



DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS LIGAÇÕES VIGA-PILAR COM CHAPAS DE EXTREMIDADE ESTENDIDA PELO MÉTODO DOS COMPONENTES

Frederico Tadeu Castro Mendes

Renata G. Lanna da Silva

Cláudio José Martins

fredtcm@gmail.com

rglanna.silva@gmail.com

cjmartins@civil.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Armando Cesar Campos Lavall

Leandro Albuquerque R. Oliveira

Rodrigo Sernizon Costa

lavall@dees.ufmg.br

leandroalbuquerque.oliveira@gmail.com

rsernizon@hotmail.com

Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo. *As ligações entre vigas e pilares têm grande influência no comportamento global das estruturas, seja com relação à rigidez, à resistência ou à estabilidade. A incorporação dessas ligações na análise estrutural exige uma representação de curvas momento-rotação relativa, capaz de descrever o seu comportamento mediante a ação de esforços solicitantes. Este trabalho apresenta o estudo do comportamento semirrígido de ligações viga-pilar, a partir do modelo mecânico via Método dos Componentes, presente no EN 1993 1-8: 2005, visando à determinação da curva momento $\times$ rotação relativa em função dos parâmetros de rigidez, resistência e capacidade rotacional de ligações parafusadas com chapa de extremidade estendida e enrijecedores transversais na alma do pilar. Uma análise numérica de um pórtico plano com ligação semirrígida, variando-se a espessura da chapa, é analisada, visando avaliar a influência das ligações no comportamento da estrutura. Conclui-se que, embora seja comum considerar as ligações com chapas de extremidade estendida como rígidas, o seu comportamento pode ser bem diferente do comportamento idealizado.*

Palavras-chave: *Estruturas de aço; Ligação semirrígida; Método dos componentes.*

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

Com a demanda cada vez maior por edificações, galpões, obras de arte e plantas industriais com maiores vãos e elementos esbeltos, a estrutura de aço tem se tornado uma ótima opção para a construção, devido à rapidez na execução, fabricação, montagem e à elevada resistência do material.

O desenvolvimento de métodos de análise, visando obter resultados mais realistas e menos conservadores e a evolução no conhecimento do comportamento das estruturas, tem conduzido ao aprimoramento das considerações quanto ao comportamento das ligações nas estruturas de aço.

Embora a consideração das hipóteses do comportamento rígido ou rotulado da ligação simplifique consideravelmente a análise e o dimensionamento de uma estrutura, a validade dessas hipóteses pode ser questionada em muitos casos. A realidade, é que, devido à impossibilidade prática de se projetar ligações ideais, as ligações apresentam um comportamento não linear intermediário. Assim sendo, mesmo as ligações consideradas rígidas, podem permitir rotação relativa entre os elementos conectados, bem como as ligações consideradas rotuladas podem permitir transmissão de esforços entre os elementos conectados.

O comportamento global das estruturas de aço depende 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. No intuito de obter um estudo adequado das ligações, compreender a distribuição dos esforços na estrutura e um dimensionamento mais econômico, sem perder a segurança, torna-se necessário o estudo mais detalhado das ligações semirrígidas.

O estudo do comportamento de ligações viga-pilar, a partir do modelo mecânico via Método dos Componentes, presente no EN 1993 1 8: 2005 é apresentado, visando à determinação da curva momento x rotação relativa em função dos parâmetros de rigidez, resistência e capacidade rotacional de ligações parafusadas com chapa de extremidade estendida e enrijecedores transversais na alma do pilar. Inicialmente, uma comparação é realizada entre as curvas momento versus rotação relativa do modelo numérico obtido por Maggi (2000) e do modelo experimental realizado por Ribeiro (1998) com a curva do modelo mecânico pelo método dos componentes para uma ligação com chapa de extremidade estendida com espessura de 19 mm.

Posteriormente, é realizada a análise do comportamento global de um pórtico plano com esse tipo de ligação, variando-se a espessura da chapa de extremidade, modelado a partir do método dos componentes. O comportamento das ligações semirrígidas e sua influência na distribuição dos esforços solicitantes nos elementos, nos deslocamentos nodais e na estabilidade global da estrutura são avaliados.

2 COMPORTAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES

Compreender o comportamento das ligações é importante para a sua consideração na análise e dimensionamento da estrutura. As ligações são responsáveis pela transmissão dos

esforços entre vigas e pilares, quais sejam: forças normais, forças cortantes, momentos fletores e de torção. No entanto, em vários casos práticos, as deformações causadas por forças normais e cortantes são desconsideradas devido sua baixa magnitude em relação a deformação rotacional. Em se tratando de pórticos planos, a deformação devido a momento torçor também pode ser desconsiderada. Já o efeito causado pelo momento fletor (M) altera o ângulo formado entre a viga e o pilar, chamado de rotação relativa $\theta_r = \theta_{viga} - \theta_{pilar}$, conforme Fig. 1.

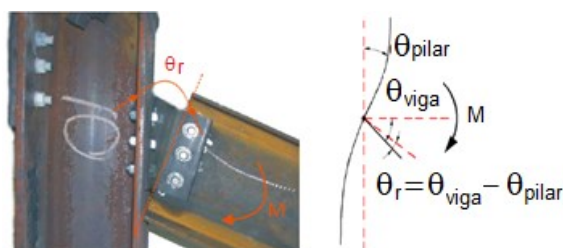


Figura 1. Rotação relativa θ_r devido ao momento fletor (M) (Burgess et al. apud Oliveira, L., 2015)

O comportamento das ligações pode ser descrito pela relação momento x rotação relativa, que considera a relação entre o momento fletor que solicita a ligação e a rotação relativa entre os elementos conectados. A Fig. 2 ilustra curvas momento x rotação relativa para alguns tipos de ligação. Pode se observar que todos os tipos de ligações possuem comportamento não linear situado entre dois extremos: perfeitamente rígido e rotulado. Uma curva correspondente a uma ligação idealmente rígida seria dada por um segmento reto coincidente com o eixo vertical e uma curva que representa ligação idealmente rotulada seria dada por um segmento reto coincidente com o eixo horizontal.

As ligações soldadas são geralmente classificadas como rígidas, pois apresentam pequena rotação relativa, alta resistência, apesar de pouca capacidade rotacional. Em contrapartida, as ligações com cantoneiras simples na alma apresentam grandes rotações relativas, baixa resistência à flexão e adequada capacidade rotacional (Silva, 2010).

À medida que a curva momento x rotação se aproxima do eixo vertical a ligação torna-se mais rígida e capaz de transmitir maiores momentos. Entretanto, quanto mais a curva se aproximar do eixo horizontal, maior será sua rotação para valores baixos de momento.

Uma ligação metálica pode apresentar diversos comportamentos rotacionais, simplesmente alterando os parâmetros de resistência ao momento fletor e rigidez, tais como: espessura da chapa de extremidade, a disposição e o diâmetro dos parafusos.

A incorporação do comportamento das ligações na análise estrutural exige uma representação matemática das curvas momento x rotação relativa, que pode ser realizada por meio dos seguintes modelos: analítico, experimental, mecânico e numérico. Neste trabalho, é apresentado, o modelo mecânico a partir do método dos componentes, visando à obtenção do comportamento $M-\theta_r$ da ligação e sua incorporação na análise numérica de um pórtico plano.

Para considerar o mais próximo da realidade o comportamento das ligações no projeto estrutural, essas ligações são divididas em diferentes categorias, por meio do desenvolvimento dos sistemas de classificação, estabelecendo limites e intervalos baseados em parâmetros que representam as características da ligação em termos de resistência, rigidez e capacidade de rotação. Buonicontro (2017) propôs um sistema de classificação de ligações viga-pilar

dimensional e não linear. O sistema classifica a ligação quanto à rigidez em rígida, semirrígida e rotulada e quanto à resistência em totalmente resistente, parcialmente resistente e rotulada. Os limites para a classificação em termos de rigidez e de resistência são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

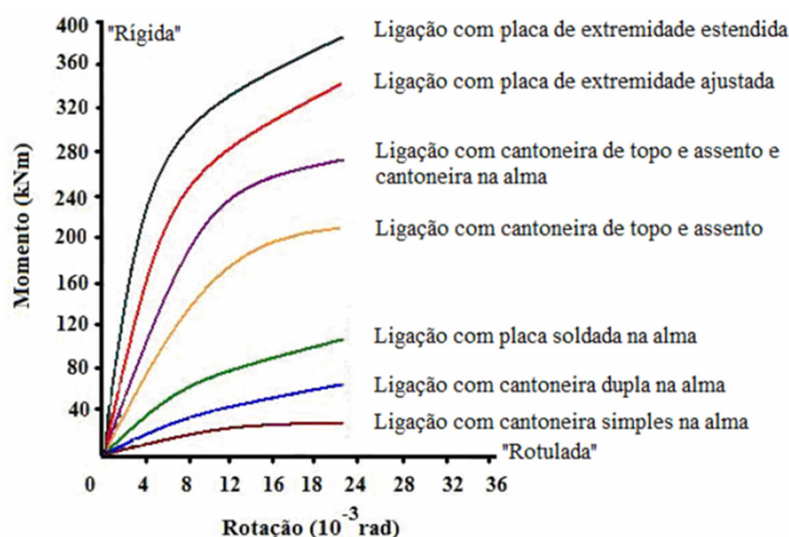


Figura 2. Curvas Momento x Rotação para diversos tipos de ligações (Silva, 2010)

Tabela 1. Limites de classificação quanto à rigidez de Buonicontro (2017)

Classificação	Limites de Rigidez inicial k_i (kNcm/rad)
Rígida	$k_i \geq 2,5 \times 10^7$
Semirrígida	$5,0 \times 10^5 \leq k_i \leq 2,5 \times 10^7$
Rotulada	$k_i \leq 5,0 \times 10^5$

Tabela 2. Limites de classificação quanto à resistência de Buonicontro (2017)

Classificação	Limites de resistência M_u
Totalmente resistente	$M_u \geq 100\% M_p$
Parcialmente resistente	$15\% M_p \leq M_u \leq 100\% M_p$
Rotulada	$M_u \leq 15\% M_p$

O modelo matemático dado pela Eq. 1 é usado para descrever as fronteiras entre os comportamentos rígido, semirrígido e rotulado, conforme os valores da rigidez inicial k_i e do momento último M_u apresentados nas tabelas 1 e 2:

$$M = \frac{k_i \theta_r}{1 + \left(\frac{\theta_r}{\theta_0} \right)} \quad (1)$$

Onde, θ_0 é a rotação plástica de referência e igual a M_u/k_i .

3 PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO E ANÁLISE DAS LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS PELO MÉTODO DOS COMPONENTES

O método dos componentes é um modelo mecânico que consiste em identificar os componentes ativos da ligação, conforme Fig. 3 e Tabela 3, estabelecer relações de força versus deslocamento para cada um desses componentes e, por último, realizar a associação dos componentes para obtenção da curva momento x rotação da ligação, de acordo com a Fig. 4. O método dos componentes é o modelo mecânico utilizado para o dimensionamento de ligações estruturais em aço presente no EN 1993-1-8: 2005, no qual os componentes são representados por molas translacionais, com comportamento linear ou não linear, formando sistemas que são tratados como estruturas para simular o comportamento momento x rotação das ligações. A Tabela 3 apresenta os componentes mais usuais aplicáveis às ligações viga-pilar com chapa de extremidade estendida.

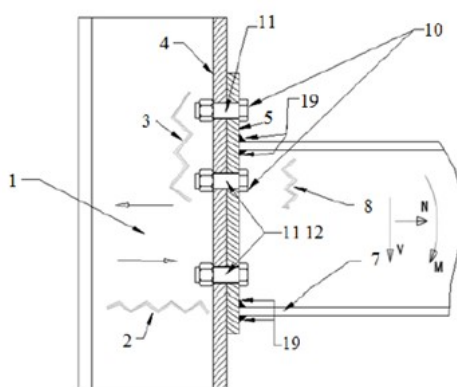


Figura 3. Componentes ativos da ligação viga-pilar – chapa de extremidade (adaptada de Oliveira, C., 2011)

Tabela 3. Componentes básico de ligações – chapa de extremidade

Item	Componentes
1	Alma do pilar solicitada ao cisalhamento
2	Alma do pilar solicitada à compressão
3	Alma do pilar solicitada à tração
4	Mesa do pilar sujeita à flexão
5	Chapa de extremidade sujeita à flexão
7	Mesa e Alma da viga solicitadas à compressão
8	Alma da viga solicitada à tração
10	Parafusos tracionados
11	Parafusos ao corte
12	Pressão de contato em furos
19	Solda

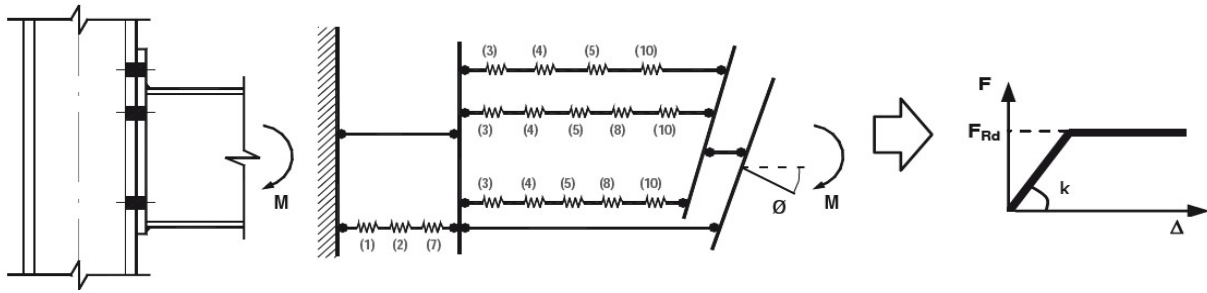


Figura 4. Associação dos componentes básicos (Oliveira, C., 2011)

3.1 Momento resistente

O momento resistente $M_{j,Rd}$ de uma ligação viga-pilar é avaliado por meio do equilíbrio dos esforços das três regiões da ligação: tração, compressão e cisalhamento. Para obter a resistência potencial da região tracionada da ligação com chapa de extremidade estendida, deve-se avaliar a resistência das linhas de parafusos atuantes, onde h_r é a distância da fiada de parafuso r ao centro de compressão, que neste exemplo de ligação, conforme mostra a Fig. 5, encontra-se na metade da espessura da mesa inferior da viga. $F_{tr,Rd}$ é a força resistente a tração solicitada em cada linha de parafuso e $F_{c,Rd}$ é a força resistente a compressão.

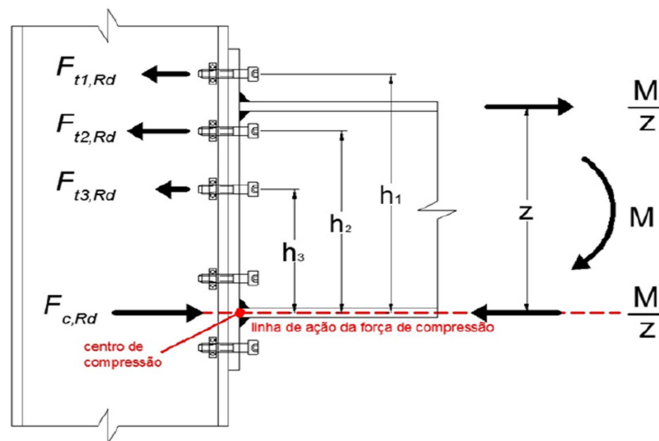


Figura 5. Esforços na ligação (Oliveira, L., 2015)

3.2 Rigidez inicial

A rigidez rotacional de uma ligação S_j é constituída pela combinação de parâmetros de rigidez k_i , associado as rigidezes translacionais dos componentes básicos envolvidos na ligação. Para determinar a rigidez rotacional S_j da ligação viga-pilar com várias linhas de parafusos tracionados é preciso seguir os seguintes passos:

- Associar em série todas as rigidezes dos componentes relativos a cada linha de parafusos r para obter a rigidez efetiva k_{eff} , conforme Eq. (2):

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}} \quad (2)$$

- Associar em paralelo os parâmetros de rigidez efetiva de cada linha de parafusos r , tomando por base que a rotação ocorre de forma rígida e no centro da mesa inferior da viga, conforme a Eq. (3):

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r}{Z_{eq}} \quad (3)$$

Onde h_r é a distância de cada linha de parafuso ao centro de compressão e Z_{eq} é o braço de alavanca equivalente associado ao coeficiente de rigidez k_{eq} , conforme a Eq. (4).

$$Z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} h_r} \quad (4)$$

- Determinar a rigidez rotacional por meio da combinação do parâmetro de rigidez equivalente da região de tração, compressão e cisalhamento (Eq. (5)):

$$S_j = \frac{EZ^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (5)$$

Onde a taxa de rigidez μ depende do momento aplicado $M_{j,Ed}$ e do momento resistente $M_{j,Rd}$. Se o momento aplicado for inferior a 2/3 do momento resistente, a ligação comporta-se na fase elástica, $\mu = 1,0$ e a rigidez será a inicial, $S_{j,ini}$. Caso o momento solicitado seja maior que 2/3 do momento resistente, a rigidez da ligação é afetada pelos efeitos da plastificação e μ atenderá pelo resultado da Eq. (6), sendo que o coeficiente Ψ para ligações com chapa estendida parafusada é igual a 2,7.

$$\mu = \left(\frac{1,5 M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \right)^{\Psi} \quad (6)$$

3.3 Capacidade de rotação

A avaliação da capacidade de rotação da ligação é fundamental para o projeto estrutural, pois todas as ligações necessitam de uma capacidade mínima de rotação. Os esforços precisam ser absorvidos e redistribuídos pela estrutura como um todo, evitando um colapso parcial ou completo. Segundo ANSI/AISC (2010), na ausência de uma análise mais precisa, a norma considera uma rotação de $\theta = 0,03$ rad adequada.

3.4 Curvas momento-rotação da ligação segundo os critérios da EN 1993-1-8:2005 e estudo de caso

Esta seção tem como objetivo comparar as curvas momento x rotação da ligação com chapa de extremidade estendida obtidas pelos modelos experimental e numérico, com as curvas obtidas pelo modelo mecânico da norma europeia.

A ligação viga-pilar com chapa de extremidade estendida analisada foi retirada do trabalho de Maggi (2000). O autor mencionado simulou numericamente o modelo denominado CT1B-6, que havia sido experimentado em laboratório por Ribeiro (1998). Ambos os autores desenvolveram a curva momento x rotação relativa para representar o comportamento da ligação.

Características da ligação

A ligação parafusada com chapa de extremidade estendida é enrijecida transversalmente na mesa superior e inferior da viga, conforme mostra a Fig. 6. Os perfis soldados utilizados para o pilar e a viga possuem resistência ao escoamento do aço igual a 25kN/cm^2 e são constituídos pelos perfis CVS 350 x 105,0 e VS 250 x 37,0, respectivamente. Os parafusos empregados na ligação são de aço ASTM-A325 com diâmetro de 19 mm. A chapa de extremidade possui espessura de 19 mm e resistência ao escoamento igual a $27,6\text{ kN/cm}^2$.

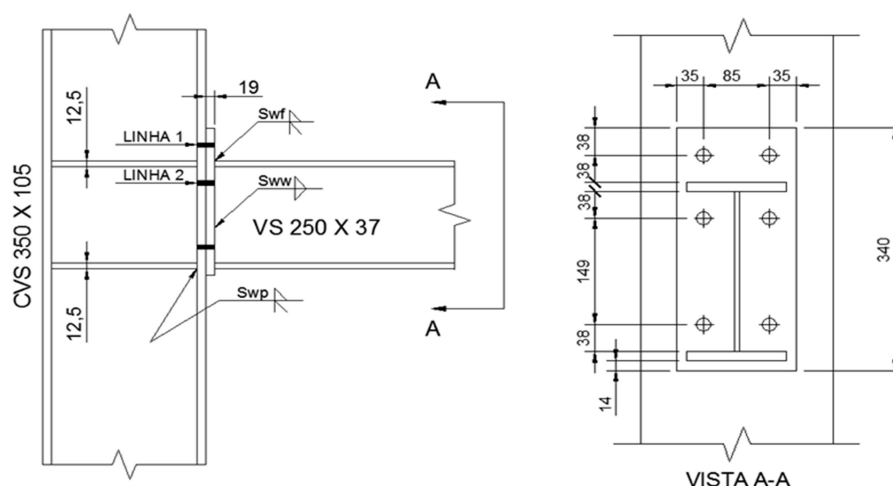


Figura 6. Características geométricas da ligação (mm) – chapa 19mm

Resultados da ligação via método dos componentes

Os resultados da força resistente e da rigidez translacional dos componentes ativos da ligação obtidos pelo método dos componentes são apresentados na Tabela 4. A Tabela 5 e Tabela 6 apresentam os parâmetros para a construção da curva $M-\theta_r$, para o comportamento elástico e elastoplástico da ligação, respectivamente. Os valores apresentados entre parênteses são os resultados obtidos sem considerar a influência dos coeficientes de segurança γ_{Mo} , γ_{M1} e γ_{M2} .

A chapa de extremidade à flexão é o componente que limita a resistência da ligação, com modo de falha 2, onde há plastificação da chapa de extremidade e a ruptura dos parafusos. O modo de falha 1 ocorre quando há apenas plastificação da chapa e o modo de falha 3 ocorre quando há apenas a ruptura dos parafusos.

Tabela 4. Resultados da ligação – chapa 19mm

Item	Componentes	Força resistente (kN)	Rigidez (cm)
1	Alma do pilar ao cisalhamento cisalhamento	549,44 (549,44)	∞
2	Alma do pilar à compressão	1.004,77 (1.004,77)	∞
3	Alma do pilar à tração – linha 1	439,34 (439,34)	0,48
3	Alma do pilar à tração – linha 2	525,67 (525,67)	0,58
4	Mesa do pilar à flexão – linha 1	236,94 (236,94)	3,27
4	Mesa do pilar à flexão – linha 2	253,04 (283,50)	3,91
5	Chapa de extremidade à flexão – linha 1	187,17 (220,56)	1,22
5	Chapa de extremidade à flexão – linha 2	253,04 (302,53)	2,86
7	Alma e mesa da viga à compressão	490,18 (490,18)	∞
8	Alma da viga à tração	323,35 (323,35)	∞
10	Parafuso à tração	126,52 (158,15)	0,90

Tabela 5. Dados da curva $M_x\theta_r$ – análise elástica

Momento Fletor (kNxcn)	Rigidez Rotacional (kNxcn/rad)	Rotação (rad)
$M_{j,Rd} = 10.165,71 (11.427,14)$	$S_{j,ini}/\eta = 2.971.712,80$ (2.971.712,80)	$\theta = 0,0034 (0,0038)$

Tabela 6. Dados da curva $M_x\theta_r$ – análise elastoplástica

Momento Fletor (kNxcn)	Rigidez Rotacional (kNxcn/rad)	Rotação (rad)
$2/3 M_{j,Rd} = 6.777,14 (7.618,09)$	$S_{j,ini} = 5.943.425,60$ (5.943.425,60)	$\theta = 0,0011 (0,0013)$
$M_{j,Rd} = 10.165,71 (11.427,14)$	$S_j = 1.988.765,47 (1.988.765,4)$	$\theta = 0,0051 (0,0057)$

A Figura 7 mostra as curvas momento x rotação com parâmetros determinados pelo método dos componentes e as curvas obtidas experimentalmente por Ribeiro (1998) e por meio de modelagem numérica de Maggi (2000). Não foram considerados os coeficientes de segurança no cálculo dos parâmetros dos componentes ativos da ligação para obtenção da curva da ligação pelo método dos componentes, visando à comparação com as demais curvas.

A curva obtida pelo modelo mecânico para análise elasto-plástica apresentou uma melhor aproximação com a curva experimental, principalmente no trecho elástico. Pode-se observar que a curva obtida pelo método estabelecido pela norma europeia é conservadora, principalmente em relação à resistência ao momento fletor ($M_{j,Rd}$). Além disso, pode-se notar que as curvas do modelo numérico e experimental ultrapassaram o momento plástico da viga (M_{pl}) igual a 11.641,75 kNcm, o que pressupõe que a resistência ao escoamento do aço para os perfis no ensaio realizado por Ribeiro (1998) possa ser superior ao valor teórico utilizado de 250 MPa.

No modelo experimental de Ribeiro (1998) a ligação falhou devido à ruptura dos parafusos da linha interna. A chapa também apresentou uma deformação, mas foram os parafusos que entraram em colapso. Segundo o modelo mecânico via método dos componentes, o modo de falha determinado foi o modo 2, decorrente da interação entre a flexão da chapa e a ruptura dos parafusos. Entretanto esse modo de falha não especifica a contribuição da chapa ou do parafuso no colapso da ligação.

Segundo Maggi (2000), a curva momento x rotação do modelo numérico apresentou um comportamento mais rígido com relação à curva experimental devido a alguns fatores como a utilização de vínculos rígidos na alma do pilar e enrijecedores, de força de protensão nos parafusos, de tensões residuais dos materiais e de imperfeições decorrentes da montagem dos protótipos. Maggi (2000) salienta que o modelo numérico deve ser melhorado.

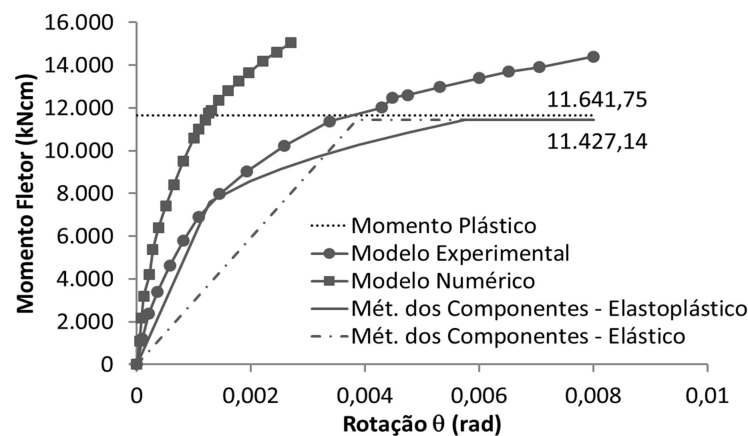


Figura 7. Comportamento momento-rotação relativa da ligação

Em atendimento à norma EN 1993-1-8: 2005, verifica-se que a ligação não possui capacidade suficiente de rotação, uma vez que as espessuras da mesa do pilar e da chapa de extremidade não atendem as condições mínimas da Eq. (7), onde t é a espessura da mesa do pilar ou a espessura da chapa de extremidade, f_y a resistência ao escoamento dos respectivos materiais citados, d_b o diâmetro do parafuso e f_{ub} a resistência à ruptura do parafuso:

$$t \leq 0,36d_b \sqrt{\frac{f_{ub}}{f_y}} \quad (7)$$

Diante dos resultados insatisfatórios aos critérios de ductilidade, o gráfico da ligação deve ser limitado apenas ao trecho elástico com rigidez modificada ($S_{j,ini}/\eta$), conforme curva apresentada na Fig.7.

4 ANÁLISE DE UM PÓRTICO DE AÇO COM LIGAÇÃO COM CHAPA DE EXTREMIDADE ESTENDIDA

4.1 Considerações iniciais

As estruturas reticuladas quando sujeitas a um determinado conjunto de esforços apresentam um comportamento não linear desde o início do carregamento. Esse comportamento não linear resulta da consideração do equilíbrio da estrutura na posição deslocada (análise em teoria de 2ª ordem / não linearidade geométrica), pelo fato dos materiais possuírem leis constitutivas não lineares (não linearidade do material), pela consideração do comportamento não linear das ligações, entre outros fatores.

Para avaliar o comportamento do pórtico com as ligações semirrígidas 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 com ligações semirrígidas. As ligações são representadas pelo modelo mecânico via método dos componentes, cujo comportamento momento x rotação relativa é representado numericamente a partir de curvas multilíneas.

O estudo tem como objetivo avaliar o comportamento das ligações semirrígidas e sua influência na distribuição dos esforços solicitantes nos elementos, nos deslocamentos nodais, na propagação da plastificação das barras e na estabilidade global da estrutura.

Características do pórtico

O pórtico possui dois andares e um vão e bases engastadas, conforme ilustra a Fig. 8.

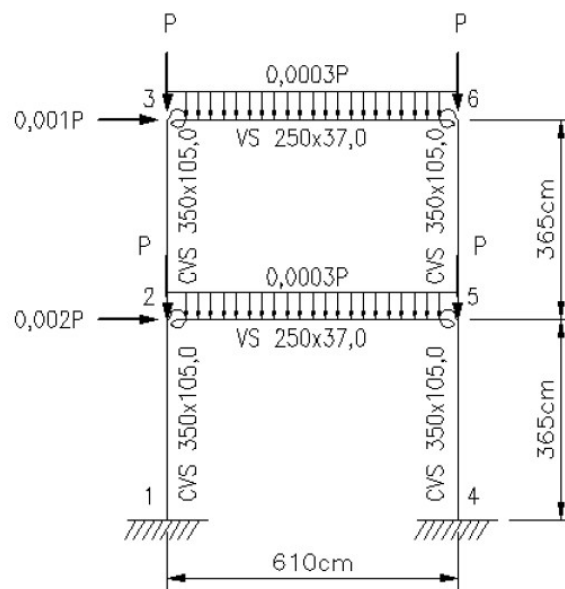


Figura 8. Pórtico não contraventado de dois andares e um vão

As vigas são constituídas pelo perfil VS 250x37,0 e os pilares pelo perfil CVS 350x105,0. O carregamento, majorado, é constituído por cargas verticais concentradas P , aplicadas no topo dos pilares, por cargas concentradas horizontais, sendo uma de $0,001P$ no segundo andar e outra de $0,002P$ no primeiro andar. Além disso, atuam nas vigas uma carga uniformemente distribuída igual a $0,0003P$ kN/cm. Os carregamentos concentrados são incrementados em kN.

Características, comportamento e classificação das ligações

As ligações do pórtico são constituídas por chapa de extremidade estendida e enrijecida transversalmente cujas características geométricas foram apresentadas na Fig. 6. Para avaliar a influência da ligação no pórtico plano, algumas espessuras de chapas de extremidade são consideradas. Dessa forma, além da espessura da chapa de 19 mm, são consideradas as chapas com espessuras iguais a 15,88 mm, 12,70 mm e 9,53 mm. Os parâmetros de rigidez, resistência e capacidade de rotação são determinados a partir do método dos componentes, conforme mostrado na Tabela 7. O comportamento das ligações, aproximado por curvas, é apresentado na Fig. 9, onde percebe-se que a resistência ao momento fletor decresce à medida que a espessura da chapa de extremidade torna-se mais fina.

Outro ponto a ser destacado é a limitação da espessura da chapa de extremidade, sendo a espessura de 19 mm, o limite para que esse componente seja o comprometedor da ligação, conforme os resultados apresentados na Tabela 8 a 11. Para espessuras maiores, outro componente da ligação passa a ser preponderante na resistência da ligação.

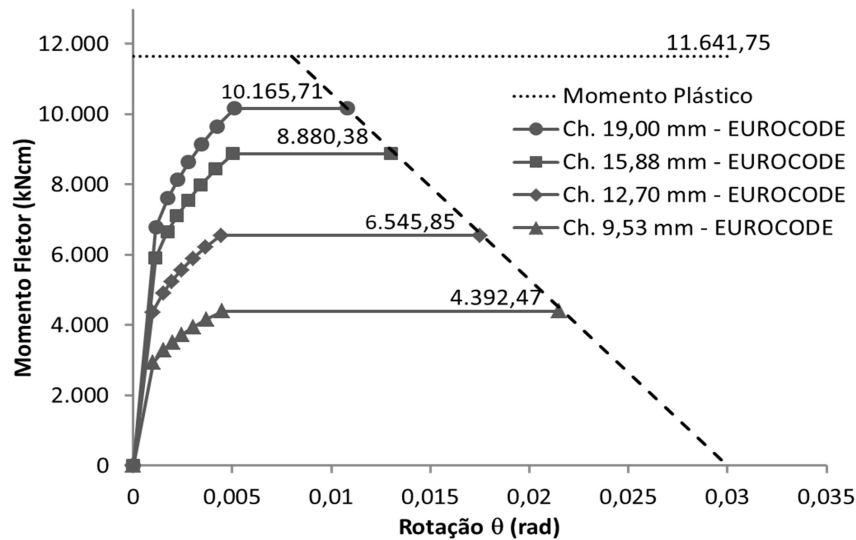
Pode se observar nas Tabelas 8 a 11 que, como o momento fletor resistente das ligações está relacionado à resistência da chapa de extremidade sujeita à flexão, a ligação é considerada suficientemente dúctil, com capacidade de rotação suficiente para desenvolver as rotações previstas no processo de análise estrutural, desde que a espessura atenda a condição dada pela Eq. (7). Conforme mencionado na seção 3.4.2, a ligação com chapa de 19 mm não atende a essa exigência normativa, e, portanto, o modelo estrutural deve ser limitado ao trecho elástico. O mesmo foi observado para a ligação com chapa de 15,88 mm de espessura. Nestes casos, considera-se a curva momento-rotação bilinear com rigidez modificada e uma capacidade de rotação ϕ_{Cd} elástica, dada pela rotação correspondente ao momento $M_{j,Rd}$. Entretanto, esse critério requerido pela norma europeia não é considerado, tendo em vista o estudo comparativo do comportamento não linear do pórtico considerando o comportamento elastoplástico para todas as ligações.

Para definir a capacidade rotacional das ligações considera-se, de forma simplificada, uma linha reta com inclinação definida por dois pontos $P_1=(0,008; 11.641,75)$ e $P_2=(0,03; 0)$. O ponto P_1 é definido pela rotação igual a 0,008 rad, obtida pelo ensaio de Ribeiro (1998) para chapa de extremidade com espessura de 19 mm e pelo valor do momento plástico da viga igual a 11.641,75 kNcm. O ponto P_2 é definido pela capacidade de rotação igual a 0,03 para ligação perfeitamente flexível ($M=0$), conforme mostra a Fig. 9.

Os parâmetros dessas ligações são apresentados na Tabela 7 e o comportamento das ligações aproximado por curvas conforme a Fig. 9.

Tabela 7. Resumo dos parâmetros das ligações conforme EN 1993-1-8: 2005

Espessura da chapa (mm)	Momento fletor resistente $M_{j,Rd}$ (kNcm)	Rigidez rotacional inicial $S_{j,ini}$ (kNcm/rad)	Capacidade de rotação θ_{cd} (rad)
19,00	10.165,71	5.943.425,60	0,011
15,88	8.880,38	5.278.235,04	0,013
12,70	6.545,85	4.408.860,34	0,018
9,53	4.392,47	2.923.485,81	0,022

**Figura 9. Curvas M-θr – EN 1993-1-8: 2005****Tabela 8. Resultados da verificação da ligação conforme EN 1993 - 1 - 8: 2005 – Ch.19,00mm.**

Chapa de extremidade com espessura de 19 mm		
Alma do pilar ao cisalhamento	$V_{wp,Rd} = 549,44$ kN	$k_1 = \infty$
Alma do pilar à compressão	$F_{c,wc,Rd} = 1.004,77$	$k_2 = \infty$
Alma e mesa da viga à compressão	$F_{c,fb,Rd} = 490,18$ kN	$k_7 = \infty$
Região tracionada	$F_{t,Rd} = 440,21$ kN	$k_{eq} = 0,50$ cm
Linha1 $\rightarrow F_{t,Rd} = 187,17$ kN (chapa de extremidade à flexão) - modo de falha 2		
Linha2 $\rightarrow F_{t,Rd} = 253,04$ kN (chapa de extremidade à flexão) - modo de falha 3		
Rigidez rotacional inicial	$S_{j,ini} = 5.943.425,60$ kNcm/rad	
Momento resistente	$M_{j,Rd} = 10.165,71$ kNcm	
Capacidade de rotação	$\theta_{cd} = 0,011$ rad	
A chapa de extremidade à flexão é o componente que limita a resistência da ligação – modo de falha 2.		

Tabela 9. Resultados da verificação da ligação conforme EN 1993 - 1 - 8: 2005 – Ch.15,88mm.

Chapa de extremidade com espessura de 15,88 mm		
Alma do pilar ao cisalhamento	$V_{wp,Rd} = 549,44 \text{ kN}$	$k_1 = \infty$
Alma do pilar à compressão	$F_{c,wc,Rd} = 996,53 \text{ kN}$	$k_2 = \infty$
Alma e mesa da viga à compressão	$F_{c,fb,Rd} = 490,18 \text{ kN}$	$k_7 = \infty$
Região tracionada	$F_{t,Rd} = 386,59 \text{ kN}$	$k_{eq} = 0,45 \text{ cm}$
Linha1 $\rightarrow F_{t,Rd} = 159,05 \text{ kN}$ (chapa de extremidade à flexão) - modo de falha1		
Linha2 $\rightarrow F_{t,Rd} = 227,54 \text{ kN}$ (chapa de extremidade à flexão) - modo de falha2		
Rigidez rotacional inicial	$S_{j,ini} = 5.278.235,04 \text{ kNcm/rad}$	
Momento resistente	$M_{j,Rd} = 8.880,38 \text{ kNcm}$	
Capacidade de rotação	$\theta_{cd} = 0,013 \text{ rad}$	
A chapa de extremidade à flexão é o componente que limita a resistência da ligação – modo de falha 1.		

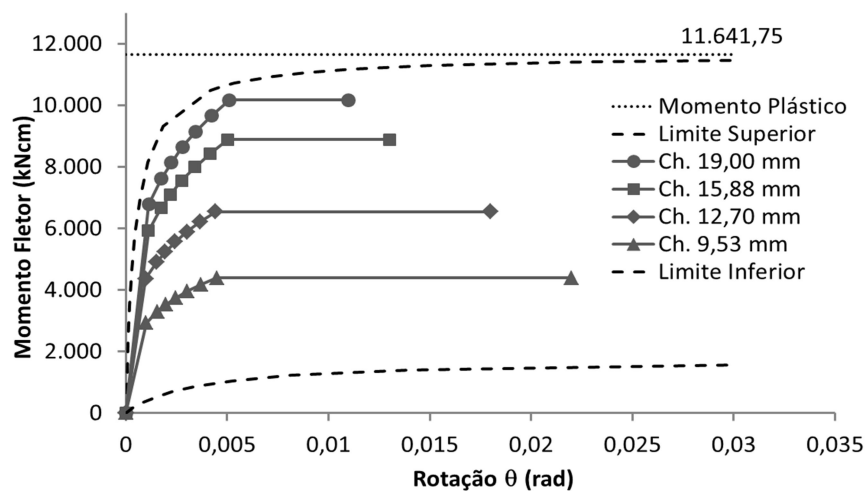
Tabela 10. Resultados da verificação da ligação conforme EN 1993 - 1 - 8: 2005 – Ch.12,70mm.

Chapa de extremidade com espessura de 12,70 mm		
Alma do pilar ao cisalhamento	$V_{wp,Rd} = 549,44 \text{ kN}$	$k_1 = \infty$
Alma do pilar à compressão	$F_{c,wc,Rd} = 988,03 \text{ kN}$	$k_2 = \infty$
Alma e mesa da viga à compressão	$F_{c,fb,Rd} = 490,18 \text{ kN}$	$k_7 = \infty$
Região tracionada	$F_{t,Rd} = 292,18 \text{ kN}$	$k_{eq} = 0,38 \text{ cm}$
Linha1 $\rightarrow F_{t,Rd} = 101,47 \text{ kN}$ (chapa de extremidade à flexão) - modo de falha1		
Linha2 $\rightarrow F_{t,Rd} = 190,71 \text{ kN}$ (chapa de extremidade à flexão) - modo de falha2		
Rigidez rotacional inicial	$S_{j,ini} = 4.408.860,34 \text{ kNcm/rad}$	
Momento resistente	$M_{j,Rd} = 6.545,85 \text{ kNcm}$	
Capacidade de rotação	$\theta_{cd} = 0,018 \text{ rad}$	
A chapa de extremidade à flexão é o componente que limita a resistência da ligação – modo de falha 1.		

Tabela 11. Resultados da verificação da ligação conforme EN 1993 - 1 - 8: 2005 – Ch.9,53mm.

Chapa de extremidade com espessura de 9,53 mm		
Alma do pilar ao cisalhamento	$V_{wp,Rd} = 549,44 \text{ kN}$	$k_1 = \infty$
Alma do pilar à compressão	$F_{c,wc,Rd} = 984,44 \text{ kN}$	$k_2 = \infty$
Alma e mesa da viga à compressão	$F_{c,fb,Rd} = 490,18 \text{ kN}$	$k_7 = \infty$
Região tracionada	$F_{t,Rd} = 201,24 \text{ kN}$	$k_{eq} = 0,26 \text{ cm}$
Linha1 $\rightarrow F_{t,Rd} = 56,78 \text{ kN}$ (chapa de extremidade à flexão) - modo de falha1		
Linha2 $\rightarrow F_{t,Rd} = 144,46 \text{ kN}$ (chapa de extremidade à flexão) - modo de falha1		
Rigidez rotacional inicial	$S_{j,ini} = 2.923.485,81 \text{ kNcm/rad}$	
Momento resistente	$M_{j,Rd} = 4.392,47 \text{ kNcm}$	
Capacidade de rotação	$\theta_{cd} = 0,022 \text{ rad}$	
A chapa de extremidade à flexão é o componente que limita a resistência da ligação – modo de falha 1.		

As ligações são classificadas pelo sistema de classificação proposto por Buonicontro (2017), cujos limites inferior e superior são apresentados na Fig. 10, onde as curvas compreendidas por esses limites são classificadas como semirrígidas em termos de rigidez e parcialmente resistentes ao momento fletor em termos de resistência.

**Figura 10. Classificação das ligações - Buonicontro (2017)**

Comportamento estrutural do pórtico com as ligações semirrígidas considerando a análise elastoplástica em teoria de 2ª ordem

Os resultados da carga última e do deslocamento horizontal no topo do pórtico, nó 3, são apresentados na Tabela 12. Os valores obtidos estão de acordo com o comportamento das ligações onde se observa o aumento de resistência dos pórticos à medida que a rigidez e a

resistência das ligações aumentam. O pórtico rígido convencional falha para uma carga última P_u igual a 1.544,40 kN apresentando um deslocamento horizontal no topo, nó 3, de 0,903 cm.

Tabela 12. Carga última e deslocamento horizontal (nó3)

Espessura da chapa	P_u (kN)	Deslocamento Horizontal (cm)
19,00mm	1.504,80	0,763
15,88mm	1.438,80	0,675
12,70mm	1.293,60	0,541
9,53mm	1.148,40	0,440

De acordo com a Fig. 11 e a Tabela 12, nota-se que a carga última P_u aumenta à medida que a espessura da chapa de extremidade torna-se mais espessa. Como já esperado, uma vez que o aumento da resistência dos pórticos está relacionado com o aumento da rigidez e da resistência das ligações, sendo esses parâmetros diretamente relacionados com a espessura da chapa de ligação. Verifica-se também na Fig. 11 que, para um mesmo carregamento P , os deslocamentos são maiores à medida que a espessura da chapa de ligação diminui.

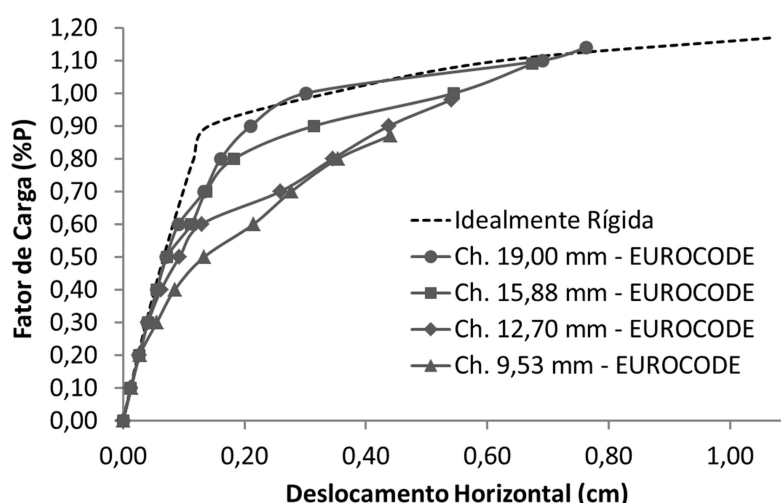


Figura 11. Deslocamento horizontal – nó3

A Figura 12 ilustra o percentual de plastificação nos pilares do primeiro andar, nas extremidades e no meio do vão das vigas, além do percentual do momento último nas ligações semirrígidas, para a carga de colapso da estrutura. Os valores percentuais de plastificação na seção transversal dos perfis (pilares e vigas) são representados por círculos e os valores percentuais de momento último nas ligações são representados por pentágonos.

Pode-se observar que, apesar de atingirem a mesma carga última, o comportamento do pórtico semirrígido com ligação com chapa de 19 mm de espessura é diferente do pórtico rígido convencional. O pórtico rígido convencional falha por instabilidade inelástica enquanto o pórtico com chapa de extremidade com espessura de 19mm falha por instabilidade

inelástica associada com o mecanismo de viga em ambos os pavimentos devido ao alto nível de plastificação no centro do vão das vigas e a plastificação das ligações que atingem a sua capacidade de rotação máxima.

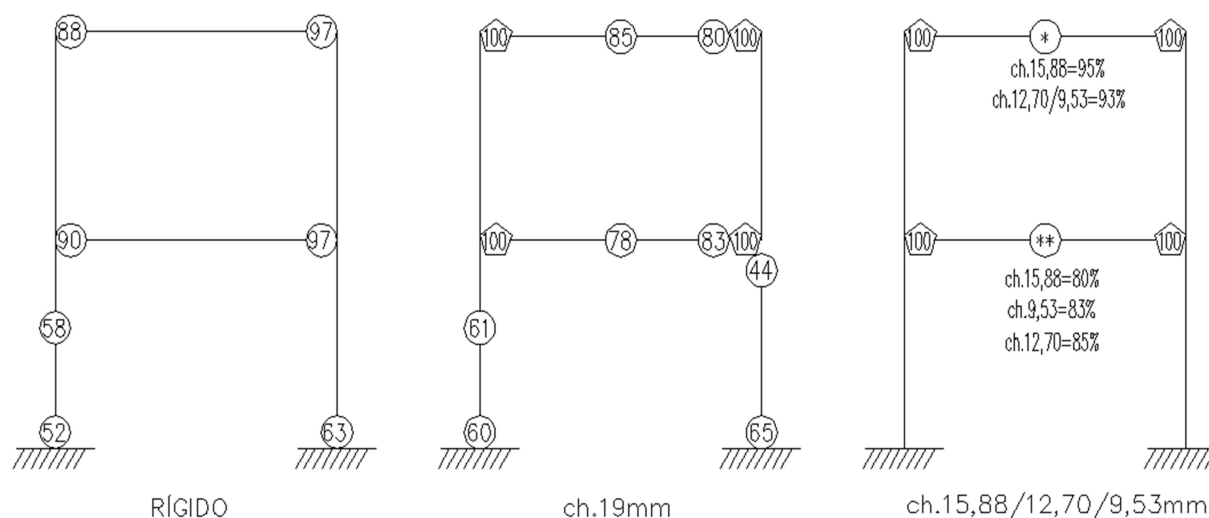


Figura 12. Percentuais de plastificação nas barras (círculo) e ligações (pentágono)

Os demais pórticos com chapas de extremidades com espessuras de 15,88, 12,70 e 9,53mm falham por mecanismos de viga em ambos os andares devido a plastificação no meio do vão da viga e nas ligações que atingem a sua capacidade resistente máxima.

Pode-se dizer que, o comportamento dos pórticos semirrígidos é governado pelas ligações que apresentam momentos últimos significativamente inferiores ao momento plástico da viga conectada (ligações parcialmente resistentes).

A Figura 13 mostra os diagramas de momento fletor (DMF) associados à carga última dos pórticos considerando as ligações idealmente rígidas e semirrígidas com as espessuras de chapas variadas.

De acordo com os diagramas de momento fletor apresentados é possível observar a influência das ligações semirrígidas na redistribuição dos momentos, nos pilares e vigas do pórtico. Ao se considerar o comportamento semirrígido das ligações entre viga-pilar, observa-se a ocorrência de uma redução significativa nos momentos fletores nas bases do pórtico, uma redução dos momentos negativos nas extremidades das vigas e um aumento dos momentos positivos nos vãos, quando comparado com o diagrama do pórtico rígido convencional.

Nota-se que, no instante em que os pórticos atingem a carga última, os momentos fletores solicitantes nas extremidades das vigas alcançam o valor do momento fletor resistente da ligação. Para todos os pórticos semirrígidos, o momento fletor no meio do vão da viga do 1º andar varia entre os valores de 91 a 97% e no meio do vão da viga do 2º andar entre os valores de 96,5% e 99,3% do momento plástico teórico das vigas ($M_{p_{viga}}=11.641,75$ kNm). Nas extremidades dos pilares, os momentos fletores são inferiores a 22% do momento plástico teórico para os pilares ($M_{p_{pilar}}=46.911,25$ kNm).

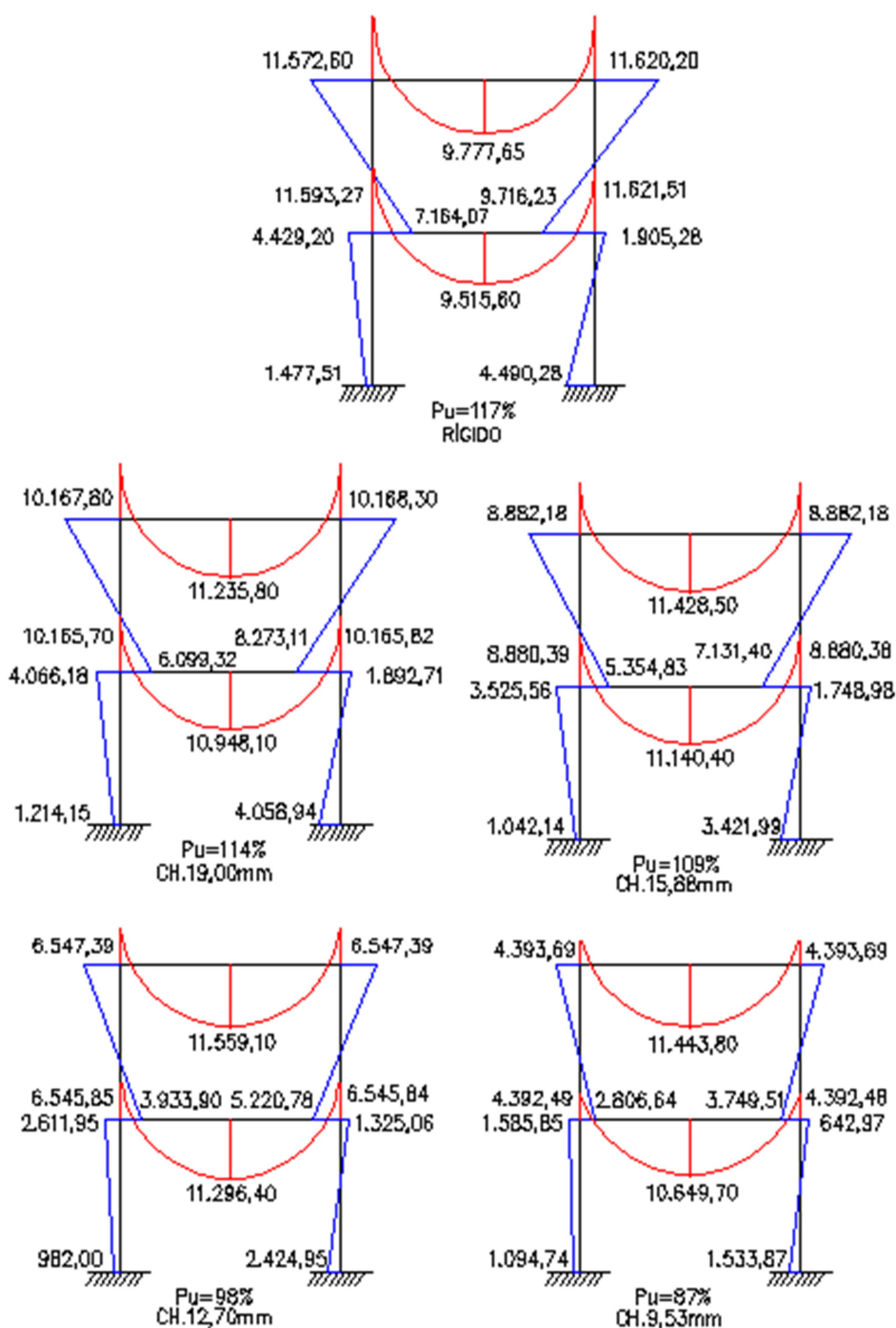


Figura 13. Diagrama de momento fletor em kNm para pórtico rígido convencional e com ligações semirrígidas

Portanto, reforça-se a conclusão de que o mecanismo de colapso ocorre devido à formação de rótulas plásticas nas ligações, associada à formação de rótula plástica no meio do vão das vigas de ambos os andares, caracterizando um mecanismo de viga, para um fator de carga última entre 87% e 117% do carregamento aplicado ao pórtico.

5 CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho foi compreender o comportamento das ligações semirrígidas viga-pilar constituídas por chapas de extremidade estendida com enrijecedores transversais e suas influências no comportamento global da estrutura. Para tanto, foi realizado um estudo para a determinação das principais propriedades mecânicas dessas ligações utilizando o método dos componentes. Esses parâmetros foram determinados conforme o modelo mecânico presente na EN 1993-1-8: 2005.

Inicialmente, foi realizada uma comparação entre as curvas momento versus rotação relativa do modelo numérico obtido por Maggi (2000), do modelo experimental realizado por Ribeiro (1998) e do modelo mecânico pelo método dos componentes. A curva numérica obtida por Maggi apresentou um comportamento rígido em relação à curva experimental. Já a curva obtida pelo modelo mecânico apresentou uma boa aproximação com a curva experimental, principalmente no trecho elástico, apesar de conservadora em relação ao momento resistente, confirmando a eficiência do modelo mecânico.

Posteriormente, foi realizada a análise do comportamento global de um pórtico com esse tipo de ligação, variando-se a espessura da chapa de extremidade. Observou-se que uma ligação com chapa de extremidade estendida pode apresentar comportamentos distintos, simplesmente modificando-se a espessura da chapa. A rigidez e a resistência aumentam significativamente com o aumento da espessura da chapa de extremidade, sendo a resistência com maior influência à variação da espessura da chapa do que a rigidez. Assim, no dimensionamento de ligações, pode-se demonstrar a eficiência do procedimento de se aumentar a espessura da chapa de extremidade objetivando-se aumentar a resistência da ligação.

O exemplo numérico mostrou que, pode ser errôneo associar o conceito de ligações rígidas às ligações com chapas de extremidade enrijecidas transversalmente, uma vez que a resposta estrutural pode ser bem diferente do comportamento de uma ligação idealmente rígida. Sendo assim, a consideração do comportamento da ligação no comportamento estrutural é importante e necessária, principalmente, nos casos onde o comportamento da ligação se afasta substancialmente do comportamento dos modelos idealizados utilizados tradicionalmente nos processos de análise. O comportamento da ligação pode ser identificado inicialmente pelos sistemas de classificação consistentes apresentados na literatura.

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.

Agradecimento

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

REFERÊNCIAS

- AISC AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. ANSI/AISC 360-10: *Specification for structural steel buildings*. Illinois, 2010.
- Buonicontró, L. M. S., 2017. *Desenvolvimento de um sistema de classificação baseado nos parâmetros de rigidez e resistência de ligações viga-pilar de estruturas de aço*. Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais/Belo Horizonte.
- Burgess, I. W., Davison, J. B. & Plank, R. *Robustness Of Joints In Steel-Framed Structures At High Temperatures*. University of Sheffield, 2008. Disponível em < <http://fire-research.group.shef.ac.uk/downloads.html>>. Acesso em 22 jul. 2016.
- EN 1993-1-1: 2005 Eurocode 3: *Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization. 2005.
- 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*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia/Universidade de São Paulo/São Carlos.
- Maggi, Y. I., 2000. *Análise numérica, via M.E.F, do comportamento de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia/Universidade de São Paulo/São Carlos.
- Oliveira, C. R., 2011. *Estudo do comportamento de uma ligação viga-pilar*. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Viseu/Escola de Tecnologia e Gestão de Viseu/ Viseu.
- Oliveira, L. A. R., 2015. *Análise de pórticos de aço com ligações viga-pilar e de base de pilar semirrígidas a partir do método dos componentes*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia/ Universidade Federal de Minas Gerais/Belo Horizonte.
- Ribeiro, L. F. L., 1998. *Estudo do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo: análise teórico-experimental*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia/Universidade de São Paulo/São Carlos.
- 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, Escola de Engenharia/Universidade Federal de Minas Gerais/Belo Horizonte.