



SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO NÃO LINEAR DE LIGAÇÕES VIGA-PILAR PARA ESTRUTURAS DE AÇO

Lílian Mara S. Buonicontro

Renata G. Lanna da Silva

Nilton da Silva Maia

lilianbuonicontro@gmail.com

rglanna.silva@gmail.com

niltonmaia@civil.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica, CEFET, Campus II

Av. Amazonas, 7675 - Nova Gameleira, Belo Horizonte, CEP 30510-000, Brasil

Rodrigo Sernizon Costa

Armando Cesar Campos Lavall

rsernizon@hotmail.com

lavall@dees.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG

Av. Antônio Carlos, 6627, 4º andar – Pampulha, Belo Horizonte, CEP 31270-901, Brasil

Resumo. Atualmente, pesquisas têm sido dedicadas ao estudo do comportamento das ligações e sua influência na resistência e na estabilidade estrutural. Essas pesquisas têm conduzido ao desenvolvimento de ferramentas de projeto para avaliação das propriedades mecânicas das ligações. Os sistemas de classificação proporcionam uma escolha adequada da ligação, considerando o seu comportamento na estrutura e contribuem para o desenvolvimento de projetos estruturais mais confiáveis e econômicos. Este trabalho apresenta um sistema de classificação não linear para uso no dimensionamento de estruturas. Os limites para a classificação em termos de rigidez são estabelecidos levando-se em conta os comportamentos das estruturas nos estados limites últimos e de serviço e os limites para a classificação em termos de resistência levando-se em conta o estado limite último. A validade do sistema de classificação proposto é confirmada pela análise do comportamento global de pórtico semirrígido em exemplo numérico. O sistema de classificação mostrou ser mais simples e preciso que os sistemas de classificação existentes.

Palavras-chave: Sistema de classificação não linear, Ligações de aço, Ligações semirrígida.

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.

1 INTRODUÇÃO

O comportamento global das estruturas de aço depende, dentre outros fatores, do comportamento das ligações, que por sua vez depende diretamente da interação entre os elementos e os meios que as compõem: cantoneiras, chapas, soldas e parafusos, assim como das características geométricas dos perfis conectados.

Os cálculos baseados em idealizações de nós totalmente rígidos ou rotulados resultam em valores imprecisos das respostas estruturais. Isso porque, na realidade, a maioria das ligações nas estruturas de aço apresenta um comportamento não linear, definido como semirrígido. As ligações semirrígidas permitem algum movimento relativo entre os elementos conectados nas ligações consideradas rígidas e uma determinada transmissão de momento fletor entre os elementos conectados, nas ligações consideradas rotuladas.

Os sistemas de classificação das ligações são desenvolvidos visando proporcionar uma escolha adequada e realista das ligações consideradas no dimensionamento das estruturas. Portanto, para considerar o mais próximo da realidade o comportamento das ligações no projeto estrutural, torna-se interessante, estabelecer limites e intervalos baseados em parâmetros que representam as características da ligação, em termos de resistência, rigidez e capacidade de rotação, por meio de sistemas de classificação.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de classificação consistente, a partir de resultados experimentais, teóricos e numéricos obtidos por diversos pesquisadores para vários tipos de ligações. Os limites para a classificação em termos de rigidez são estabelecidos levando-se em conta os comportamentos das estruturas nos estados limites últimos e de serviço e os limites para a classificação em termos de resistência levando-se em conta o estado limite último.

Ao final, é apresentado o estudo do comportamento global de um pórtico semirrígido, avaliando-se a influência das ligações na distribuição de esforços, nos deslocamentos e nos mecanismos de colapso da estrutura, validando o sistema de classificação proposto. As curvas momento-rotação relativa das ligações são incorporadas no programa desenvolvido por Lavall (1996) adaptado por Silva (2010), capaz de realizar a análise elastoplástica avançada de pórticos de aço considerando o comportamento das ligações.

2 COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES E SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO EXISTENTES

Em uma ligação entre viga e pilar, geralmente, ocorre a transmissão de forças normais, forças cortantes, momentos fletores e de torção. Contudo, para a maioria das ligações em estruturas aporticadas, as deformações causadas pelas forças normais e cortantes são pequenas quando comparadas com a deformação rotacional, podendo ser desconsideradas na análise. O efeito causado pela torção também é negligenciado no estudo de estruturas planas.

Portanto, nas estruturas reticuladas o comportamento das ligações é traduzido pela curva $M-\theta_r$, onde a rotação relativa θ_r da ligação representa a mudança do ângulo entre a viga e o pilar da configuração original para a configuração deformada, devido ao momento fletor,

conforme mostra a Fig. 1. A partir da curva $M-\theta_r$, são definidas três propriedades fundamentais de uma ligação: a rigidez rotacional inicial (S_j), o momento resistente ($M_{j,Rd}$) e a capacidade rotacional (θ_{Cd}).

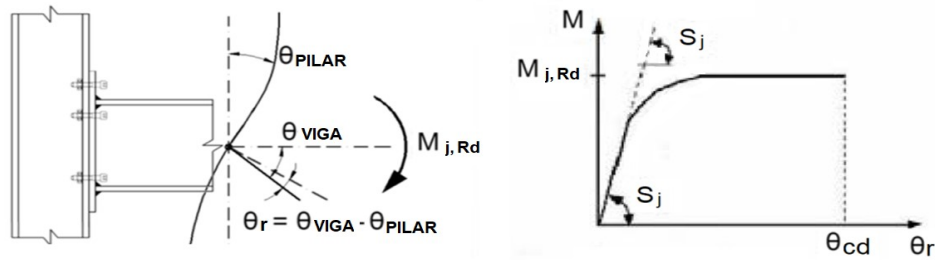


Figura 1. Rotação de uma ligação viga-pilar, adaptado de Silva e Lavall (2009)

Existem, na literatura técnica, diferentes sistemas de classificação que estabelecem limites segundo os critérios de rigidez, resistência e capacidade de rotação, como o sistema adimensional proposto por Bjorhovde *et al.* (1990). Diversas normas também estabelecem critérios de classificação das ligações, como a EN 1993-1-8:2005 e a ABNT NBR 8800:2008.

Bjorhovde *et al.* (1990) propuseram um sistema adimensional de classificação baseado em diagramas $M-\theta_r$ bilineares, estabelecendo critérios segundo a rigidez, a resistência e a capacidade de rotação da ligação. O sistema desenvolvido compara a rigidez da ligação com a rigidez da viga, utilizando-se um parâmetro denominado comprimento de referência da viga igual a $5d$, onde d é a altura da seção transversal. Este sistema classifica as ligações em três categorias: rígidas, semirrígidas e flexíveis.

A Figura 2 mostra as regiões delimitadas para cada uma dessas classificações. O parâmetro adimensional $\bar{m}$ é definido pela relação entre o momento da ligação (M) e o momento de plastificação total da seção transversal da viga (M_p). O parâmetro adimensional $\bar{\theta}$ é definido pela relação entre a rotação relativa (θ_r) da ligação e a rotação da extremidade da viga $\theta_p = 5M_p d / EI_b$, onde $5d$ é o comprimento de referência, I_b o momento de inércia da seção transversal da viga e E o módulo de elasticidade do aço. A ligação é classificada como rígida, se em termos de resistência $\bar{m} \geq 0,7$ e em termos de rigidez se $\bar{m} > 2,5\bar{\theta}$. Uma ligação é considerada semirrígida, se em termos de resistência os limites forem dados por $0,2 < \bar{m} < 0,7$ e em termos de rigidez $0,5\bar{\theta} < \bar{m} < 2,5\bar{\theta}$. Quando os limites de resistência e de rigidez forem, respectivamente, $\bar{m} \leq 0,2$ e $\bar{m} \leq 0,5\bar{\theta}$, a ligação é considerada flexível.

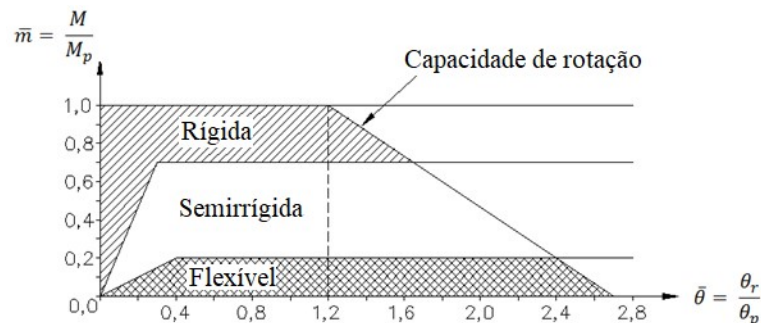


Figura 2. Sistema de classificação segundo Bjorhovde *et al.* (1990)

Bjorhovde *et al.* (1990) também desenvolveram uma expressão para cálculo da capacidade de rotação da ligação baseada no comprimento de referência da viga e por curvas de ajustes com dados de ensaios, dada por $\bar{m} = (5,4 - 2\bar{\theta})/3$.

A norma EN 1993-1-8:2005 estabelece um método de classificação da ligação baseado nos critérios de rigidez e resistência. A classificação proposta utiliza o comprimento real da viga para definir a rigidez, sendo dependente do tipo de estrutura (contraventada ou não), uma vez que os efeitos da semirrigidez das ligações diferem para cada tipo. Segundo o critério da rigidez rotacional, três regiões são definidas:

As ligações que situam-se na *Zona 1* são classificadas como *rígidas*. Essas ligações transmitem todos os esforços nelas impostos com deformações insignificantes. Para estruturas contraventadas, a ligação é considerada rígida se $S_j \geq 8EI_b/L_b$, onde S_j é a rigidez à rotação secante da ligação; I_b e L_b , o momento de inércia e o vão da viga conectada, respectivamente. Para estruturas não contraventadas, a ligação é classificada como rígida se $S_j \geq 25EI_b/L_b$. Os limites de rigidez para ambas as estruturas são válidas desde que $K_b/K_c \geq 0,1$, sendo K_b o valor médio de I_b/L_b para todas as vigas no topo do pavimento e K_c o valor médio de I_c/L_c para todos os pilares do pavimento.

As ligações que não atendem aos critérios de ligação rígida ou flexível, situam-se na *zona 2* e são classificadas como *semirrígidas*. Se a rigidez $S_j \leq 0,5EI_b/L_b$, as ligações situam-se na *zona 3* e são classificadas como *flexíveis*.

Quanto à resistência, as ligações podem ser classificadas como totalmente resistentes (*full strength*) quando a resistência de cálculo da ligação é igual ou superior à resistência dos elementos conectados. Sendo assim, a rótula plástica se desenvolve na barra e não na ligação. Segundo a norma as ligações são classificadas como totalmente resistentes se $M_{j,Rd} \geq \text{menor}(M_{b,pl,Rd}; M_{c,pl,Rd})$ para uma ligação localizada em pilares do último andar e $M_{j,Rd} \geq \text{menor}(M_{b,pl,Rd}; 2M_{c,pl,Rd})$ para uma ligação localizada em pilares intermediários, sendo $M_{b,pl,Rd}$ e $M_{c,pl,Rd}$ os momentos resistentes de cálculo da viga e do pilar, respectivamente.

As ligações são classificadas como flexíveis (*nominally pinned*) quando são capazes de transmitir forças internas sem desenvolver momentos significativos que possam afetar as barras ou a estrutura como um todo. Devem ainda, possuir capacidade de rotação suficiente de modo a permitir as rotações resultantes dos esforços solicitantes.

A ligação é flexível se $M_{j,Rd} \leq 0,25 \times \text{menor}(M_{b,pl,Rd}; M_{c,pl,Rd})$ para uma ligação localizada em pilares do último andar e $M_{j,Rd} \leq 0,25 \times \text{menor}(M_{b,pl,Rd}; 2M_{c,pl,Rd})$ para uma ligação localizada em pilares intermediários. As ligações são classificadas como parcialmente resistentes (*partial strength*), quando não se enquadram nem nos critérios de ligação totalmente resistente nem nos de flexível.

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 classifica as ligações em relação à rigidez rotacional, mas não estabelece regras para classificar quanto à resistência das ligações. A ligação, independente do tipo de estrutura (contraventada ou não), é considerada rígida quando a sua rigidez $S_j \geq 25EI_b/L_b$ e rotulada quando $S_j \leq 0,5EI_b/L_b$. Quando a ligação não atende aos critérios de ligação rígida ou rotulada, ela é classificada como semirrígida.

3 PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE ELÁSTICA E ELASTOPLÁSTICA EM TEORIA DE SEGUNDA ORDEM

Para desenvolver o sistema de classificação de ligações é utilizado o programa PPLANLEP (Pórticos Planos de Aço, considerando a Análise Não Linear Elasto-plástica), desenvolvido por Lavall (1996) e aprimorado por Silva (2010), escrito na linguagem FORTRAN 90, que considera as análises em teoria de 2ª ordem elástica e elastoplástica de pórticos planos de aço com ligações semirrígidas.

O programa utiliza o método Newton-Raphson puro para a solução numérica das equações não lineares. Assim, no processo incremental-iterativo, averigua-se o equilíbrio da estrutura em cada iteração de acordo um critério de convergência baseado nos deslocamentos.

Os efeitos $P-\Delta$ e $P-\delta$, oriundos da análise não linear geométrica, são contemplados. A não linearidade do material é considerada pelo método da plasticidade distribuída ou método da zona plástica, que permite acompanhar o processo de plastificação ao longo do comprimento da barra ao dividi-la em elementos finitos e ao longo da altura da seção transversal ao se considerar a técnica das fatias. Dessa forma, o programa permite que as fibras constituintes da seção transversal plastifiquem quando as tensões provenientes do carregamento aplicado forem superiores à tensão de escoamento do material.

A técnica das fatias, além de efetuar as variações de tensões e a propagação do escoamento ao longo da altura da seção transversal, permite também a implementação de qualquer modelo de distribuição de tensões residuais. Estas tensões são responsáveis pelo início precoce do comportamento não linear do material. A tensão residual em cada fatia é admitida constante, desde que as fatias tenham pequena espessura. Logo, o valor do estado de tensão no centro de cada fatia é considerado com o valor de toda ela. Admite-se então que, se esta tensão alcançar a tensão local de escoamento, toda a fatia se torna plástica, enquanto que aquelas com tensão inferior à tensão de escoamento local permanecem elásticas.

O modelo constitutivo do material com até cinco trechos lineares pode ser considerado. Dessa forma, o comportamento elástico perfeitamente plástico, adotado com frequência para o aço, pode ser contemplado.

O programa permite uma representação multilinear da curva momento $\times$ rotação, com até cinco trechos lineares para modelar o comportamento não linear de uma ligação semirrígida e considera o elemento de mola para representar a ligação. A descarga ou recarga podem ser consideradas em qualquer trecho da curva da ligação.

4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO

Segundo Hasan *et al.* (1998), os sistemas de classificação existentes como o de Bjorhovde *et al.* (1990) e da norma EN 1993-1-8 (2005), podem ser questionados pelo fato da rigidez da ligação ser expressa apenas em termos da rigidez da viga e pelo fato dos limites entre as zonas serem demarcados por segmentos de reta (não curvas). No sistema de classificação europeu, a rigidez inicial da ligação considera o comprimento real da viga, enquanto que em Bjorhovde *et al.* (1990), a rigidez é função de um comprimento de referência igual a 5 vezes a altura da seção transversal da viga.

A fragilidade destes sistemas está exatamente em tentar compreender a rigidez inicial somente em termos da rigidez da viga, uma vez que a rigidez da ligação é dependente das propriedades físicas e geométricas dos elementos ligados. Diante disso, propõe-se um sistema de classificação de ligações não linear, que seja mais consistente que os sistemas de classificação existentes, para uso no dimensionamento de estruturas de aço.

4.1 Banco de dados

Com a intenção de desenvolver um sistema de classificação que seja adequado às ligações utilizadas no Brasil, foram coletadas um total de 35 curvas momento $\times$ rotação, obtidas por pesquisadores por meio de ensaios experimentais, simulações numéricas e por modelos mecânicos ou analíticos, criando um banco de dados relativo ao comportamento das ligações brasileiras. A Tabela 1 apresenta os tipos de ligações estudados pelos respectivos autores, bem como as seções transversais e a resistência ao escoamento da viga e dos pilares conectados à ligação. As ligações com chapa de extremidade estendida e ligações com cantoneira simples na alma foram escolhidas para as análises, uma vez que essas ligações são geralmente consideradas como rígidas e rotuladas, respectivamente. Uma ligação com cantoneiras de topo e assento e dupla cantoneira na alma também foi abordada.

Tabela 1. Tipo de ligação, seções transversais e resistência ao escoamento de pilares e vigas, por autor

Autor	Tipo de ligação	Seção transversal		Resistência ao escoamento (MPa)	
		Pilar	Viga	Pilar	Viga
Avakian (2007)	Chapa de extremidade estendida / Cantoneira de topo assento e cantoneira dupla na alma	CVS 500x259	W 530x66	300	345
Coelho (2009)	Chapa de extremidade estendida	HE 340M	IPE 300	355	235
Bergamasco (2012)	Chapa de extremidade estendida	CVS 300x70	VS 250x37	250	250
Higaki (2014)	Chapa de extremidade estendida	HP 300x93	W 460x68	250	250
Oliveira (2015)	Chapa de extremidade estendida	W 310x143	W 360x72	250	250
Pinheiro e Silveira <i>apud</i> Silva (2010)	Cantoneira simples	W 310x143	W 360x72	250	250

4.2 O pórtico plano

O pórtico, adaptado de Chen *et al.* (1996), é formado por dois andares simples, não contraventados conforme a Fig. 3a.

O carregamento vertical distribuído de cálculo é constituído por 0,20kN/cm nas duas vigas, tanto para a carga permanente quanto para a sobrecarga, e por uma carga horizontal concentrada aplicada no topo do primeiro andar igual a 20kN e por uma carga horizontal concentrada aplicada no topo do segundo andar igual a 10kN. A carga uniformemente distribuída nas vigas é modelada como um conjunto de cargas nodais equivalentes. As bases do pórtico são engastadas. As seções transversais, constituídas por perfis I, bem como as propriedades mecânicas variam de acordo com a referência estudada. O módulo de elasticidade longitudinal é igual a 200.000 MPa.

O pórtico foi dividido num total de 20 nós e 20 elementos, sendo 2 elementos iguais em cada pilar, 4 elementos iguais em cada viga e 4 elementos de mola para as ligações. Na Fig. 3b pode-se observar a discretização dos nós e dos elementos do pórtico, onde os elementos 9 e 14 representam as ligações do primeiro andar e os elementos 15 e 20 representam as ligações do segundo andar. As seções transversais foram divididas em 20 fatias, sendo uma fatia para cada mesa e 18 para alma do perfil.

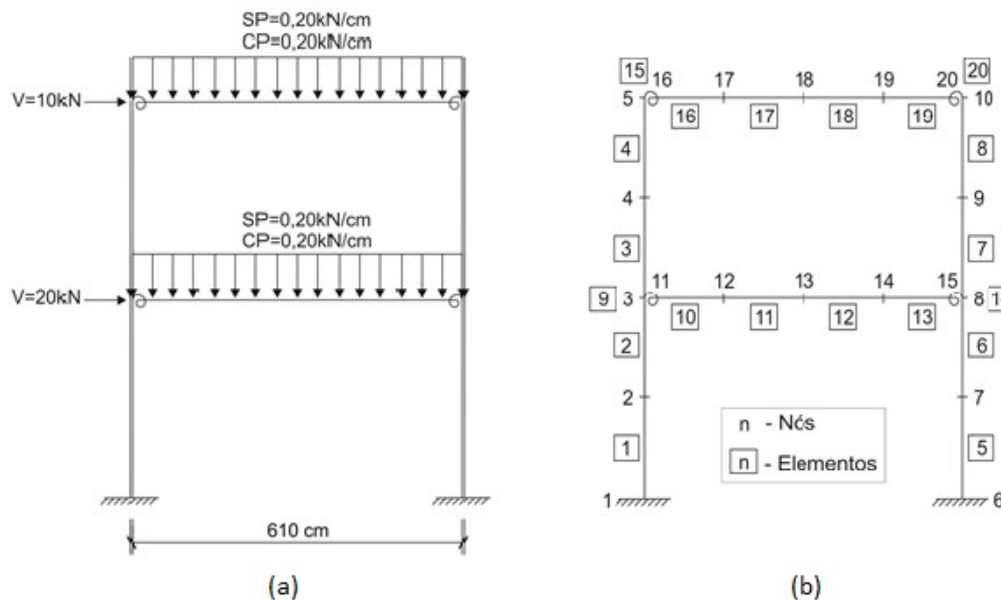


Figura 3. O pórtico: (a) cargas e dimensões, (b) discretização de elementos e nós

4.3 O sistema de classificação

O sistema proposto é concebido pela divisão de três zonas de classificação separadas por duas linhas não lineares obtidas pelo modelo matemático de três parâmetros:

$$M = \frac{R_{ki}\theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\theta_r}{\theta_0}\right)^n\right]^{\frac{1}{n}}} \quad (1)$$

Onde, R_{ki} é a rigidez inicial da ligação, n o fator de forma, θ_0 a rotação plástica de referência e igual a M_u/K_i , sendo M_u o momento último da ligação.

Para adequar o modelo de três parâmetros ao sistema de classificação, é necessário encontrar os valores exatos dos parâmetros para as duas linhas de demarcação, ou seja, os valores da rigidez inicial R_{ki} e do momento último M_u para definir as fronteiras entre os comportamentos rígido, semirrígido e rotulado. O valor do parâmetro de forma n , usado para calibração de curvas $M-\theta_r$ no modelo de três parâmetros, é adotado igual a uma unidade, pois segundo Hasan *et al.* (1998) esse valor além de simples, possui precisão suficiente para os comportamentos das ligações.

4.3.1 Classificação quanto à rigidez

A rigidez inicial máxima de ligações semirrígidas, ou seja, a rigidez inicial mínima de ligações rígidas é obtida a partir da análise do pórtico, comparando os resultados obtidos do momento fletor solicitante na ligação e do deslocamento lateral no topo da estrutura com ligações com chapa de extremidade estendida e cantoneira de topo e assento com cantoneira dupla na alma com os resultados obtidos considerando os mesmos pórticos com ligação totalmente rígida.

Similarmente, a rigidez inicial mínima de ligações semirrígidas, isto é, a rigidez inicial máxima das ligações rotuladas é obtida a partir da comparação entre os resultados obtidos do momento fletor solicitante na ligação e da flecha no meio do vão da viga considerando as ligações com cantoneira simples com os resultados do momento fletor solicitante na ligação considerando as ligações completamente rígidas e da flecha no meio do vão da viga considerando as ligações idealmente rotuladas, respectivamente. As curvas momento-rotação foram extraídas a partir da base de dados consolidada apresentada anteriormente e as ligações totalmente rígidas e idealmente rotuladas baseadas nas relações $\theta_r=0$ e $M=0$, respectivamente.

O comportamento elástico linear da ligação é adotado no estudo de rigidez, isto é, apenas a sua rigidez inicial é considerada na análise.

Para o cálculo do valor momento fletor solicitante na ligação segundo o Estado Limite Último (ELU), as cargas aplicadas, de forma incremental nos pórticos, são aquelas mostradas na Fig. 3. Para o cálculo dos deslocamentos laterais e das flechas nos nós segundo o Estado Limite de Serviço (ELS), são utilizadas as cargas de serviço. Por simplificação, todas as cargas de serviço são consideradas dividindo-se as cargas últimas pelo fator igual a 1,4.

As respostas dos pórticos, ou seja, os valores do momento solicitante na ligação da extremidade direita da viga do segundo andar (elemento 20), do deslocamento lateral no topo do pórtico (nó 5) e da flecha no meio do vão da viga do primeiro andar (nó 13), são determinados utilizando-se a análise elástica em 2ª ordem no programa de Lavall (1996) e adaptado por Silva (2010). A partir desses resultados, são plotados os gráficos $m^* \times \log R_{ki}$ e $d^* \times \log R_{ki}$, onde m^* e d^* são obtidos a partir das relações conforme a Eq. (2):

$$\text{momento } m^* \text{ ou deslocamento } d^* = \frac{\text{momento ou deslocamento com a ligação estudada}}{\text{momento ou deslocamento com ligação idealmente rígida ou idealmente rotulada}} \quad (2)$$

A Figura 4 mostra a distribuição de $m^* \times \log_{10} R_{ki}$ e $d^* \times \log_{10} R_{ki}$ para as referências citadas anteriormente.

Observa-se na Figura 4 que as curvas $m^* \times \log R_{ki}$ obtidas para as ligações de Avakian (2007), Higaki (2014) e Oliveira (2015), tendem a se tornar horizontais à medida que m^* se aproxima de um. Assume-se como rígida, uma ligação cuja transmissão de momento fletor seja igual ou superior a 90% do momento fletor da ligação considerada como rígida convencional. Observa-se que isso ocorre para as ligações que apresentam uma rigidez considerada elevada, ou seja, com rigidez superior a $10^{7,40}$ kNcm/rad.

Pode-se observar nos gráficos $d^* \times \log 10 R_{ki}$ da Figura 4 que, à medida que a rigidez inicial aumenta, o deslocamento diminui, tendendo para o valor do deslocamento horizontal do pórtico com a ligação rígida convencional, ou seja, quando d^* tende à unidade. Observa-se que as ligações com rigidez inicial $R_{ki} \geq 10^{7,40}$ kNcm/rad estão agrupadas na região entre $1,0 \leq d^* \leq 1,1$, significando que os deslocamentos são inferiores a 110% do deslocamento considerando a ligação rígida convencional.

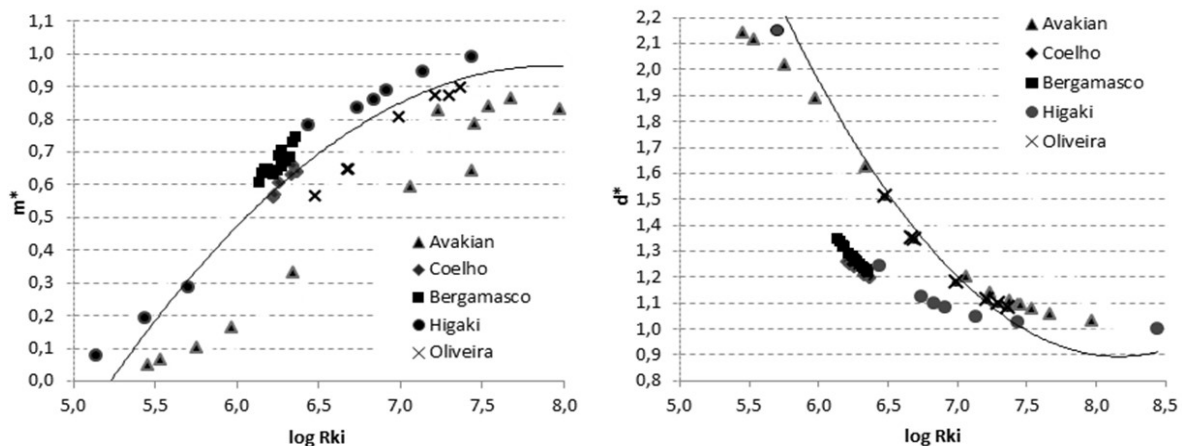


Figura 4. Gráficos de $m^* \times \log R_{ki}$ e de $d^* \times \log R_{ki}$ considerando as ligações de chapa de extremidade estendida e cantoneira de topo assento e cantoneira dupla na alma

Pode-se observar nos resultados obtidos para m^* para as ligações de Coelho *et al.* (2009) e Bergamasco (2012) que os valores obtidos estão muito abaixo da unidade, podendo considerar essas ligações como semirrígidas. A semirrígidez dessas ligações é confirmada pelo estudo dos deslocamentos d^* que apresentaram valores superiores a 1,1.

Portanto, na análise comparativa dos resultados de m^* e d^* e dos comportamentos das curvas $m^* \times \log R_{ki}$ e $d^* \times \log R_{ki}$, define-se uma rigidez rotacional inicial $R_{ki} = 10^{7,40}$ kNcm/rad como limite superior entre as ligações rígidas e semirrígidas. Este resultado leva a uma conclusão geral de que a rigidez inicial mínima R_{ki} para uma ligação rígida pode ser considerada como sendo igual a 25.000.000 kNcm/rad.

A rigidez inicial mínima de ligações semirrígidas (isto é, a rigidez inicial máxima das ligações rotuladas) é obtida a partir da comparação entre os resultados analisados do momento fletor solicitante nas ligações com cantoneiras simples na alma com o resultado do momento fletor solicitante considerando a ligação completamente rígida. Além disso, também é analisada a flecha no meio do vão da viga em comparação com a flecha considerando a ligação idealmente rotulada. Algumas ligações “fictícias” com rigidez inicial inferior à rigidez de ligação de Pinheiro e Silveira apud Silva (2010) também são analisadas e os resultados apresentados no gráfico $m^* \times \log R_{ki}$ e $d^* \times \log R_{ki}$.

Assumindo como rotulada uma ligação cuja transmissão de momento fletor seja igual ou inferior a 10% do momento fletor da ligação considerada como rígida convencional, a rigidez inicial mínima para ligações semirrígidas pode ser considerada igual a $10^{5,70}$ kNcm/rad, conforme os resultados de m^* apresentados na Fig. 5.

O gráfico $d^* \times \log R_{ki}$ apresentado da Figura 5 mostra os resultados da relação entre a flecha no meio do vão da viga do primeiro andar do pórtico (nó 13) considerando a rigidez rotacional inicial da ligação nas extremidades da viga e a flecha no mesmo nó considerando a ligação idealmente rotulada (d^*). Pode-se observar que, à medida que a rigidez inicial diminui, a flecha no meio do vão aumenta, tendendo para o valor da flecha quando a ligação é idealmente rotulada.

Assumindo como rotulada a ligação que produz uma flecha no meio do vão igual ou superior a 80% da flecha considerando as ligações idealmente rotuladas nas extremidades da viga, a rigidez inicial mínima para ligações semirrígidas igual a $10^{5,70}$ kNcm/rad é confirmada.

Portanto, na análise comparativa dos resultados de m^* e d^* e dos comportamentos das curvas $m^* \times \log R_{ki}$ e $d^* \times \log R_{ki}$, define-se a rigidez rotacional inicial R_{ki} igual a $10^{5,70}$ kNcm/rad, como limite inferior entre as ligações semirrígidas e rotuladas. Este resultado leva a uma conclusão geral de que a rigidez inicial máxima R_{ki} para uma ligação rotulada pode ser considerada como sendo 500.000 kNcm/rad.

A Tabela 2 apresenta os limites quanto à rigidez entre os comportamentos rígido, semirrígido e rotulado.

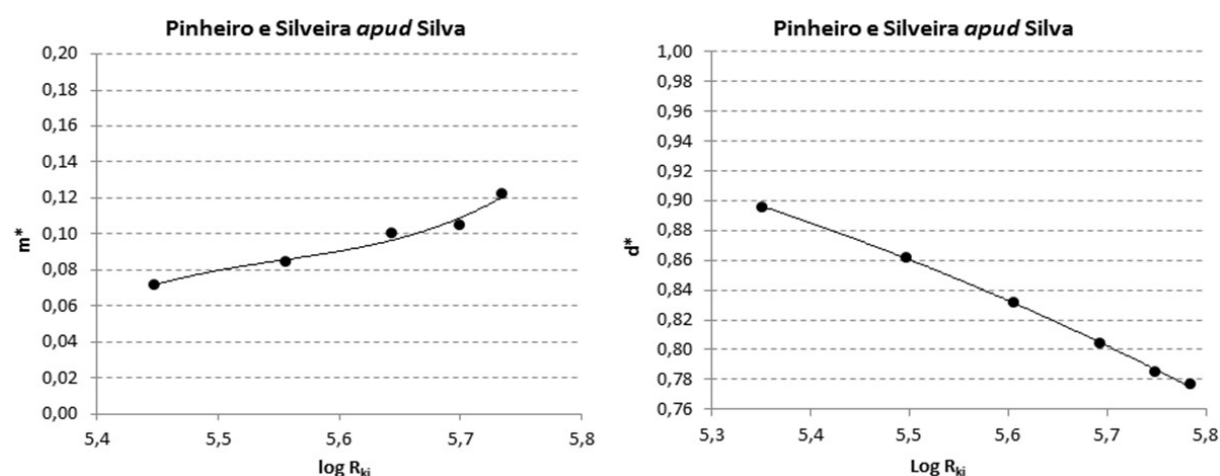


Figura 5. Gráficos de $m^* \times \log R_{ki}$ e de $d^* \times \log R_{ki}$ considerando as ligações com cantoneira simples

Tabela 2. Limites de classificação quanto à rigidez

Classificação	Limites (kNcm/rad)
Rígida	Rigidez inicial maior que $2,5 \times 10^7$
Semirrígida	Rigidez inicial igual ou entre $2,5 \times 10^7$ e 5×10^5
Rotulada	Rigidez inicial menor que 5×10^5

4.3.2 Classificação quanto à resistência

A classificação quanto à resistência é feita considerando o comportamento final dos pórticos semirrígidos, pelos resultados da carga última e do deslocamento lateral dos pórticos, obtidos da análise elasto-plástica em teoria de 2ª ordem. O comportamento não linear das ligações é adotado, isto é, tanto a rigidez inicial quanto capacidade de momento último M_u da ligação são considerados na análise.

Baseando-se em Goto *et al.* (1996), o limite de capacidade de momento último das ligações entre as regiões rígida e semirrígida é determinado, levando-se em consideração a carga última e o deslocamento lateral do pórtico, no estado limite último, conforme a Eq. (3), onde P_{ur} e P_{us} são as resistências últimas, respectivamente, dos pórticos rígidos e semirrígidos, e u_{ur} e u_{us} , são os deslocamentos finais das estruturas rígidas e semirrígidas, respectivamente:

$$\Delta_u = \sqrt{\left[\frac{(P_{ur} - P_{us})}{P_{ur}}\right]^2 + \left[\frac{(u_{ur} - u_{us})}{u_{ur}}\right]^2} \leq \sqrt{(0,05)^2 + (0,05)^2} \cong 0,07 \quad (3)$$

Para a determinação do valor limite da capacidade de momento último da ligação, o momento adimensional $\bar{m}_u$, definido pela relação entre o momento último da ligação e o momento de plastificação da viga, é adotado. As Tabelas 3 a 7 apresentam os valores da rigidez inicial, do momento resistente e $\bar{m}_u$ para as ligações dos autores estudados, bem como, os resultados numéricos obtidos pela análise elasto-plástica em teoria de 2ª ordem, da carga última P_u e do deslocamento lateral no topo do pórtico (nó 5). O valor de Δ_u e a classificação quanto a resistência da ligação conforme o limite definido pela Eq. (3) também são apresentados.

Analisando os resultados das Tabelas 3 a 7, pode-se observar que, com exceção das ligações FS1a e FS1b de Coelho *et al.* (2009), as ligações que possuem capacidade de momento último acima de 90% do momento de plastificação da viga, apresentaram valores de Δ_u menores que o limite de 0,07. Portanto, a ligação com chapa de extremidade com enrijecedores na alma de Avakian (2007) e as ligações FS2a, FS3a, FS4a, FS2b, FS3b, FS4b de Coelho *et al.* (2009) podem ser consideradas como ligações totalmente resistentes. As ligações nomeadas #19-φ16, #9,5-φ19, #25-φ19 e #31,5-φ19 de Bergamasco (2012) apresentaram valores de Δ_u menores que o limite de 0,07, mesmo apresentando capacidade de momento último inferiores a 70% do momento de plastificação da viga. Logo, essas ligações não tiveram influência na escolha do limite de resistência superior da curva de classificação.

Mediante aos resultados apresentados, o parâmetro igual a unidade é adotado como sendo o limite entre as ligações totalmente resistentes e parcialmente resistentes, ou seja, para a capacidade resistente da ligação igual a 100% do momento de plastificação da viga, define-se a fronteira entre estes dois comportamentos.

Tabela 3. Parâmetros e resultados numéricos das ligações de Higaki (2014)

Nome	R_{ki} (kNcm/rad)	M_u (kNcm)	$\bar{m}_u$	$P_u\%$	Desl. nó 5 (cm)	$\bar{m}_u$ (≤0,07)	Capacidade resistente
Chapa	5.488.620	12.000	0,37	55,08	7,96	0,487	Parcial
Rígido convenc.	-	-	-	55,58	5,35	-	

CILAMCE 2017

Tabela 4. Parâmetros e resultados numéricos das ligações de Coelho *et al.* (2009)

Nome	R_{ki} (kNcm/rad)	M_u (kNcm)	$\bar{m}_u$	$P_u\%$	Desl. nó 5 (cm)	$\bar{m}_u$ ($\leq 0,07$)	Capacidade resistente
FS1a	1.818.182	14.276	0,97	63,16	4,09	0,137	Parcial
FS2a	2.325.581	19.306	1,31	62,83	3,65	0,013	Total
FS3a	2.325.581	20.291	1,37	62,83	3,65	0,013	Total
FS4a	1.612.903	18.532	1,26	62,85	3,68	0,021	Total
FS1b	1680.672	16.117	1,09	63,09	4,00	0,112	Parcial
FS2b	2.200.220	19.731	1,34	62,84	3,66	0,017	Total
FS3b	2.150.538	21.435	1,45	62,84	3,66	0,017	Total
FS4b	1.709.402	18.767	1,27	62,85	3,68	0,021	Total
Rígido convenc.	-	-	-	62,80	3,60	-	

Tabela 5. Parâmetros e resultados numéricos das ligações de Bergamasco (2012)

Nome	R_{ki} (kNcm/rad)	M_u (kNcm)	$\bar{m}_u$	$P_u\%$	Desl. nó 5 (cm)	$\bar{m}_u$ ($\leq 0,07$)	Capacidade resistente
#9,5- ϕ 12,5	1.515.152	9.000	0,28	44,80	1,31	0,401	Parcial
#12,5- ϕ 12,5	1.764.706	9.600	0,30	46,20	1,47	0,320	Parcial
#16- ϕ 12,5	1.904.762	10.190	0,32	47,40	1,42	0,335	Parcial
#19- ϕ 12,5	2.000.000	10.600	0,33	48,40	1,50	0,294	Parcial
#22,5- ϕ 12,5	2.105.263	10.800	0,34	48,80	1,52	0,284	Parcial
#25- ϕ 12,5	2.222.222	11.000	0,34	49,20	1,51	0,290	Parcial
#9,5- ϕ 16	1.500.000	12.200	0,38	47,40	1,42	0,335	Parcial
#12,5- ϕ 16	1.666.667	13.900	0,43	50,90	1,90	0,101	Parcial
#16- ϕ 16	1.764.706	15.000	0,47	51,00	1,95	0,078	Parcial
#19- ϕ 16	1.875.000	16.400	0,51	51,10	1,99	0,056	Total
#22,5- ϕ 16	2.000.000	16.000	0,50	51,10	1,96	0,070	Parcial
#25- ϕ 16	2.142.857	15.600	0,49	51,10	1,96	0,071	Parcial
#31,5- ϕ 16	2.307.962	15.800	0,49	51,10	1,96	0,072	Parcial
#9,5- ϕ 19	1.379.310	15.050	0,47	50,70	1,99	0,059	Total
#12,5- ϕ 19	1.428.571	17.500	0,54	51,00	1,93	0,087	Parcial
#16- ϕ 19	1.538.462	18.600	0,58	51,10	1,96	0,071	Parcial
#19- ϕ 19	1.666.667	20.150	0,63	50,90	1,89	0,104	Parcial
#22,5- ϕ 19	1.818.182	22.180	0,69	51,10	1,95	0,076	Parcial
#25- ϕ 19	2.000.000	22.050	0,69	51,20	2,03	0,041	Total
#31,5- ϕ 19	2.222.222	20.250	0,63	51,20	2,02	0,046	Total
Rígido convenc.	-	-	-	51,27	2,11	-	

Tabela 6. Parâmetros e resultados numéricos das ligações de Avakian (2007)

Nome	R_{ki} (kNcm/rad)	M_u (kNcm)	$\bar{m}_u$	$P_u\%$	Desl. nó 5 (cm)	$\bar{m}_u$ ($\leq 0,07$)	Capacidade resistente
Com cantoneira	2.198.769	42.693	0,79	208,00	1,26	0,226	Parcial
Com chapa	27.410.833	49.340	0,92	225,50	1,02	0,043	Total
Rígido convenc.	-	-	-	232,60	1,05	-	

Tabela 7. Parâmetros e resultados numéricos das ligações de Oliveira (2015)

Nome	R_{ki} (kNcm/rad)	M_u (kNcm)	$\bar{m}_u$	$P_u\%$	Desl. nó 5 (cm)	$\bar{m}_u$ ($\leq 0,07$)	Capacidade resistente
# 6,35	3.038.623	3.906	0,12	94,22	141,14	55,992	Parcial
# 15,88	4.155.475	20.560	0,64	121,14	74,61	29,129	Parcial
# 25,40	4.559.498	30.170	0,94	136,88	27,09	9,938	Parcial
Rígido convenc.	-	-	-	138,56	2,48	-	

Analogamente, o limite de capacidade de momento último entre as regiões semirrígida e rotulada é determinado conforme a Eq. (4), onde P_{urot} e u_{urot} são a carga última e o deslocamento final, respectivamente, da estrutura com ligações idealmente rotuladas entre a viga e o pilar.

$$\Delta_u = \sqrt{\left[\frac{(P_{us} - P_{urot})}{P_{urot}}\right]^2 + \left[\frac{(u_{urot} - u_{us})}{u_{urot}}\right]^2} \leq \sqrt{(0,10)^2 + (0,10)^2} \cong 0,14 \quad (4)$$

A Tabela 8 apresenta os valores da rigidez inicial, do momento resistente e de $\bar{m}_u$ para a ligação de Pinheiro e Silveira *apud* Silva (2010) e de algumas ligações fictícias, e dos resultados numéricos, obtidos pela análise elastoplástica em teoria de 2ª ordem, da carga última P_u , do deslocamento lateral no topo do pórtico (nó 5), bem como os valores de Δ_u e a classificação da ligação quanto a resistência, definido conforme resultado da Eq. (4).

As ligações fictícias apresentam comportamento bilinear com a rigidez rotacional inicial igual a 500.000 kNcm/rad e momentos últimos variando de 5 a 20% do momento de plastificação da viga.

Analisando os resultados da Tabela 8, pode-se observar que, a ligação com cantoneira simples de Pinheiro e Silveira *apud* Silva (2010) situa-se na região rotulada, uma vez que o valor de Δ_u é inferior ao limite de 0,14. Analisando-se as ligações fictícias, observa-se que aquelas que apresentam momento último resistente igual ou inferior a 15% do momento de plastificação da viga situam-se na região rotulada, uma vez que Δ_u é menor que 0,14.

Diante desses resultados, assume-se como limite entre as ligações parcialmente resistentes e rotuladas o valor do parâmetro $\bar{m}_u$ igual a 0,15, ou seja, para a capacidade resistente da ligação igual a 15% do momento de plastificação da viga, define-se a fronteira

entre estes dois comportamentos. A Tabela 9 apresenta os limites quanto à resistência entre os comportamentos totalmente resistente, parcialmente resistente e rotulado.

Tabela 8. Parâmetros e resultados numéricos da ligação de Pinheiro e Silveira *apud* Silva (2010) e de ligações fictícias

Nome	R_{ki} (kNcm/rad)	M_u (kNcm)	$\bar{m}_u$	$P_u\%$	Desl. Nó 5 (cm)	$\bar{m}_u$ ($\leq 0,07$)	Capacidade resistente
Cantoneira simples	542.326	1.518	0,05	76,00	4,763	0,072	Rotulada
Ligação 1	500.000	3.120	0,10	78,50	5,088	0,087	Rotulada
Ligação 2	500.000	4.822	0,15	82,00	5,123	0,136	Rotulada
Ligação 3	500.000	6.280	0,20	84,80	5,108	0,174	Parcial
Rotulada ideal	-	-	-	72,30	5,015	-	

Tabela 9. Limites de classificação quanto à resistência

Classificação	Limites
Totalmente Resistente	$M_u \geq 100\%M_p$
Parcialmente Resistente	$100\%M_p > M_u > 15\%M_p$
Rotulada	$M_u \leq 15\%M_p$

4.4 Comparação entre os sistemas de classificação

Os limites do sistema de classificação não linear proposto são desenvolvidos utilizando-se a equação de três parâmetros. Os parâmetros de rigidez e de resistência definidos nas Tabelas 2 e 9 juntamente com o fator de forma tomado igual a 1 são inseridos na Eq. (1) para definir as fronteiras entre os comportamentos rígido, semirrígido e rotulado (flexível).

A Figura 6 apresenta os limites de classificação definidos pelo presente trabalho, os limites definidos por Bjorhovde *et al.* (1990) e pela norma EN 1993-1-8 (2005) para a ligação de Avakian (2007). A forma adimensionalizada é utilizada para a comparação entre os sistemas. Dessa forma, considera-se o comprimento real da viga para os sistemas não linear proposto e para o europeu e o comprimento de referência igual a 5d para o sistema de Bjorhovde *et al.* (1990).

De acordo com a Fig. 6 verifica-se que a fronteira entre a região rígida e semirrígida do sistema de classificação proposto é menos restritiva (menos limitante) do que o limite da norma EN 1993-1-8 (2005) e mais restritiva do que o limite de Bjorhovde *et al.* (1990), tanto em termos de rigidez quanto em termos da capacidade de momento das ligações. Percebe-se que a fronteira entre rígido e semirrígido do sistema de classificação de Bjorhovde *et al.* (1990) não é tão rigorosa como a fronteira estabelecida pela EN 1993-1-8 (2005) e pelo sistema não linear proposto. Isto porque, a capacidade de momento necessária por estes dois são maiores em comparação com a capacidade de momento estabelecida por Bjorhovde *et al.* (1990). A capacidade de momento das ligações

exigida por Bjorhovde é apenas 70% do momento de plastificação da viga ligada, enquanto a classificação da EN 1993-1-8 (2005) exige 100% desse momento fletor. Para o sistema de classificação proposto essa capacidade varia de forma não linear até 100% de M_p . Goto e Miyashita (1995) afirmam que devido a esta redução da capacidade de momento resistente, o limite especificado por Bjorhovde *et al.* (1995) pode não ser suficiente para assegurar o comportamento de pórticos rígidos em alguns casos.

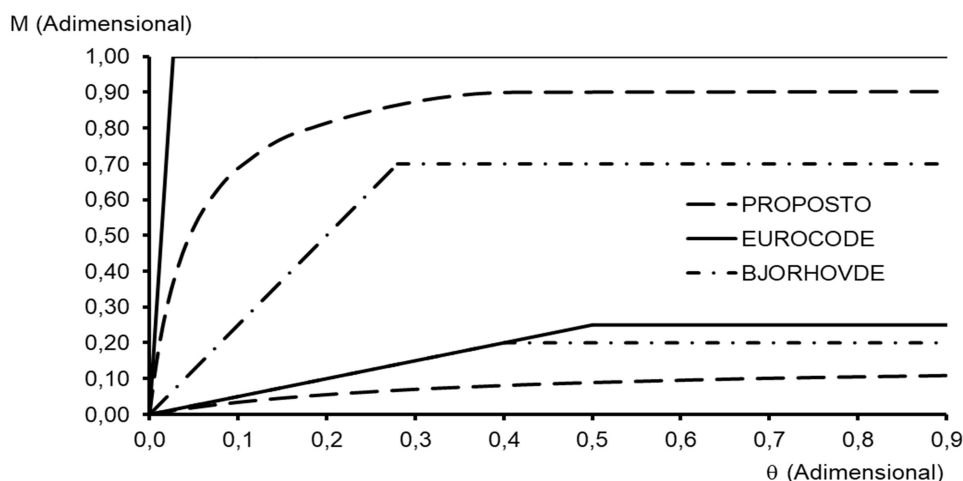


Figura 6. Sistemas de classificação adimensionais segundo Bjorhovde *et al.* (1990), EN 1993-1-8 (2005) e o sistema não linear proposto

A fronteira entre a região semirrígida e a rotulada do sistema de classificação proposto é a mais restritiva quando comparada com a fronteira dos sistemas de classificação europeu e de Bjorhovde *et al.* (1990). O limite de capacidade de momento das ligações exigida pela EN 1993-1-8 (2005) é de 25% do momento de plastificação da viga ligada. Pelo sistema de classificação de Bjorhovde esse limite é considerado igual a 20% de M_p . Para o sistema de classificação proposto essa capacidade varia de forma não linear até o valor de 15% do momento plástico da viga.

5 EXEMPLO NUMÉRICO

O pórtico de dois andares e um vão com bases engastadas é mostrado na Fig. 7, juntamente com o carregamento e as dimensões de barras. As vigas e os pilares são constituídos, respectivamente, pelos perfis W360x72 e W310x143. O carregamento é constituído por cargas verticais concentradas P , aplicadas nos pilares e por duas cargas horizontais, de $0,002P$ aplicada ao primeiro andar e outra de $0,001P$ aplicada ao segundo andar. O módulo de elasticidade longitudinal e a resistência ao escoamento do aço são iguais a 200.000 MPa e 235 MPa, respectivamente, com comportamento elastoplástico perfeito. As tensões residuais máximas nas vigas e nos pilares, com comportamento linear nas mesas e na alma do perfil, foram consideradas iguais a 50% e 30%, da tensão de escoamento, respectivamente.

Para considerar o comportamento não linear das ligações, quatro tipos de ligações são considerados, com curvas momento-rotacão relativas obtidas pelo modelo exponencial: uma ligação com cantoneira simples na alma, uma ligação com cantoneiras de topo e assento, uma

ligação com chapa de extremidade ajustada, e uma ligação com chapa de extremidade estendida nomeados, respectivamente, por A, B, C e D. Os comportamentos momento $\times$ rotação relativa de cada ligação, foram aproximados por curvas multilíneas, considerando-se cinco trechos lineares, conforme mostra a Fig. 8. Os dados da rigidez rotacional inicial K_i e do momento resistente M_u das ligações foram apresentados por Pinheiro e Silveira (2005) e por Lavall *et al.* (2012). Os autores limitaram a capacidade rotacional dessas ligações a 0,06 rad.

O sistema de classificação não linear proposto também é mostrado na Fig. 8. Conforme os limites estabelecidos, as ligações B, C e D são classificadas como semirrígidas em termos de rigidez e parcialmente resistentes ao momento fletor, em termos de resistência. A ligação A é classificada como rotulada.

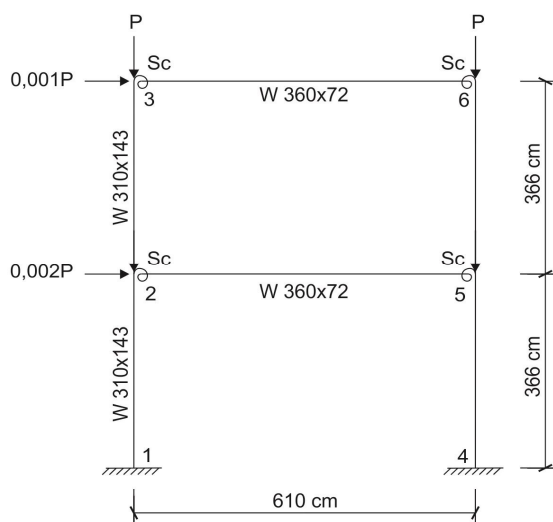


Figura 7. Pórtico de dois andares e um vão

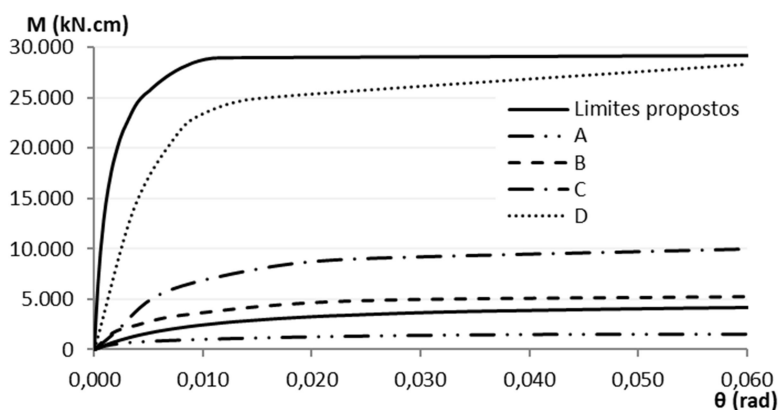


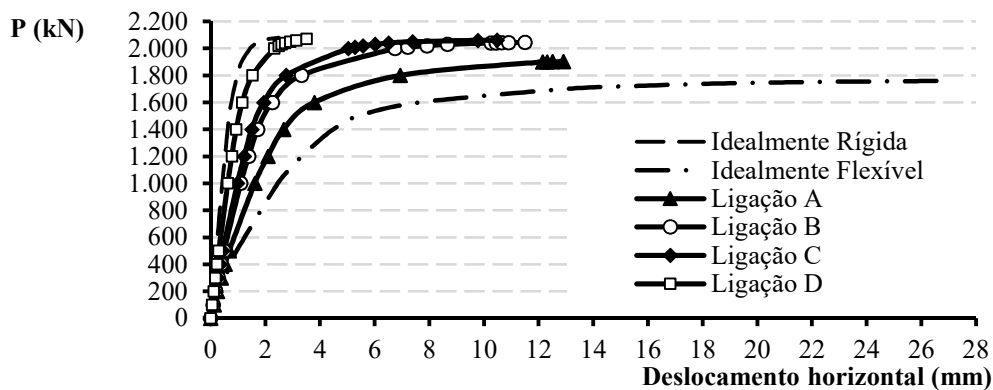
Figura 8. Curvas momento fletor $\times$ rotação relativa, multilíneas – Ligações A, B, C e D

A Tabela 10 mostra os valores numéricos da carga última e do deslocamento horizontal no topo do pórtico.

Tabela 10. Carga última e deslocamento horizontal no topo do pórtico considerando as ligações convencionais e as ligações semirrígidas

Ligação	P_u (kN)	Desloc. Horizontal nó 6 (mm)
Rotulada	1.759,0	27,10
Ligação A	1.903,0	12,91
Ligação B	2.044,0	11,50
Ligação C	2.061,0	10,48
Ligação D	2.084,0	5,57
Rígida	2.080,0	2,49

A Figura 9 mostra o gráfico carga-deslocamento até o colapso considerando as ligações A, B, C e D e as ligações convencionais. Os resultados obtidos estão de acordo com o comportamento das ligações onde se observa o aumento de resistência dos pórticos e uma diminuição dos deslocamentos à medida que se aumenta a rigidez e a resistência das ligações.

**Figura 9. Deslocamento horizontal no topo (nó 6) (mm)**

A Figura 10 mostra os percentuais de plastificação nas extremidades dos pilares para a carga de colapso dos pórticos. Observa-se que no topo e na base dos pilares do primeiro andar, tem-se um alto nível de plastificação, com percentual aumentando à medida que as ligações se tornam mais rígidas. Os pórticos falham por instabilidade inelástica apresentando um deslocamento excessivo no topo do segundo andar. Pode-se perceber ainda que a distribuição da plasticidade nos pilares é bem semelhante nos pórticos com ligações rígidas convencionais e com ligações com placas de extremidade estendidas (ligação D), como já era esperado, uma vez que a ligação semirrígida D possui valores, de rigidez rotacional inicial e de momento fletor resistente, próximos ao limite superior. Observa-se que a carga última do pórtico com a ligação com placa de extremidade estendida é praticamente igual à carga última do pórtico com ligação rígida convencional.

Comparando a plastificação nas extremidades das barras dos pórticos com a ligação A e com a ligação idealmente rotulada, observa-se uma distinção nos percentuais de plastificação, como esperado, uma vez que a ligação com cantoneira simples na alma permite uma pequena restrição ao movimento relativo entre os elementos conectados e uma pequena transmissão de momento fletor, conferindo ao pórtico uma rigidez e resistência maior quando comparado ao pórtico com ligação rotulada convencional. A carga última do pórtico com a ligação com

cantoneira simples na alma aumenta 8,1% em relação a carga última do pórtico com ligação rotulada convencional.

Os pórticos com ligações com cantoneiras de topo e assento (ligação B) e com placas de extremidade ajustadas (ligação C) apresentam um comportamento de plastificação intermediário aos pórticos com ligações A e D. Verifica-se, portanto, uma redução da plastificação nas extremidades dos pilares quando a carga última vai diminuindo, tendo em vista o comportamento da ligação adotado.

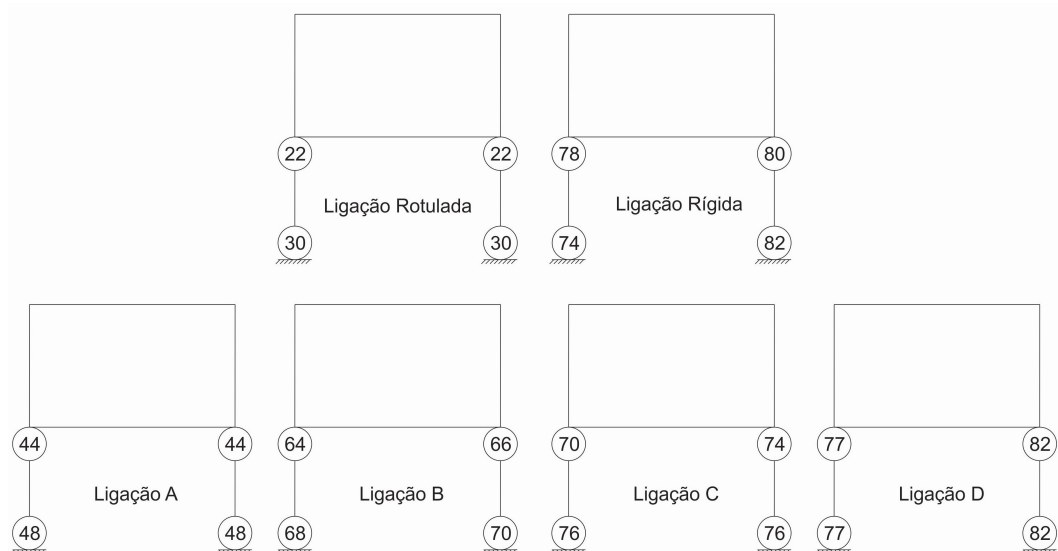


Figura 10. Percentuais de plastificação nas barras do pórtico

O exemplo apresentado mostrou que a mudança no comportamento das ligações provoca alterações nos valores da resistência dos pórticos, nos deslocamentos laterais e na propagação da plastificação ao longo das barras das estruturas, confirmando a validade do sistema de classificação proposto.

6 CONCLUSÃO

Para o desenvolvimento do sistema de classificação coletou-se uma grande variedade de ligações usuais no cenário brasileiro e apresentou-se os procedimentos para determinar os limites entre os comportamentos rígido, semirrígido e rotulado. Os limites de classificação em termos de rigidez foram estabelecidos levando-se em conta os comportamentos das estruturas nos estados limites últimos e de serviço e os limites de classificação em termos de resistência levando-se em conta o estado limite último.

Para o estudo dos limites de rigidez foi considerada a rigidez inicial das ligações na análise elástica em 2ª ordem. Na análise comparativa dos resultados de m^* e d^* definiu-se uma rigidez rotacional inicial R_{ki} igual a 25.000.000 kNcm/rad como limite superior entre as ligações rígidas e semirrígidas. Para o limite inferior entre as ligações semirrígidas e rotuladas foi definido uma rigidez rotacional inicial R_{ki} igual a 500.000 kNcm/rad. A classificação quanto à resistência foi feita considerando o comportamento final dos pórticos semirrígidos, pelos resultados da carga última e do deslocamento lateral dos pórticos obtidos da análise

elastoplástica em 2ª ordem. O comportamento não linear das ligações foi adotado na análise. O parâmetro de $\bar{m}_u$ igual à unidade foi considerado como sendo o limite entre as regiões rígida e semirrígida e igual a 0,15 como sendo o limite entre as regiões semirrígida e rotulada. Os limites de rigidez e de resistência foram inseridos na equação de três parâmetros para definir as curvas nas fronteiras das regiões rígida, semirrígida e rotulada.

Na análise comparativa entre os sistemas de classificação proposto, de Bjorhovde *et al.* (1990) e da norma EN 1993-1-8 (2005) verificou-se que a fronteira entre a região rígida e semirrígida do sistema de classificação proposto foi menos restritiva (menos limitante) do que o limite da EN 1993-1-8 (2005) e mais restritiva do que o limite de Bjorhovde *et al.* (1990), tanto em termos de rigidez quanto em termos da capacidade de momento das ligações. Conclui-se, portanto, que a fronteira entre rígido e semirrígido do sistema de classificação de Bjorhovde *et al.* (1990) não é tão rigorosa como a fronteira estabelecida pela EN 1993-1-8 (2005) e pelo sistema de classificação não linear proposto. A fronteira entre a região semirrígida e a rotulada do sistema de classificação proposto é a mais restritiva quando comparada com a fronteira dos sistemas de classificação europeu e de Bjorhovde *et al.* (1990).

Na análise do comportamento global elastoplástico do pórtico de dois andares e um vão foi mostrado a influência do comportamento das ligações nos deslocamentos horizontais, na resistência última e na propagação da plastificação ao longo das barras das estruturas. Conforme os limites estabelecidos pelo sistema proposto, a ligação com cantoneiras de topo e assento, a ligação com placa de extremidade ajustada, e a ligação com placa de topo estendida foram classificadas como semirrígidas em termos de rigidez e parcialmente resistentes em termos de resistência. A ligação com cantoneira simples na alma foi classificada como rotulada. Conclui-se que, a consideração da flexibilidade das ligações nas análises estruturais representa um dos fatores que mais afetam a resistência e a estabilidade global dos pórticos, conduzindo a resultados mais consistentes e confiáveis, aproximando daqueles que realmente poderão ocorrer na estrutura.

O conhecimento adequado do comportamento das ligações também permite adotar de forma consciente e segura, os procedimentos simplificados de análise com hipóteses de comportamento idealizado. O comportamento dessas ligações pode ser identificado inicialmente pelo sistema de classificação consistente apresentado.

Os resultados obtidos na análise numérica confirmaram a validade do sistema de classificação não adimensional desenvolvido. O sistema mostrou ser mais simples e mais preciso que os outros sistemas de classificação existentes. Este novo procedimento de classificação é também aplicável a outros tipos de ligações semirrígidas e independe do tipo de estrutura (contraventada ou não) para classificar a ligação.

Agradecimentos

Os autores são gratos ao CEFET-MG pelo apoio recebido para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

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

- Avakian, A. C. 2007. *Estruturas aporticadas mistas aço-concreto: avaliação de metodologias de análise*. Dissertação de Mestrado. UFRJ/Rio de Janeiro
- Bergamasco, P. D. A. 2012 *Estudo do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo estendida: Análise Numérica*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP/São Carlos.
- Bjorhovde, R.; Colson, A.; Brozzetti, J. 1990. Classification system for beam to column connections. *Journal of Structural Engineering*, v. 116, n. 11, p. 3059-3077.
- Chen, W. F.; Goto, Y. , Liew, J. Y. R. 1996. Stability Design of Semi-Rigid Frames. *John Wiley e Sons, Inc.*, New York.
- Coelho, A. M. G.; Bijaard, F.; Silva, L. S. 2009. Análise experimental da ductilidade de ligações metálicas viga-pilar com placa de extremidade. *V Congresso de Construção Metálica e Mista*, Porto, p. 593-604.
- EN 1993-1-8. *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.8: Design of joints*. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- Goto, Y.; Miyashita, S. 1996 New classification system for semi-rigid connections considering overall behavior of frames. *Revista IABSE*, Relatórios IPC, v. 75, p. 94-104.
- Hasan, R.; Kishi, N.; Chen, W. 1998. A new nonlinear connection classification system. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 47, p. 119-140.
- Higaky, B. E. 2014 *Contribuição à análise estrutural de edifícios em aço com ênfase nas ligações semirrígidas*, Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP/São Carlos.
- Lavall, A. C. C. 1996. *Uma formulação teórica consistente para a análise não linear de pórticos planos pelo método dos elementos finitos considerando barras com imperfeições iniciais e tensões residuais nas seções transversais*. 1996. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP/São Carlos.
- Lavall, A. C. C.; Silva, R. G. L.; Oliveira, D. G. C.; Fakury, R. H. 2012. Análise de pórticos planos de aço considerando as ligações semirrígidas viga-pilar. *XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural*, Rio de Janeiro, 19 a 21 Set. 14 p.
- Oliveira, L. 2015 *Análise de pórticos de aço com ligações viga-pilar e de base de pilar semirrígidas a partir do método dos componentes*. 2015. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, UFMG/BHte.
- Pinheiro, L. ; Silveira, R. A. M. 2005. Computational procedures for nonlinear analysis of frames with semi-rigid connections. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 2, p. 339-367.
- Silva, R. G. L.; Lavall, A. C. C. 2009. Análise inelástica de pórticos de aço parcialmente restringidos. *XXX CILAMCE – Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, Búzios, vol.1, pp. 1-20.
- Silva, R. G. L. 2010 *Análise inelástica avançada de pórticos planos de aço considerando as influências do cisalhamento e de ligações semirrígidas*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, UFMG/BHte.