

7

Considerações Finais

7.1

Introdução

A utilização de ligações semi-rígidas tem se mostrado de grande importância no projeto de estruturas de aço possibilitando uma maior redução nos custos de fabricação e montagem.

Na tentativa de se avaliar o real comportamento destas ligações, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos nesta área. Muitos ensaios em laboratório foram realizados e possibilitaram a calibração dos modelos existentes.

Este trabalho baseou-se no Eurocode 3 [8-9] – Norma Européia para Projeto de Estruturas de Aço – por se tratar, no momento, da única norma que considera o comportamento semi-rígido das ligações em estruturas de aço. Desta forma, comenta-se a seguir, os procedimentos adotados na realização deste trabalho.

Primeiramente, uma nova metodologia de dimensionamento de ligações semi-rígidas proposta pelo Eurocode 3 [8-9] foi apresentada onde as ligações são avaliadas através de modelos mecânicos. Estes modelos mecânicos, geralmente conhecidos como modelos de molas, são baseados na simulação da ligação através da utilização de um conjunto de componentes rígidos e flexíveis. O comportamento não-linear de cada uma destas componentes é obtido por meio de leis constitutivas inelásticas adotadas para os elementos de mola.

Esta metodologia de cálculo das ligações não considera a presença de esforço axial (tração/compressão) nas mesmas, impondo apenas uma limitação empírica de 5% da resistência plástica da viga como esforço axial máximo para o qual, os procedimentos disponíveis se mantêm aplicáveis. Vale ressaltar que não existe nenhum fundamento para justificar este limite empírico de 10%. Vale lembrar que existem alguns tipos de estruturas onde o esforço axial proveniente das vigas é superior a este limite de 10% da resistência plástica dos membros, não havendo nenhuma recomendação de como deve ser feito seu dimensionamento.

Baseando-se nesta limitação encontrada no Eurocode 3, o principal

objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento de ligações viga-coluna em estruturas de aço submetidas a momento fletor e esforço axial de tração ou compressão fora deste limite empírico de 5%.

Sendo assim, foram escolhidos dois tipos de ligações viga-coluna com placa de extremidade. Na primeira série foram realizados oito ensaios de ligações com placa de extremidade ajustada e na segunda série, sete ensaios de ligações com placa de extremidade estendida.

A concepção estrutural dos ensaios bem como os sistemas de aplicação de esforço axial utilizados, seja de compressão ou de tração, são inéditos, sem qualquer referência na literatura.

O sistema de aplicação de esforço axial de compressão foi composto por um macaco hidráulico posicionado posterior da parede de reação que ao tracionar os quatro cabos de protensão, transmitia um esforço de compressão à ligação através de uma peça colocada na extremidade da viga. A aferição da carga aplicada era feita através de uma célula de carga central, posicionada entre a extremidade da viga e a peça mencionada anteriormente. Para garantir que a carga aplicada em cada um dos cabos de protensão permanecesse constante, utilizou-se também, uma célula de carga em cada um destes cabos.

Um dos problemas verificados na aplicação do esforço axial de compressão foi que, para níveis elevados de momento fletor aplicado, a carga nos cabos superiores começava a aumentar e diminuía nos cabos inferiores. Porém, esta diferença não provocava alterações no esforço axial aplicado à ligação tendo em vista que a transmissão deste era feita através da célula de carga central conforme citado acima. Para solucionar este problema, a solução adotada consistiu em utilizar um macaco hidráulico em cada um dos cabos de protensão, ligados ao mesmo circuito hidráulico, de forma a manter constante a pressão nestes cabos e, conseqüentemente, a carga em cada um deles. Por fim, utilizou-se uma eletro-válvula conectada a este sistema hidráulico possibilitando ajustes ainda mais precisos.

De forma a manter o esforço axial aplicado sempre paralelo a viga, utilizou-se um desviador composto por um perfil H, posicionado paralelamente a coluna do ensaio e na mesma direção do ponto de rotação da ligação, por onde passavam os cabos de protensão, mantendo-os sempre paralelos ao eixo da viga.

Para os ensaios com esforço axial de tração, utilizou-se o conceito de inversão de carga ou “gaiola”, ou seja, quatro macacos hidráulicos, interligados entre si, posicionados entre a peça colocada na extremidade da viga e um perfil

tubular ligado ao desviador. Ao se aplicar a carga nestes macacos, deslocava-se a peça colocada na extremidade da viga, fazendo com que um esforço de tração fosse transmitido à ligação.

Os perfis tubulares mencionados acima foram considerados rotulados na ligação com o desviador de forma a garantir, novamente, que o esforço axial aplicado permanecesse paralelo ao eixo da viga.

7.2

Conclusões

A análise dos resultados obtidos nos ensaios da primeira série, ou seja, ligações com placa de extremidade ajustada, permitiu algumas conclusões importantes conforme descrito a seguir:

- o valor da resistência ao momento fletor (63,96kN.m/rad) obtida através do Eurocode 3, para o ensaio FE1 onde se aplicou apenas momento fletor, apresentou um valor coerente quando comparado com o obtido experimentalmente (67,8kN.m/rad), estando o dimensionamento a favor da segurança;
- já a rigidez inicial deste mesmo ensaio igual a 11929kN.m/rad representou praticamente o dobro do valor obtido experimentalmente. Entretanto, utilizando-se a simplificação proposta na norma utilizada, tem-se um novo valor de rigidez, $S_{j,ini}/\eta=5965\text{kN.m/rad}$, mais coerente com o valor encontrado experimentalmente, 5785kN.m/rad. Vale lembrar que o valor da rigidez inicial obtido experimentalmente foi calculado no trecho de descarga da curva momento *versus* rotação;
- a presença de esforço axial de tração ou de compressão não influenciou significativamente a rigidez inicial dos outros ensaios cujos valores variaram em torno de 6000 kN.m/rad, com a exceção do ensaio FE6 onde se aplicou o maior nível de esforço axial de compressão correspondente a 27% da resistência plástica da viga que apresentou um valor de rigidez 26,4% superior ao ensaio FE1;
- com relação a resistência à flexão das ligações, nos ensaios com esforço axial de compressão, até o nível utilizado, ou seja, 27% da resistência plástica da viga, os valores obtidos ainda foram superiores ao ensaio FE1 com um ganho de resistência de até 13%. Isto mostra que a limitação de 5% imposta pelo Eurocode 3 deve ser

reavaliada. Entretanto, nos ensaios com esforço axial de tração, logo no primeiro ensaio, FE8, verificou-se uma perda de resistência à flexão da ordem de 13% enquanto que para o ensaio FE9, a perda foi ainda maior, ou seja, 26%.

- no que diz respeito ao comportamento individual das componentes presentes neste tipo de ligação, também se verificou que o esforço axial influencia de forma significativa o comportamento das mesmas conforme os resultados apresentados no capítulo quatro;
- nos ensaios da primeira série não se verificou o efeito de alavanca na flexão da placa de extremidade tendo em vista que somente metade do “*T-stub*” é considerado;
- e finalmente, a análise da seqüência de escoamento das diversas componentes mostrou como o esforço axial pode modificar o comportamento da ligação, principalmente no que diz respeito a resistência ao momento fletor. Para os ensaios com esforço axial de compressão, o atraso no escoamento das componentes da zona tracionada da ligação, principalmente a componente placa de extremidade à flexão (5), que é a componente crítica desta região, faz com que a ligação atinja níveis mais elevados de momento fletor aplicado até o nível em que a componente crítica da zona comprimida, ou seja, mesa da viga em compressão (7), comece a controlar a resistência da ligação.

Para os ensaios das ligações com placa de extremidade estendida, as principais conclusões obtidas foram:

- avaliando-se os resultados do primeiro ensaio desta série, EE1, onde se aplicou apenas momento fletor, o valor de resistência ao momento fletor obtido experimentalmente, 118,7kN.m foi cerca de 5% inferior ao previsto pelo Eurocode 3, 125,0kN.m. Neste ensaio verificou-se que a ligação somente atingiu este nível do momento fletor com uma rotação associada da ordem de 68mrad, ou seja, com uma deformação excessiva mostrando que o dimensionamento efetuado encontra-se contra a segurança. A provável causa para esta diferença pode estar relacionada com a posição do centro de compressão da ligação. De acordo com o Eurocode 3, considera-se que o centro de compressão está localizado na linha média da mesa inferior da viga mas experimentalmente, e de acordo com Owens [54], considera-se que o eixo neutro está posicionado até 1/6 da

altura da viga acima da mesa inferior. Com esta redução nos braços-de-alavanca das linhas de parafusos consideradas no dimensionamento, reduz-se a resistência à flexão para 104,5kN.m, sendo este valor mais coerente com o obtido experimentalmente;

- conforme descrito anteriormente nas conclusões referentes aos ensaios da primeira série, os valores de rigidez inicial obtidos experimentalmente para os ensaios da segunda série foram inferiores aos previstos pelo Eurocode 3, exceto para o ensaio EE1. Isto mostra que a rotação do painel de alma da coluna é bastante influenciada pela presença do esforço axial na ligação fazendo com que a rotação da ligação e, conseqüentemente, a rigidez inicial da mesma, seja afetada por este esforço axial;
- a presença do esforço axial nos ensaios de ligações com placa de extremidade estendida modificou a resposta da ligação no que diz respeito à resistência à flexão das mesmas mas de forma menos significativa que nos ensaios da série anterior. O ensaio que apresentou maior momento resistente, 125,4kN.m, foi o EE2 para um nível de esforço axial de compressão equivalente a 10% da resistência plástica da viga. Todavia, para níveis mais elevados de esforço axial de compressão, a resistência ao momento fletor obtida foi inferior devido ao escoamento antecipado da componente mesa da viga em compressão;
- mais uma vez verificou-se a influência do esforço axial no comportamento individual das diversas componentes presentes nas ligações da segunda série;
- contrariamente ao verificado nos ensaios da primeira série, o efeito de alavanca na parte superior da ligação, ou seja, região submetida à tração devido a presença do “T-stub” foi extremamente significativo. Este efeito foi melhor observado nos ensaios com esforço axial de compressão.
- A evolução do escoamento das diversas componentes presentes neste tipo de ligação demonstrou mais uma vez que a aplicação de esforço axial modificou o comportamento individual destas componentes, afetando então, a resposta da ligação em termos de resistência à flexão.

Com o intuito de se variar os parâmetros importantes no dimensionamento destas ligações, um modelo mecânico que considera ligações

submetidas a esforços axiais foi proposto baseando-se no modelo existente no Eurocode 3.

Os resultados obtidos com o modelo mecânico foram satisfatórios para os ensaios da primeira série. Entretanto, para os ensaios da segunda série, o modelo ainda merece um maior refinamento apesar de ter conseguido reproduzir a curva momento *versus* rotação de quase totalidade dos ensaios.

Uma outra comparação foi feita com um modelo existente na literatura proposto por Cerfontaine [11], apresentando maior coerência, com o modelo proposto neste trabalho, para os ensaios da primeira série. Para a segunda série, a diferença maior ocorreu no limite imposto pelo esforço de tração aplicado correspondente ao escoamento da componente mais fraca inserida na zona em compressão da ligação, conforme comentado no §6.6 do capítulo 6.

O limite de 5% da resistência plástica da viga, como esforço axial máximo permitido, para que a formulação proposta no Eurocode 3 [8,9] possa ser utilizada, pode fornecer valores contra a segurança, principalmente em ligações viga-coluna com placa de extremidade ajustada. Como não se faz distinção entre tração ou compressão para este esforço axial, no caso de ligações submetidas a momento fletor e esforço axial de tração correspondente aos 10% de N_{pl} , o valor da resistência à flexão obtido experimentalmente, representa uma perda de 17% quando comparado com o valor do ensaio somente com aplicação de momento fletor. Por outro lado, ao utilizar a regulamentação proposta para ligações com momento fletor e esforço axial de compressão, obtém-se ligações superdimensionadas, ou seja, com resistência à flexão cerca de 7% maior do que a dimensionada. Adicionalmente, caso sejam utilizados os coeficientes de segurança propostos, a diferença torna-se ainda maior.

Por outro lado, para ligações com placa de extremidade estendida, a perda de resistência à flexão para ensaios com esforço axial de tração equivalente a 10% de N_{pl} , foi inferior ao valor obtido nos ensaios com placa de extremidade ajustada, ou seja, 5% contra os 17% obtidos anteriormente. Isto ocorreu devido à presença de mais uma linha de parafusos na zona em tração da ligação. Já para os ensaios com esforço axial de compressão, mesmo com valores elevados, da ordem de 27% de N_{pl} , o valor de resistência obtido é um pouco inferior ao ensaio com momento fletor apenas, ou seja, a formulação proposta no Eurocode 3 [8, 9] poderia ser utilizada para este caso.

7.3

Sugestões para Trabalhos Futuros

Uma das principais dificuldades encontradas na análise dos resultados experimentais foi conseguir extrair o real comportamento de cada uma das componentes envolvidas numa ligação.

Portanto, torna-se viável realizar uma análise através do método dos elementos finitos que permita uma avaliação mais profunda destas componentes da ligação e, finalmente, uma calibração final do modelo de molas bi-dimensional.

Uma melhor avaliação da formulação utilizada na caracterização das diversas componentes faz-se necessário, principalmente no que diz respeito ao comportamento da placa de extremidade à flexão devido as simplificações efetuadas no dimensionamento da mesma. Faella e Piluso propõem modificações na avaliação desta componente, principalmente no cálculo da rigidez inicial de linhas de parafusos situadas abaixo da mesa superior da viga além de considerações sobre aplicação ou não de protensão nos parafusos.

A componente mesa da viga à compressão também deve ser melhor avaliada tendo em vista o seu comportamento dúctil conforme verificado nos ensaios experimentais. Neste caso, dever-se-ia considerar um comportamento elasto-plástico e não rígido-plástico conforme adotado neste trabalho.

Outro aspecto bastante relevante no dimensionamento de ligações viga-coluna sem a utilização de enrijecedores na alma da coluna diz respeito a posição do centro de compressão. Evidentemente que ao se utilizar coeficientes de resistência, minora-se a resistência à flexão mas dependendo do tipo de ligação, estes coeficientes podem não ser suficientes.

Outros tipos de ligações, como por exemplo, utilizando-se mísulas e perfis diferentes dos utilizados neste trabalho também devem ser objeto de estudo pois com isso, ter-se-ia uma gama maior de resultados para estudo mais aprofundado do comportamento individual das componentes.

De posse de mais resultados, torna-se possível a realização de uma análise paramétrica identificando o efeito de cada uma das componentes e a influência de uma dada componente no comportamento da outra. A partir disso, deve-se propor uma nova formulação de dimensionamento a ser inserida no Eurocode 3 [8, 9].

Finalmente, ensaios cíclicos com análise da capacidade de dissipação de energia e capacidade de rotação de ligações submetidas a momento fletor e

esforço axial também devem ser avaliados, além de ligações semi-rígidas mistas.