

ANÁLISE NUMÉRICA DE LIGAÇÕES SOLDADAS NA DIREÇÃO DO EIXO DE MENOR INÉRCIA DO PILAR

Roberta M. Machado, Luiz F. L. Ribeiro, Arlene M. S. Freitas

^a *Departamento de Engenharia Civil - DE CIV, Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Universitário Morro do Cruzeiro, Bauxita, 35400-000 - Ouro Preto, MG - Brasil, roberta.machado25@yahoo.com.br, loureiro@em.ufop.br, arlene.freitas@gmail.com, <http://www.propec.ufop.br>*

Palavra-Chave: Ligações, Ligações no eixo de menor inércia, Ligações viga-pilar, Ligações soldadas, Rigidez inicial.

Resumo:

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma análise numérica, via método dos Elementos Finitos sobre o comportamento estrutural de ligações soldadas viga-pilar na direção do eixo de menor inércia do pilar. O modelo estudado consiste em uma viga formada pelo perfil laminado W360 x 44, soldada a alma do pilar, cujo perfil é variado de acordo com o índice de esbeltez a ser estudado. Visando obter resultados mais próximos do comportamento real da ligação, foram utilizados modelos tridimensionais. Todos os modelos numéricos foram analisados com o software *Ansys 11.0* utilizando-se ainda um software *TrueGrid*, específico para pré-processamento, o que tornou possível ganhos significativos de produtividade na fase de construção da malha de elementos finitos. Utilizou-se para esta modelagem o elemento "Solid 45", com 8 nós, cada um com liberdade de translação nas direções X, Y e Z, possuindo ainda características de plasticidade admitindo a utilização de diagrama multilinear para a representação do comportamento tensão-deformação do material utilizado. Um elemento unidimensional de barra foi utilizado para representar um acréscimo ao comprimento da viga constituído por elementos sólidos, visando-se à diminuição do número de elementos nas regiões onde apenas a transmissão de esforços é preponderante (próximo à extremidade da viga) sem o comprometimento da análise na região da ligação. Os resultados obtidos foram comparados com os fornecidos pelo "Component Method" adotado pelo EUROCODE 3, em termos de capacidade resistente dos componentes e com os obtidos através de métodos analíticos, quanto à capacidade resistente e rigidez inicial da alma do pilar. Também foi analisada a influência da variação geométrica do pilar no comportamento da curva momento-rotação, uma vez que as dimensões da viga foram padronizadas.

1 - INTRODUÇÃO

O tipo de ligação entre os elementos de uma estrutura metálica é fator de grande influência em seu comportamento global, uma vez que podem ser descontinuidades geométricas que, associadas à não linearidade física dos materiais, levam ao comportamento não-linear da estrutura. Dessa forma, torna-se incompatível com a realidade a classificação das ligações como rígidas ou flexíveis, sendo obrigatória a consideração de ligações semi-rígidas para definir o comportamento intermediário em termos de continuidade rotacional e, por consequência, de transmissão dos momentos fletores.

Algumas pesquisas sobre o tema têm sido desenvolvidas no Brasil analisando-se o comportamento das ligações semi-rígidas por intermédio de formulações numéricas e estudos experimentais, porém quase exclusivamente dedicados às ligações segundo a direção do eixo de maior inércia dos pilares, dentre os quais se destacam: Ribeiro (1998), Maggi (2000), Romano (2001) e Maggi (2004). Alguns trabalhos direcionados ao estudo das ligações segundo o eixo de menor inércia foram bastante expressivos como os de Neves (1996), Lima (1999), Bessa (2004) Neves (2004), Hotes (2006) e Silva (2007).

O presente trabalho tem como objetivo a apresentação da metodologia da análise numérica realizada, via Método dos Elementos Finitos, para ligações soldadas viga-pilar segundo o eixo de menor inércia (Figura 1) e dos resultados obtidos.

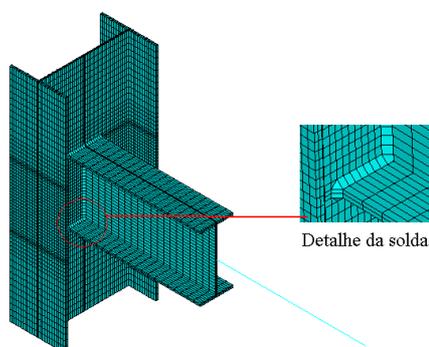


Figura 1: Ligação viga-pilar soldada.

A análise realizada possibilitou a verificação da influência da esbeltez da alma do pilar na capacidade resistente ao momento fletor, assim como a importância da restrição imposta pelas mesas do pilar na capacidade rotacional na direção do eixo de menor inércia do mesmo. São também apresentadas as curvas momento-rotação obtidas para os modelos numéricos; a comparação entre o momento resistente calculado a partir do Método dos Componentes do EUROCODE 3 (2005) e o momento último atingido na análise numérica, conforme o mais crítico; a comparação entre a formação do mecanismo plástico da alma do pilar através do modelo de Gomes (1990) e do modelo numérico, bem como a avaliação da rigidez inicial por intermédio de uma adaptação do modelo de Neves (2004) e dos resultados da análise numérica.

2 - METODOLOGIA

Os modelos numéricos foram definidos a partir de um pré-dimensionamento, utilizando-se as prescrições da norma brasileira NBR 8800:2008 para identificar os elementos críticos e os possíveis modos de colapso correspondentes. Foram adotados os mesmos perfis laminados H e I utilizados por Silva (2007) para os pilares, utilizando-se, para todos os modelos analisados, o perfil W360x44 para a viga, admitindo-se um balanço com comprimento L_x igual a 1,50m

A Tabela 1 apresenta as características geométricas dos pilares dos modelos analisados no trabalho, incluindo a designação dos correspondentes modelos numéricos e a indicação do tipo de perfil utilizado no pilar. Como o principal parâmetro que definiu os pilares utilizados nos modelos numéricos foi a esbeltez da alma λ_w , definida pela relação entre a altura L_w e a espessura t_w da mesma. As denominações BIE, MIE e AIE apresentadas na Tabela 1 referem-se, respectivamente, aos modelos pertencentes às classes 1, 2 e 3, ou seja, ligações com baixo ($\lambda_w < 20$), médio ($20 \leq \lambda_w < 30$) e alto ($\lambda_w \geq 30$) índice de esbeltez da alma do pilar, conforme a classificação estabelecida por Gomes(1990).

Modelos	Perfil	t_w (mm)	L_w	$\lambda_w=L_w/t_w$	t_{fc}	b_f
BIE₁	HP310 x 125	17,4	253	14,54	17,4	312
BIE₂	HP310 x 110	15,4	253	16,43	15,5	310
BIE₃	HP310 x 93	13,1	253	19,31	13,1	308
MIE₁	W310 x 117	11,9	253	21,26	18,7	307
MIE₂	W360 x 122	13,0	296	22,77	21,7	257
MIE₃	W310 x 107	10,9	253	23,21	17,0	306
MIE₄	W310 x 97	9,9	253	25,56	15,4	305
MIE₅	W360 x 110	11,4	296	25,96	19,9	256
MIE₆	W250 x 44,8	7,6	225	29,61	13,0	148
AIE₁	W360 x 79	9,4	296	31,49	16,8	205
AIE₂	W360 x 72	8,6	296	34,42	15,1	204
AIE₃	W360 x 57,8	7,9	314	39,75	13,1	172
AIE₄	W360 x 51	7,2	314	43,61	11,6	171
AIE₅	W360 x 44	6,9	314	45,51	9,8	171
AIE₆	W360 x 39	6,5	314	48,31	10,7	128
AIE₇	W530 x 82	9,5	483	50,84	13,3	209
AIE₈	W410 x 46,1	7,0	363	51,86	11,2	140
AIE₉	W360 x 32,9	5,8	314	54,14	8,5	127

Tabela 1: Dimensões da seção dos perfis utilizados no pilar.

Foram utilizados dois tipos de elementos finitos: o primeiro, do tipo volumétrico, para representação da geometria do modelo e o um segundo, bidimensional de barra, para produzir um acréscimo ao comprimento efetivamente discretizado da viga. A utilização deste último elemento visa, fundamentalmente, a obtenção da redução do número de elementos do modelo, sem se comprometer com o seu desempenho, adotados os devidos

cuidados relativos ao acoplamento dos graus de liberdade na interseção dos dois tipos de elementos.

Para uma melhor consideração das características dos materiais envolvidos na ligação foram adotados diagramas multilíneares para a representação do comportamento tensão-deformação do aço da viga, através de um modelo representativo do diagrama multilíneo, designado por *Multilinear Isotropic Hardening Plastic* (MISO), do software Ansys. Este modelo consiste em segmentos de retas consecutivos que servem para definir o comportamento elástico, a plastificação e o comportamento na fase plástica do material. O modelo MISO é capaz de reproduzir a plasticidade do aço utilizando as tensões equivalentes de von mises como critério de plastificação.

Para uma melhor compreensão dos modelos analisados, a Figura 2 apresenta a malha de elementos finitos, o carregamento aplicado à extremidade da viga em balanço, assim como o acoplamento dos graus de liberdade na seção de interseção dos elementos sólidos com o elemento de barra e as condições de contorno impostas às extremidades do pilar, onde foram impedidos os deslocamentos na direção de X, Y e Z, de forma a simular um engaste do pilar.

A introdução do carregamento foi feita através da aplicação de uma força vertical, de cima para baixo, na extremidade livre do elemento de viga.

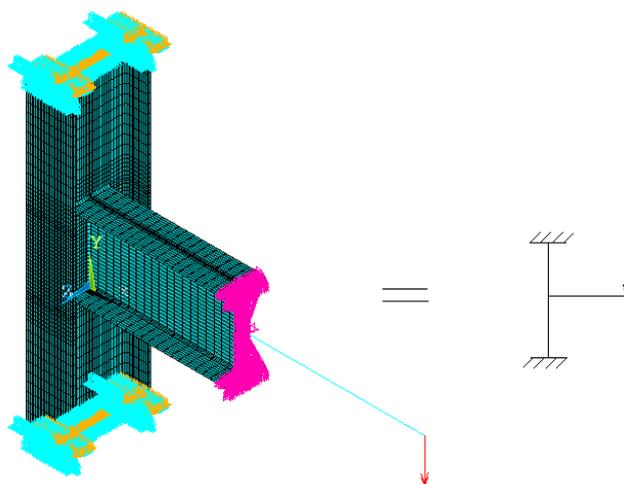


Figura 2: Visão geral dos modelos analisados

O valor máximo da carga vertical foi estabelecido, para cada modelo, de modo a gerar na ligação um momento fletor total cerca de 30% superior ao momento de plastificação teórico da alma do pilar, conforme o mais crítico.

3 - RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA

A situação crítica da ligação obtida na análise numérica foi comparada com a metodologia teórica do Método dos Componentes do EUROCODE 3 (2005). O

critério para a avaliação da tensão crítica atingida pelo pilar foi baseado no modelo de Gomes (1990), onde a resistência foi limitada pela formação de mecanismos de rótula plástica na alma do pilar. Nas análises numéricas a transmissão das forças de tração se dá nas regiões da mesa superior da viga, onde ocorre a formação do mecanismo plástico.

Para se obter os valores dos momentos resistentes para os modelos teóricos, utilizou-se o método dos componentes "Component Method". Este método é perfeitamente geral e pode ser aplicado na previsão das propriedades de qualquer tipo de ligação metálica bastando para isso conhecer-se o comportamento de cada um de seus componentes. Neste caso, foram analisados os seguintes componentes da ligação: A alma do pilar, as mesas da viga, a alma da viga e a solda. A capacidade resistente da alma do pilar foi obtida através de uma adaptação do modelo de Gomes (1990) para ligações soldadas. Neste modelo considera-se a alma do pilar como sendo uma placa submetida a um binário de forças F , cujo colapso está associado à formação de um mecanismo de plastificação local ou global. Neste caso a adaptação do modelo de Gomes (1990) para uma ligação soldada consiste em considerar a área da zona de tração igual a área da mesa superior da mesa da viga e a área de compressão igual à área da mesa inferior da viga da ligação.

Em todos os modelos de baixa esbeltez (classe1) os momentos resistentes numéricos de plastificação da alma foram significativamente superiores aos momentos de plastificação teóricos obtidos por Gomes (1990). Considerando-se o método dos componentes, verificou-se que a capacidade da viga governa a falha da ligação (escoamento da mesa tracionada). A título de comparação do comportamento momento-rotação, apresentam-se, na Figura 3, as curvas momento-rotação da alma dos modelos da classe 1, com a indicação de seus respectivos índices de esbeltez.

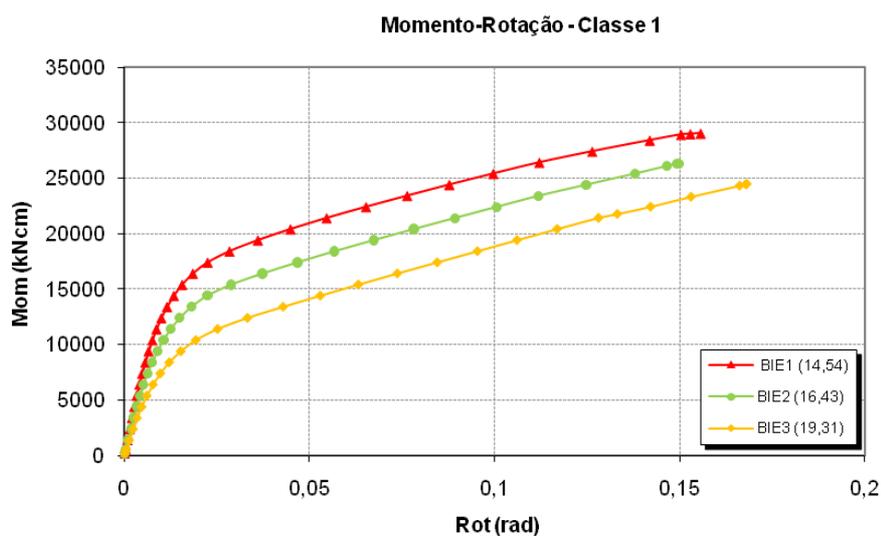


Figura 3: Curvas momento-rotação da alma para os modelos da classe 1.

A comparação da rigidez inicial S_{ini} numérica e teórica, para os modelos da classe 1 na condição de mesas do pilar sem restrição à rotação, é mostrada na Tabela 2. Observou-se que a rigidez inicial dos modelos numéricos da classe 1 foram superiores à rigidez teórica com diferenças aproximadamente entre 15 e 20%. Nos modelos de Silva (2007), constituídos por ligações parafusadas, observou-se que a rigidez inicial dos modelos numéricos BIE₁ e BIE₂ foi superior à rigidez teórica, enquanto que no modelo BIE₃ a rigidez inicial numérica foi inferior à teórica, com diferença máxima de aproximadamente 11% para essa classe.

Classe	Modelo	λ_w	S_{ini} (Teórico)	S_{ini}	Diferença
1	BIE ₁	14,54	1.398.087	1.751.245	20,17
	BIE ₂	16,43	1.129.105	1.363.553	17,19
	BIE ₃	19,31	850.742	1.009.161	15,70

Tabela 2: Resultados numéricos e teóricos da rigidez inicial da classe 1 (kNcm/rad)

Como ocorrido nos modelos da classe 1, todos os modelos com alma do pilar medianamente esbelta (classe 2) tiveram o momento numérico de plastificação da alma com valor superior ao momento de plastificação teórico, bem como valor crítico correspondente ao escoamento da mesa tracionada.

As curvas momento-rotação da alma do pilar para os modelos da classe 2 são apresentadas na Figura 4, com indicação dos respectivos índices de esbeltez.

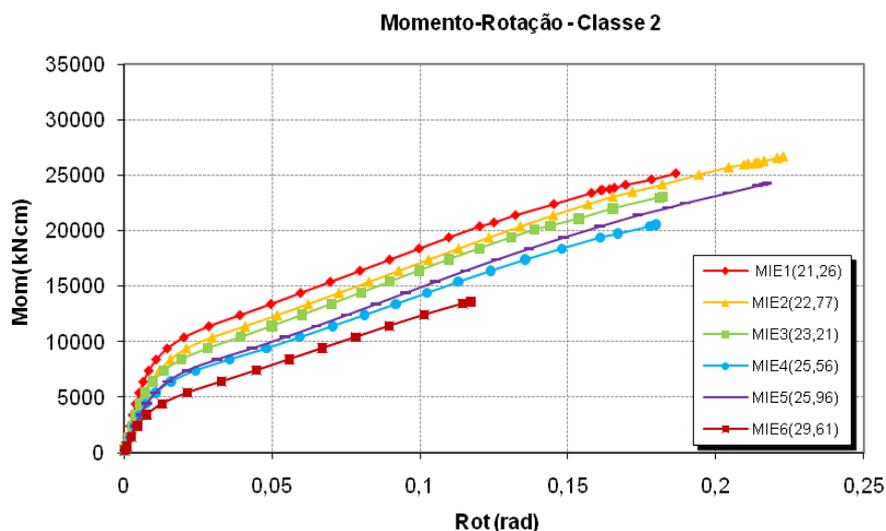


Figura 4: Curvas momento-rotação da alma para os modelos da classe 2.

Comparando-se os modelos MIE₁ e MIE₃, que possuem a mesma altura da alma do pilar ($L_w = 253\text{mm}$), observa-se que apesar do aumento da esbeltez no modelo MIE₃, houve um decréscimo dos momentos teórico e numérico, conforme Tabela 3, indicando que para alguns casos aparentemente não há relação direta com λ_w .

Modelo	λ_w	$M_{\text{teórico}}$	$M_{\text{numérico}}$
MIE ₁	21,26	16.704,28kNcm	25.390kNcm
MIE ₃	23,21	9.761,27kNcm	23.070kNcm

Tabela 3 – Comparação entre modelos MIE₁ e MIE₃

Comparando-se os modelos MIE₄ e MIE₅ que possuem índices de esbeltez praticamente iguais, observa-se, que o momento de plastificação numérico é menor para MIE₄ em relação à MIE₅, como mostra a Tabela 4. Neste caso, tem-se um aumento do momento numérico em torno de 18% e um decréscimo do momento teórico em torno de 3%, o que vem confirmar a idéia de que em alguns modelos não há relação direta da resistência com λ_w e, portanto, mais estudos se fazem necessários.

Modelo	λ_w	$M_{\text{teórico}}$	$M_{\text{numérico}}$
MIE ₄	25,26	8.004,65kNcm	20.583kNcm
MIE ₅	25,96	7.707,46kNcm	24.281kNcm

Tabela 4 – Comparação entre os modelos MIE₄ e MIE₅

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos para a rigidez inicial teórica e numérica dos modelos da classe 2, levando em conta a liberdade de rotação das mesas do pilar.

Os resultados da rigidez inicial obtida a partir de uma adaptação do modelo de Neves (2004) comparados com os valores obtidos pela análise numérica dos modelos, em alguns casos apresentaram diferenças consideráveis, como por exemplo para os modelos MIE₁ e MIE₆ que ultrapassaram 40%. Porém, apenas em casos como os modelos MIE₂, e MIE₅ a rigidez numérica foi menor que a teórica. Para os modelos de Silva (2007), constituídos por ligações parafusadas, tal comparação também apresentou diferenças consideráveis para a alguns modelos (da ordem de 30% para o modelo MIE₆), mas de apenas 2,5% para o modelo MIE₄.

Classe	Modelo	λ	S_{ini} (Teórico)	S_{ini}	Diferença
2	MIE ₁	21,26	719.085	1.207.226	40,43
	MIE ₂	22,77	912.675	831.726	-9,73
	MIE ₃	23,21	616.693	922.446	33,15
	MIE ₄	25,56	521.116	735.163	29,12
	MIE ₅	25,96	725.268	642.506	-12,88
	MIE ₆	29,61	310.713	574.693	45,93

Tabela 5: Resultados numéricos e teóricos da rigidez inicial da classe 2 (kNcm/rad)

Nos modelos com alma do pilar de alta esbeltez (classe 3), os valores do momento numérico de plastificação da alma foram inferiores aos momento de plastificação teórico.

As curvas momento-rotação da alma do pilar são apresentadas na Figura 5, mostrando, para todos os modelos, que houve uma diminuição significativa na rigidez inicial da ligação, à medida que cresce a esbelteza da alma do pilar, exceto para o modelo AIE8.

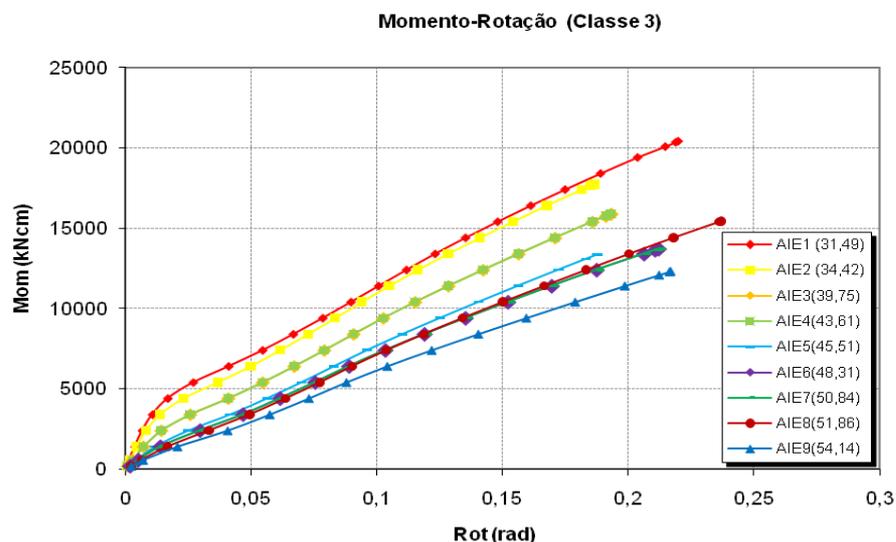


Figura 5: Curvas momento-rotação da alma para os modelos da classe 3.

O modelo AIE₃ atingiu a formação do mecanismo plástico (numérico) da alma do pilar com um valor de momento próximo ao do modelo AIE₄, e mesma rotação na alma. Apesar do aumento da esbelteza da alma do pilar de 39,75 (AIE₃) para 43,61 (AIE₄) a capacidade resistente dos modelos foi praticamente a mesma. Para a comparação em questão, observa-se que a rigidez inicial muito próximo do valor de 201.464kNcm/rad e 202.511kNcm/rad, apesar de ter ocorrido uma queda do momento de inércia I_z (1113cm⁴ para 968cm⁴). Outro fator observado é a proximidade do valor da largura b_f das mesas do pilar (172mm e 171mm, respectivamente para os modelos AIE₃ e AIE₄), podendo ter sido esse o fator que mais influenciou na rigidez do modelo.

O modelo AIE₇ teve a formação do mecanismo plástico (numérico) da alma do pilar com um valor de momento superior ao do modelo AIE₆, e a mesma rotação da alma. O aumento da esbelteza da alma do pilar de 48,31 (AIE₆) para 50,84 (AIE₇) levou a um aumento da capacidade resistente, o que leva à consideração, novamente, que λ_w pode não ser o único fator relevante nessa comparação.

Como dito anteriormente, a influência da restrição imposta pelas mesas do pilar deve ser levada em consideração. Para a comparação entre AIE₆ e AIE₇, (acréscimo de aproximadamente 54% na largura da mesa do pilar) ocorreu uma redução da rigidez inicial da ordem de 10%, (Tabela 6) apesar de ter ocorrido um significativo aumento do momento de inércia I_z (375cm⁴ para 2.028cm⁴),

acarretando também um significativo aumento do momento de plastificação numérico.

Ainda, com relação ao modelo AIE₇, se comparado com o modelo AIE₁ que possui aproximadamente a mesma espessura de alma do pilar, pode-se perceber que o aumento da altura L_w da alma de 296mm (AIE₁) para 483mm (AIE₇) reduz o momento de plastificação da alma em 5,0% (Tabela 6), provavelmente em decorrência da pequena variação do momento de inércia I_z do pilar (2416cm⁴ para 2028cm⁴).

Os resultados teóricos e numéricos da rigidez inicial se encontram na tabela 6.

Classe	Modelo	λ_w	S_{ini} (Teórico)	S_{ini} (Numérico)	Diferença (%)
3	AIE ₁	31,49	517.475	395.265	-30,92
	AIE ₂	34,42	442.882	326.538	-35,63
	AIE ₃	39,75	219.145	201.464	-8,78
	AIE ₄	43,61	247.098	202.511	-22,02
	AIE ₅	45,51	175.608	129.927	-35,16
	AIE ₆	48,31	189.219	113.926	-66,09
	AIE ₇	50,84	385.068	103.421	-272,33
	AIE ₈	51,86	201.657	90.031	-123,99
	AIE ₉	54,14	137.482	79.664	-72,58

Tabela 6: Resultados numéricos e teóricos da rigidez inicial da classe 3 (kNcm/rad)

Para os modelos da classe 3, devemos observar que os valores de rigidez numéricos dos modelos AIE₆, AIE₇, AIE₈, e AIE₉ apresentaram diferenças, conforme mostra a Tabela 6, o que pode ser atribuído à adaptação feita do modelo de Neves(2004) para ligações soldadas, onde foram considerados a área da região tracionada e comprimida como sendo a área da mesa superior e da mesa inferior da viga do modelo respectivamente. Entretanto, os demais modelos da classe 3 apresentaram valores de rigidez numérica menores que os valores de rigidez teóricos apresentando assim uma diferença de no máximo 35 % aproximadamente. Nos modelos de Silva (2007), os valores numéricos e teóricos da rigidez inicial da classe 3 apresentaram rigidez teórica maior que a rigidez numérica, com uma diferença máxima de 16%, com exceção dos modelos AIE₃, AIE₄, e AIE₅ que apresentaram rigidez teórica menor que a numérica, com uma diferença máxima de aproximadamente de 23%.

Vale ressaltar o aumento da rigidez da alma do pilar, obtida na análise numérica, com exceção do modelo AIE₄, com a redução da esbeltez da alma do pilar.

4 - CONCLUSÕES

Pode-se concluir a partir das curvas momento-rotação da alma do pilar, que há coerência entre a elevação do índice de esbeltez e a diminuição da capacidade resistente da alma para os modelos da classe 1. No entanto, os

modelos da classe 2 não apresentaram o mesmo comportamento, de modo que a redução da esbeltez da alma do pilar não garante o aumento da capacidade resistente da ligação. A análise numérica dos modelos da classe 3 não apresentaram bons resultados de rigidez para os modelos AIE₆, AIE₇, AIE₈ e AIE₉, sendo necessário o refinamento do modelo de cálculo, bem como imprescindível a análise comparativa com resultados experimentais

Além disso, a avaliação da capacidade resistente deve incluir outros fatores, como a variação da largura b_f das mesas do pilar e o momento de inércia I_z do pilar (momento de inércia em relação ao eixo contido no plano médio da alma do pilar), não levando em conta apenas a variação da esbeltez da alma do pilar.

Com relação à rigidez inicial teórica e numérica, observou-se que para os modelos da classe 1, ocorreu redução da rigidez inicial com o aumento do índice de esbeltez da alma do pilar. Entretanto, para os modelos da classe 2 e 3 essa relação não se verifica. Isso leva a perceber que a esbeltez da alma não é o único fator que influencia na rigidez inicial, assim como na capacidade resistente dos modelos.

5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2008). NBR 8800 – Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios. ABNT, Rio de Janeiro.
- BESSA, W. O. (2004). Análise Numérica Tridimensional de Ligações Viga-Coluna com Chapa de Topo na Direção do Eixo de Menor Inércia do Pilar. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFOP, Ouro Preto.
- EUROCODE 3, Part 1.8 (2005). Design of Joints. Draft 2, prEN1993, European Committee for Standardisation.
- GOMES, F. C. T. (1990). Etat Limite Ultime de la Résistance de L'âme d'une Colonne dans un Assemblage Semi-Rigide d'axe Faible. Rapport Interne n° 203, MSM – Université de Liège, 72p.
- HOTES, S. L. S. (2006). Capacidade Resistente da Alma de Pilares em Ligações com Chapa de Topo na Direção do Eixo de Menor Inércia do Pilar. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFOP, Ouro Preto.
- LIMA, L. R. O. (1999). Avaliação de Ligações Viga-Coluna em Estruturas de Aço Submetidas à Flexão no Eixo de Menor Inércia. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-RIO.
- MAGGI, Y. I. Análise Numérica, via M.E.F., do Comportamento de Ligações Parafusadas Viga-Coluna com Chapa de Topo. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2000.
- MAGGI, Y. I. (2004). Análise do Comportamento Estrutural de Ligações Parafusadas Viga-Pilar com Chapa de Topo Estendida. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

- NEVES, L. F. C. Nós Semi-Rígidos em Estruturas Metálicas: Avaliação da Rigidez em Configurações de Eixo Fraco. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 1996.
- NEVES, L. F. C. Comportamento Monotónico e Cíclico de Ligações de Eixo Fraco e Tubulares em Estruturas Metálicas e Mistas Aço-Betão. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal, 2004.
- RIBEIRO, L. F. L. Estudo do Comportamento Estrutural de Ligações Parafusadas Viga-Coluna com Chapa de Topo: Análise Teórico-Experimental. Dissertação de Doutoramento, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1998.
- ROMANO, V. P. (2001). Dimensionamento de Ligações Viga-Coluna com Chapa de Topo: Modelo do Eurocode 3. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP.
- SILVA, M. C. (2007). Capacidade Resistente da Alma de Pilares em Ligações com Chapa de Topo Curta na Direção do Eixo de Menor Inércia do Pilar. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFOP, Ouro Preto.