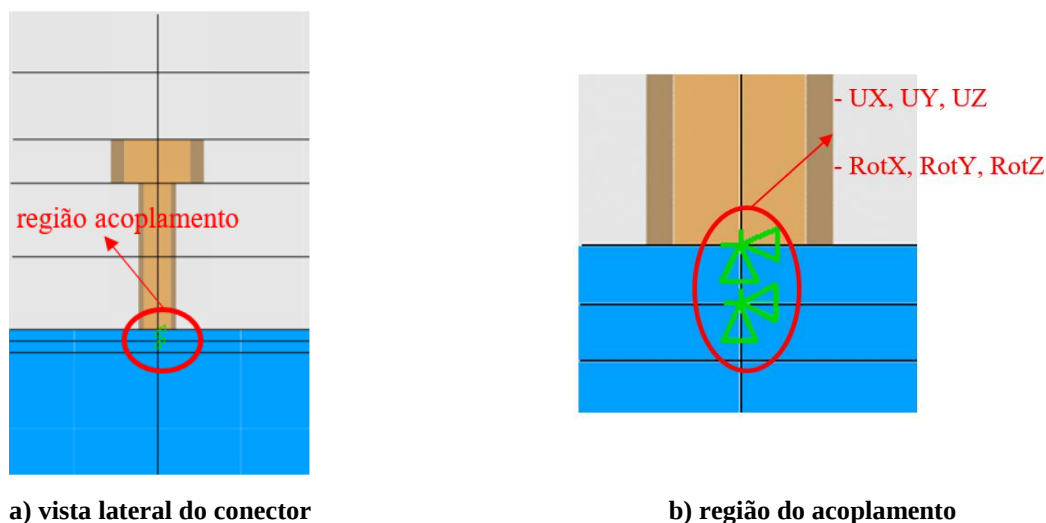


Figura 15. Acoplamento entre a mesa superior do perfil de aço e a base do conector

Com vistas a reproduzir um apoio de 2º gênero, alguns dos nós correspondentes ao apoio interno tiveram as translações nas direções x e y restringidas. Conforme ilustrado na Fig. 16, todos os nós da mesa inferior do perfil de aço, na região do apoio interno da viga mista, foram restringidos na direção vertical (Uy). O nó central da mesa inferior do perfil teve restrição na direção longitudinal (Ux). Para simular o travamento lateral devido à presença das cantoneiras na região do apoio interno, foi restringido o deslocamento transversal (Uz) dos nós da extremidade superior e inferior do perfil. Enrijecedores transversais, semelhantes aos das vigas do protótipo, foram modelados nas seções transversais do apoio (Fig. 16-b).

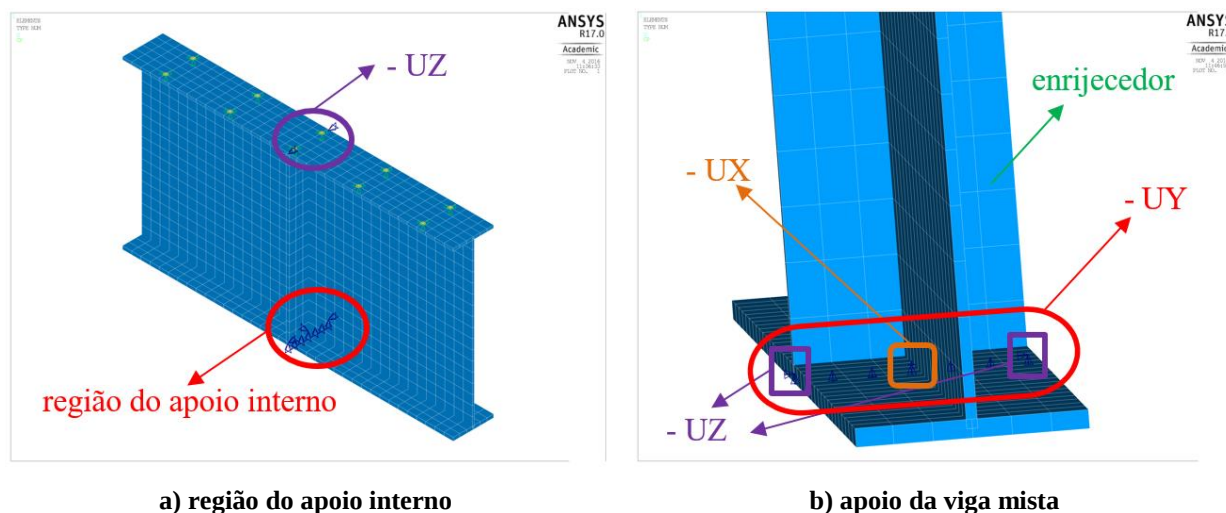
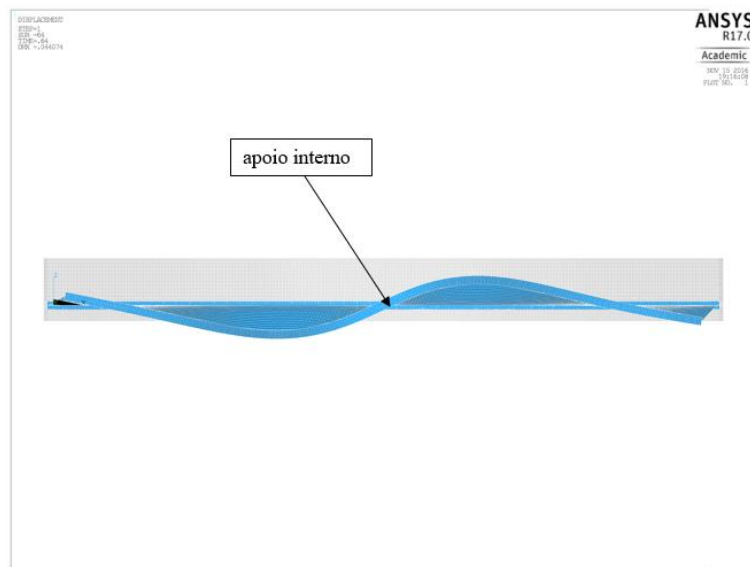


Figura 16. Condições de contorno do modelo numérico

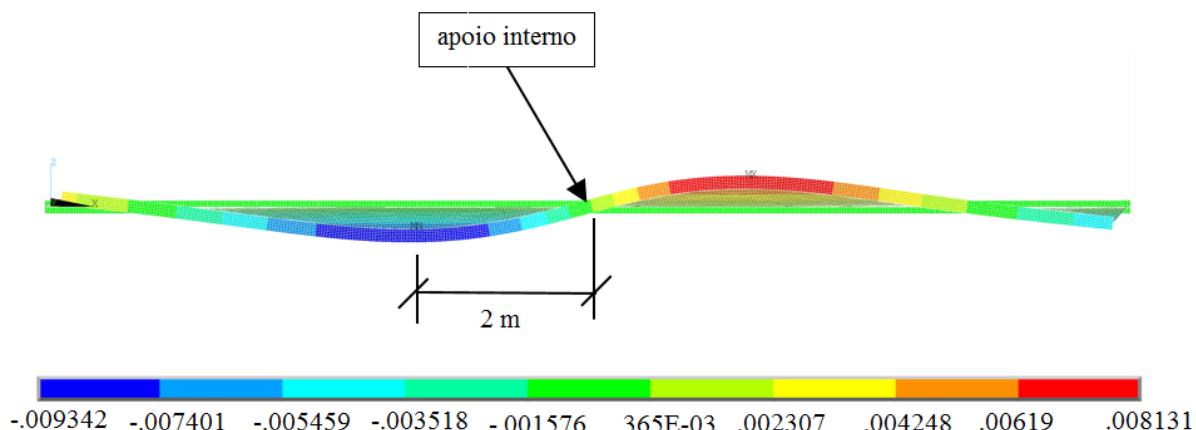
3 ANÁLISE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

Para aferição do modelo proposto, utilizou-se o ensaio experimental realizado por Chen (1992). O momento fletor último da simulação numérica foi igual a 320 kNm, enquanto que o resultado obtido no ensaio de Chen (1992) foi igual a, aproximadamente, 317,9 kNm, havendo uma diferença percentual de 0,66%. Como essa diferença percentual é pequena, pode-se considerar o modelo numérico como validado.

A Figura 17-a apresenta o deslocamento lateral no último subintervalo convergido, subintervalo 64, da mesa inferior do perfil de aço (vista por baixo do modelo numérico) que corresponde ao momento último de 320 kNm. Como pode ser observado, o modelo numérico apresenta o modo de falha caracterizado por FLD. Nota-se, também, que o deslocamento lateral máximo da mesa inferior do perfil de aço foi de 9,3 mm, distante de, aproximadamente 2 m do apoio interno (Fig. 17-b). O ponto de máximo deslocamento lateral não coincide, mas está próximo do que foi destacado por Jonhson (2004), o qual cita que o deslocamento máximo lateral se localiza a uma distância, em relação ao apoio, de duas a três vezes a altura do perfil de aço.



a) deslocamento lateral da mesa inferior do perfil de aço



b) valores obtidos do deslocamento lateral no modelo numérico

Figura 17. Deslocamento lateral da mesa inferior obtido no modelo numérico

Chen (1992) observou concentração de fissuras paralelas na laje do protótipo U4 com um espaçamento de, aproximadamente, 150 mm (espaçamento entre as armaduras da laje), indicando que a formação e a posição das fissuras estão relacionadas ao arranjo da armadura. Como no modelo numérico a armadura é considerada de maneira dispersa ao longo de um volume, não foi possível constatar essa observação feita por Chen (1992). Observa-se, entretanto, que no último subintervalo convergido (subintervalo 64), Fig. 18, praticamente toda a laje encontra-se fissurada. Essa figura é obtida com auxílio do comando PLCRACK, disponível para o elemento *Solid65* no Ansys 17.0 (2016). Os círculos representam a fissuração, enquanto os octaedros ilustram as posições de esmagamento. Cada ponto de integração pode fissurar em até três planos diferentes, sendo que a primeira fissura é representada por um círculo vermelho, a segunda por um círculo verde e a terceira por um círculo azul.



Figura 18. Fissuração da laje de concreto do modelo numérico na região próxima ao apoio interno

Os valores encontrados com a modelagem numérica desenvolvida neste trabalho foram comparados com os valores obtidos no ensaio realizado por Chen (1992). Na Figura 19 consta

o deslocamento vertical final na extremidade da viga *versus* o momento aplicado na viga mista. Como pode ser observado, o resultado obtido numericamente está muito próximo ao resultado medido por Chen (1992).

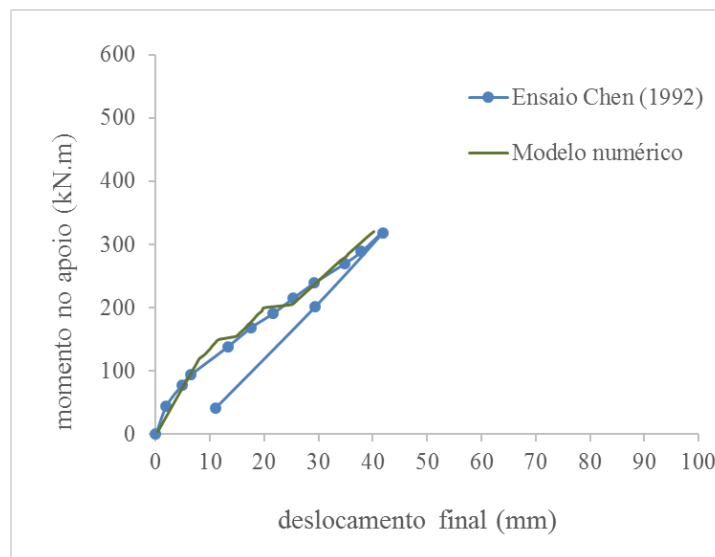
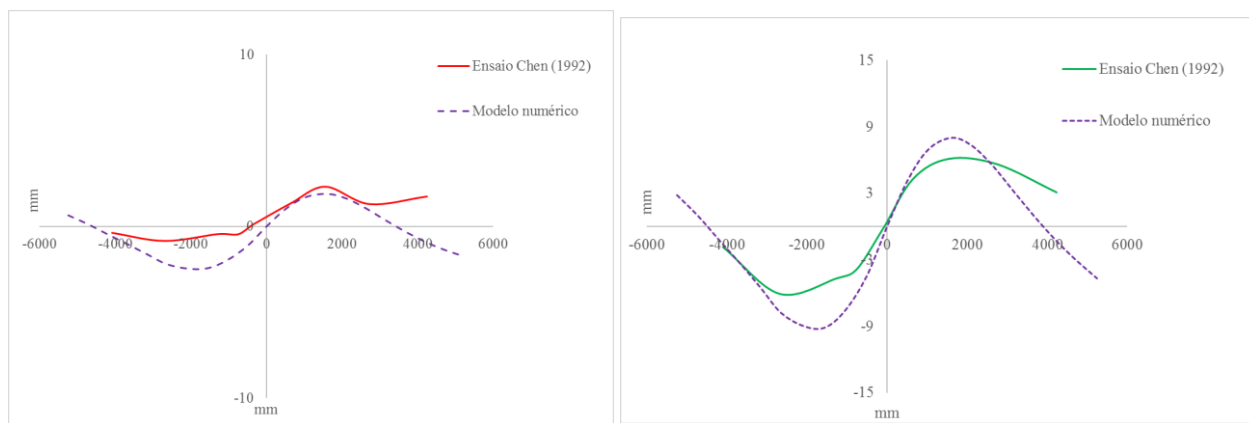


Figura 19. Deslocamento vertical da viga mista

Durante o ensaio realizado por Chen (1992), também foi medido o deslocamento lateral da mesa inferior do perfil de aço em duas etapas do carregamento. Na primeira etapa, o momento fletor na viga mista estava próximo a 220 kNm, enquanto na segunda etapa o momento fletor correspondia a, aproximadamente, 320 kNm. Conforme observado na Fig. 20, em ambas as etapas de carregamento, o resultado obtido numericamente está próximo do resultado do ensaio de Chen (1992). As deformações laterais medidas nesse protótipo mostraram os modos óbvios de FLD, que representam o formato em S, sendo aproximadamente simétricos em relação à seção central.



a) Etapa com momento fletor igual a 220 kNm

b) Etapa com momento fletor igual a 320 kNm

Figura 20. Deslocamento lateral da mesa inferior do perfil de aço

A rotação no plano horizontal da mesa inferior do perfil de aço foi medida durante o ensaio realizado por Chen (1992). Na Figura 21, observa-se que a rotação obtida no ensaio está próxima do resultado obtido no modelo numérico. Em seu ensaio, Chen (1992) constatou

que as rotações na mesa superior do perfil de aço e na laje de concreto são muito menores do que as rotações na mesa inferior do perfil.

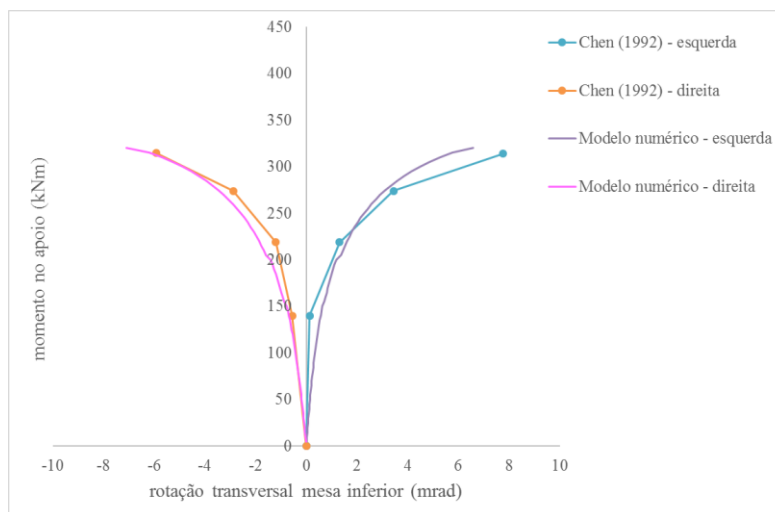


Figura 21. Rotação transversal da mesa inferior do perfil de aço

De acordo com os resultados apresentados, considera-se o modelo numérico desenvolvido neste trabalho apropriado para o estudo de FLD em vigas mistas contínuas de aço e concreto.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo numérico, com auxílio do *software* Ansys 17.0 (2016), para se obter o momento fletor resistente nominal à flambagem lateral com distorção de vigas mistas contínuas de aço e concreto. O modelo numérico em elementos finitos retratou o protótipo ensaiado realizado por Chen (1992) que simulava o comportamento de um mecanismo “U” invertido à flambagem lateral com distorção.

No Item 3 foram apresentados e discutidos os resultados obtidos numericamente, confrontando-os com os resultados experimentais de Chen (1992). Observou-se uma boa concordância entre os resultados experimentais obtidos por Chen (1992) e os resultados numéricos. Foi observado também no modelo numérico que o ponto de máximo deslocamento lateral não coincide, mas está próximo ao que foi destacado por Jonhson (2004), o qual cita que o deslocamento máximo lateral se localiza a uma distância em relação ao apoio de duas a três vezes a altura do perfil de aço. Após as análises e comparações do modelo numérico com os resultados experimentais obtidos por Chen (1992), considera-se que a modelagem numérica deste trabalho é apropriada para o estudo de FLD.

Sugere-se, como trabalhos futuros, avaliar com maior precisão as incertezas associadas ao modelo numérico como a influência das tensões residuais e da imperfeição geométrica, o valor adotado para o módulo de elasticidade do concreto armado e as constantes de contato entre a laje de concreto armado e a mesa superior do perfil de aço. Além disso, pode-se realizar um estudo paramétrico com o intuito de avaliar os parâmetros que influenciam na FLD.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERENCIAS

ANSYS, INC. *Release 17.0 documentation for Ansys*. Canonsburg: [s.n.], 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6118. *Projeto de estruturas de concreto – procedimentos*. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 8800. *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro, 2008.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION – BS 5400. *Steel, concrete and composite beams. Code of practice for design of steel bridges*. Londres, 1982.

CALENZANI, A.F.G. *Proposição de procedimento para a determinação da rigidez rotacional de vigas mistas contínuas e semicontínuas com perfis de alma senoidal*. 2008. Tese de doutorado – Centro de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CHEN, S. *Instability of composite beams in hogging bending*. 1992. Tese de doutorado – Departamento de Engenharia, Universidade de Warwick, U.K.

CONTAMINE, R.; SI-LARBI, A.; THAN, N.Q.; HAMELIN, P. Numerical modeling of reinforced concrete beams under shear stress with and without external textile-reinforced concrete reinforcement. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 30, n. 15, p. 1293-1303, 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - ENV 1991-1-1:1991. *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures: general rules and rules for buildings*. Brussels, 1991.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - EN 1994-1-1:2004. *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: general rules and rules for buildings*. Brussels, 2004.

FAN, C.K.R. *Buckling in continuous composite beams*. 1990. Tese de doutorado – Departamento de Engenharia, Universidade de Warwick, U.K.

JOHNSON, R.P. *Composite structures of steel and concrete: beams, slabs, columns and frames for buildings*. 3 ed. Warwick, U.K.: Blackwell, 2004, 250p.