

MODELAGEM NUMÉRICA DE LIGAÇÕES VIGA-COLUNA EM AÇO COM PLACA DE EXTREMIDADE ESTENDIDA SUBMETIDAS A MOMENTO FLETOR E FORÇA NORMAL

Monique C. Rodrigues^a, Luciano R. O. de Lima^b, Pedro C. G. da S. Vellasco^b,
Sebastião A. L. de Andrade^a e José G. S. da Silva^b

^a*Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rua Marquês de São Vicente, 225 Prédio Cardeal Leme - 3º andar Gávea - Rio de Janeiro, RJ - Brasil - CEP: 22451-900, moniquecordeirorodrigues@gmail.com, andrade@puc-rio.br*

^b*Departamento de Estruturas e Fundações, Faculdade de Engenharia, UERJ, Av. São Francisco Xavier, 524, sala 5016A, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro, Brasil, lucianolima@uerj.br, vellasco@uerj.br, jgss@uerj.br*

Palavras-Chave: Estruturas de Aço, Ligações Viga-Coluna, Ligações Semi-Rígidas, Análise Numérica, Método das Componentes.

Resumo. As ligações desempenham um papel fundamental no comportamento global das estruturas de aço. Inúmeros trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos para entender o comportamento real de uma ligação e sua influência na resistência global dos pórticos. A Norma Brasileira de Estruturas de Aço, NBR 8800, considera o comportamento das ligações entre duas situações extremas: rígidas ou flexíveis. Entretanto, algumas normas, como o Eurocode 3, consideram que as ligações apresentam um comportamento intermediário, ou seja, semi-rígidas, considerando a presença de esforço normal através de uma limitação empírica de 5% da resistência plástica da viga. Para o estudo da ligação semi-rígida será utilizado o Método das Componentes, que verifica a resistência da ligação e sua classificação quanto à rigidez inicial. Este procedimento desenvolve-se através de modelos mecânicos, gerados por um conjunto de componentes rígidos e flexíveis onde cada componente da ligação é representada por uma mola translacional. Desta forma, este trabalho apresenta os resultados de caracterização de ligações viga-coluna com placa de extremidade estendida obtidos através de um modelo de elementos finitos. Para tal efetuou-se uma análise não-linear geométrica e de material. Esta análise possibilitará avaliar os principais parâmetros relativos ao comportamento, em função da distribuição de tensões e deformações.

1 INTRODUÇÃO

As ligações estruturais desempenham um papel fundamental no comportamento global das estruturas metálicas. Baseando-se em uma tentativa de se entender o comportamento real de uma ligação e sua influência na resistência global dos pórticos de edificações em aço, muitos trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos. Com o entendimento do comportamento real das ligações, torna-se possível o desenvolvimento de novas recomendações de projeto para se avaliar as propriedades mecânicas das ligações e, conseqüentemente, os procedimentos de projeto de estruturas de edifícios que considerem esta hipótese.

Atualmente, sabe-se que o comportamento real das ligações encontra-se entre duas situações extremas: rígidas ou flexíveis. Avaliando-se o momento fletor e a rotação associada de uma ligação viga-coluna, uma ligação é classificada como rígida quando os membros ligados por ela sofrem a mesma rotação. Desta forma, as ligações estão submetidas a uma rotação global de corpo rígido, que é a rotação absoluta do nó comumente utilizada na análise estrutural. Já nas ligações flexíveis, os membros da ligação apresentam rotações diferentes entre si. Para casos intermediários, o momento transmitido será resultante da rotação relativa entre a viga e a coluna. A ligação é denominada, então, como semi-rígida.

De forma simplificada considera-se que as ligações viga-coluna em estruturas metálicas estão sujeitas, predominantemente, a momento fletor simples, pelo que a relação momento *versus* rotação da ligação é suficiente para reproduzir o seu comportamento. No entanto, em situações tais como: i) pórticos submetidos a carregamentos horizontais (sismos ou cargas de vento); ii) pórticos irregulares; iii) ligações de vigas inclinadas, podem desenvolver-se esforços axiais elevados, que não deverão ser desprezados no dimensionamento da ligações, conforme pode ser visto na Figura 1; iv) estruturas submetidas a explosão (ataques terroristas).



Figura 1: Ligação de um pórtico de galpões com vigas inclinadas

Algumas normas de projeto e dimensionamento de estruturas de aço atuais consideram que as ligações possuem um comportamento semi-rígido, como por exemplo, o Eurocode 3 (2003), parte 1.8. Estas normas, porém, consideram somente as ligações submetidas ao momento fletor, sendo permitido o dimensionamento para o caso de aplicação de esforço normal, através de uma limitação empírica de 5% da resistência plástica da viga. Esta condição resulta de alguns trabalhos experimentais (Lima *et al*, 2003) e de abordagens teóricas (Jaspart (1997), Cerfontaine (2001)), dos quais se destaca o trabalho de Cerfontaine, que desenvolveu uma metodologia teórica baseada no método das componentes, que permite prever as curvas de interação M-N para ligações viga-coluna metálicas.

Na análise estrutural, uma ligação pode ser representada por uma mola rotacional que faz a ligação entre as linhas médias dos membros que chegam em um nó da estrutura conforme é apresentado na Figura 2. O projeto de uma ligação deve definir três propriedades básicas:

momento resistente, $M_{j,Rd}$; rigidez inicial rotacional, $S_{j,ini}$; capacidade de rotação, ϕ_{Cd} .

Dentre os tipos de análise a serem realizados em uma estrutura, pode-se citar: análise global elástica, análise global rígido-plástica e análise global elasto-plástica. Para uma análise global elástica, as ligações devem ser classificadas de acordo com sua rigidez inicial rotacional, $S_{j,ini}$. Neste tipo de análise, a rigidez rotacional pode ser simplificada por $S_{j,ini} / \eta$, onde η pode ser obtido na Tabela 1. Para uma análise global rígido-plástica, as ligações devem ser classificadas de acordo com sua resistência ao momento fletor. Já para uma análise elasto-plástica, as ligações devem ser classificadas tanto pela rigidez rotacional quanto pela resistência ao momento fletor.

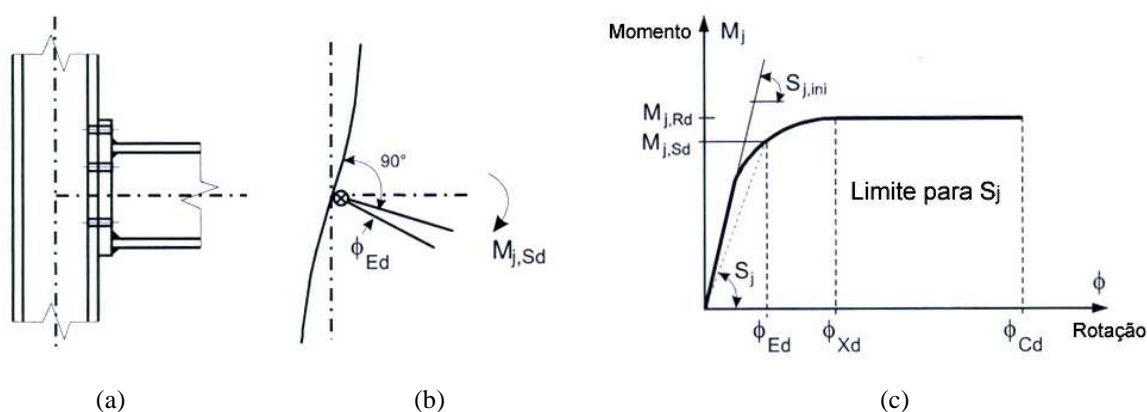


Figura 2: Propriedades para dimensionamento de uma ligação

Tipo de ligação	Ligações viga-coluna	Outros tipos de ligações
Soldadas	2	3
Placa de Extremidade Aparafusada	2	3
Cantoneiras Aparafusadas	2	3,5
Placas de base	-	3

Tabela 1: Coeficiente de modificação de rigidez η .

O primeiro passo para o desenvolvimento de um modelo mecânico de uma ligação viga-coluna é a identificação das componentes presentes na mesma. Estas representam as trajetórias de deformação existentes e os possíveis modos de ruptura da ligação. Conforme citado anteriormente, o Eurocode 3 (2003) utiliza estes modelos mecânicos para caracterizar o comportamento global de ligações viga-coluna através do Método das Componentes. A obtenção da curva momento *versus* rotação de ligações viga-coluna com a utilização deste método requer a realização dos seguintes passos:

- identificação das componentes ativas da ligação viga-coluna a ser analisada;
- obtenção das curvas força *versus* deslocamento de cada uma destas componentes;
- associação das componentes em série e em paralelo para obtenção da curva momento *versus* rotação da ligação.

Na Figura 3 pode-se identificar quais são as componentes presentes numa ligação com placa de extremidade estendida diferenciadas por estarem na zona tracionada ou na zona comprimida. Estas componentes são descritas onde o número entre parêntesis corresponde a

identificação da componente de acordo com a nomenclatura presente no Eurocode 3 (2003).

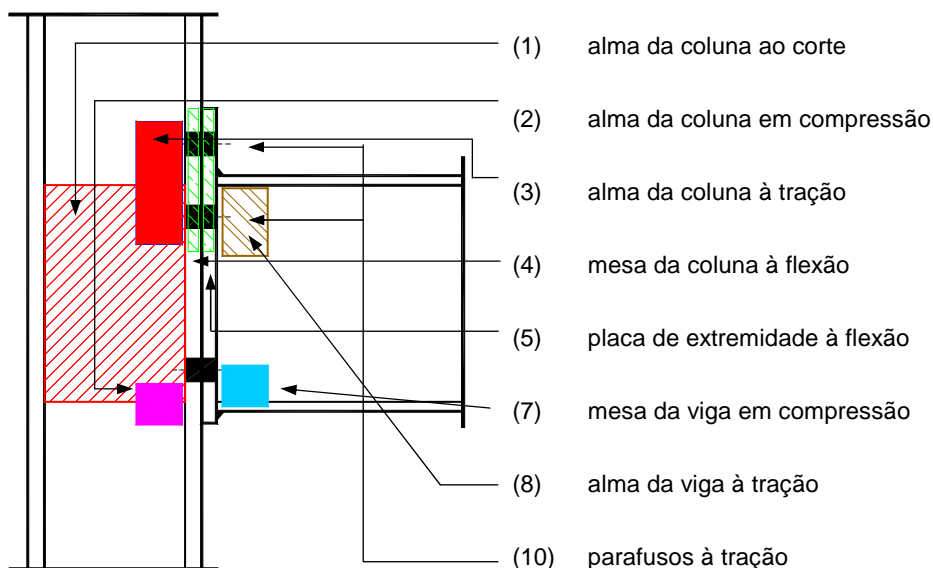


Figura 3: Componentes de uma ligação com placa de extremidade (Lima, 2003)

Algumas destas componentes são dependentes do número de linhas de parafusos na zona tracionada e da posição de cada linha de parafusos. Neste caso: mesa da coluna à flexão, placa de extremidade à flexão, parafusos à tração, alma da coluna à tração e mesa da coluna à tração. A contribuição destas componentes tem que ser avaliada considerando-se o comportamento de cada linha de parafusos individualmente, ou seja, independente de outras linhas de parafusos; e também como parte de um grupo, isto é, considerando a possível interação com outras linhas de parafusos.

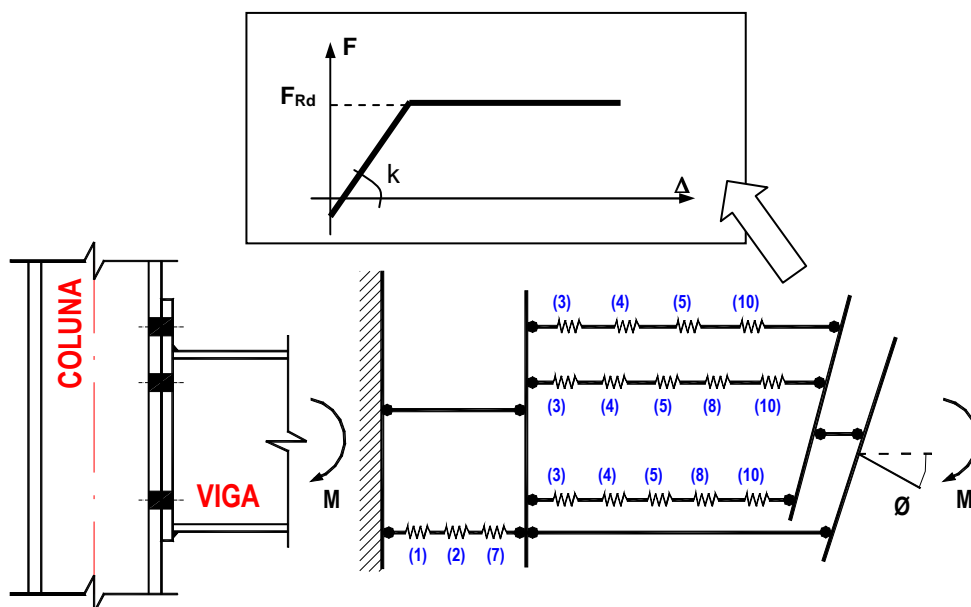


Figura 4: Modelo Mecânico – ligação com placa de extremidade estendida (Lima, 2003)

Com referência à ligação em estudo, o modelo mecânico adotado é apresentado na Figura 4

onde as componentes que influenciam tanto a resistência à flexão da ligação como também a rigidez à rotação, são representadas por meio de molas elasto-plásticas.

Assim, o objetivo deste artigo é a apresentação de um estudo numérico de uma ligação viga-coluna aparafusada com placa de extremidade estendida. Foram analisadas ligações sujeitas a momento fletor e ligações sujeitas a interação momento fletor - esforço normal. Os resultados numéricos foram comparados aos resultados experimentais, ao dimensionamento pelo Eurocode 3 (2003) e ao Modelo de Cerfontaine.

2 MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico foi baseado nos ensaios realizados por Lima (2003), para ligações viga-coluna com placa de extremidade estendida (ver Figura 6). O modelo estrutural é definido por uma ligação em nó externo, sendo a viga definida por uma seção transversal IPE240 e o pilar HEB240, ambos fabricados em aço S275, além de um perfil HEB 200 utilizado para travamento da sapata de reação. Estes perfis são apresentados na Figura 5. Adotou-se uma placa de extremidade com espessura de 15mm produzida com o mesmo tipo de aço. A ligação da viga com a placa de extremidade foi efetuada com solda de entalhe ($a_w=8\text{mm}$). Os parafusos eram M20 ($d=19,05\text{mm}$), classe 10.9, com rosca completa.

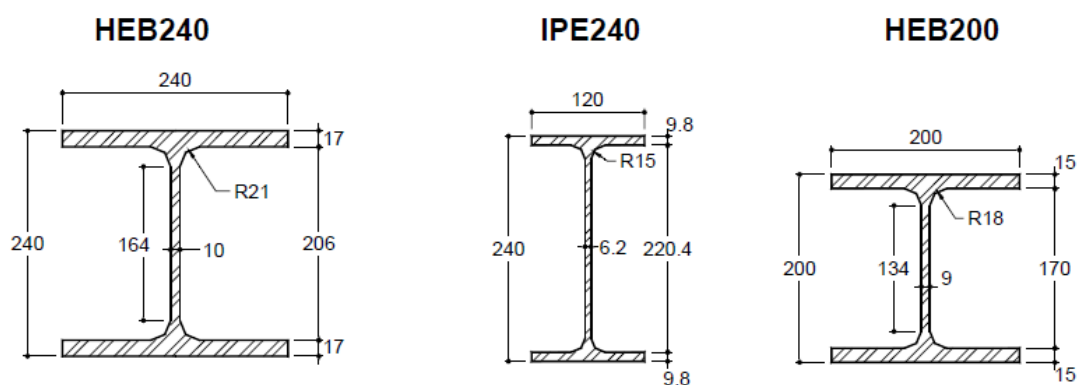


Figura 5: Dimensões dos perfis laminados IPE 2140, HEB 240 e HEB 200

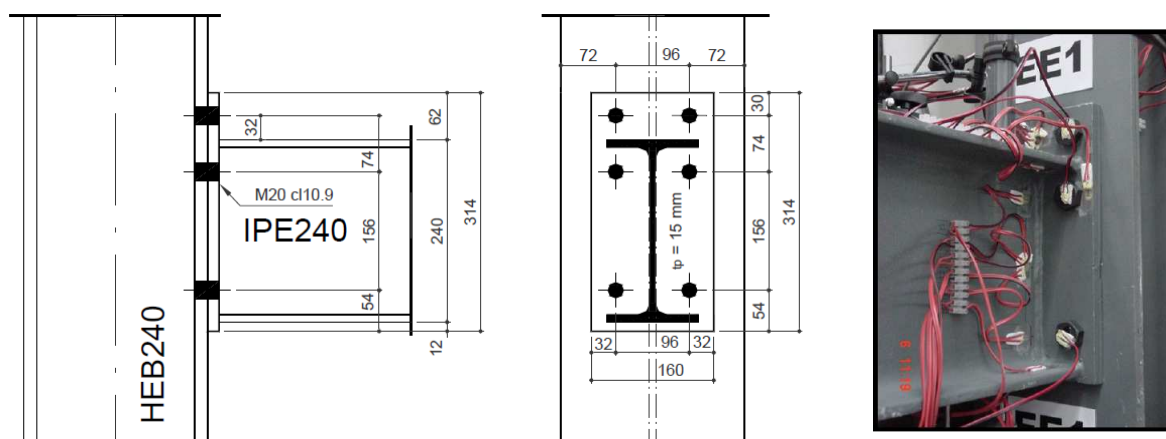


Figura 6: Ligação com placa de extremidade estendida (série EE)

2.1 Características do modelo

A simulação numérica foi realizada através do programa de elementos finitos ANSYS 11, considerando todos os elementos presentes na ligação viga-coluna. Para a constituição do modelo, foram utilizados diferentes tipos de elementos a saber: a viga, a coluna e os parafusos foram modelados através de elementos sólidos – SOLID 185. O enrijecedor da viga foi desenvolvido em elemento de casca – SHELL 181, por ter comportamento linear-elástico. Foi incorporado contato entre os elementos, para representar o fenômeno de interface entre os mesmos, inserido através de elementos TARGE 170 e CONTA 173 com coeficiente de atrito de 0,25: i) placa de extremidade – mesa da coluna; ii) cabeça do parafuso – placa de extremidade; iii) corpo do parafuso – placa de extremidade e mesa da coluna; iv) porca – mesa da coluna. A Figura 7 apresenta o modelo numérico estudado e o detalhe da ligação. Este modelo satisfaz o estudo de convergência da malha previamente efetuado. As espessuras da mesa da coluna, da placa de extremidade e da mesa da viga são definidas em três elementos. O modelo numérico do parafuso é constituído por cabeça, porca e corpo, tendo seu comprimento igual ao somatório das espessuras dos elementos que liga: placa de extremidade e mesa da viga. De forma a reduzir o número de superfícies de contato, considera-se os elementos do parafuso solidários.

No que se refere às condições de contorno, a mesa e a alma da coluna são restringidas nos eixo x e y, o deslocamento vertical da placa de extremidade está impedido e o eixo da mesa superior da viga está restringido lateralmente. A malha foi escolhida de modo que os elementos tivessem uma proporção e tamanho de forma a evitar problemas numéricos. A malha global é constituída por 73485 elementos e 86458 nós.

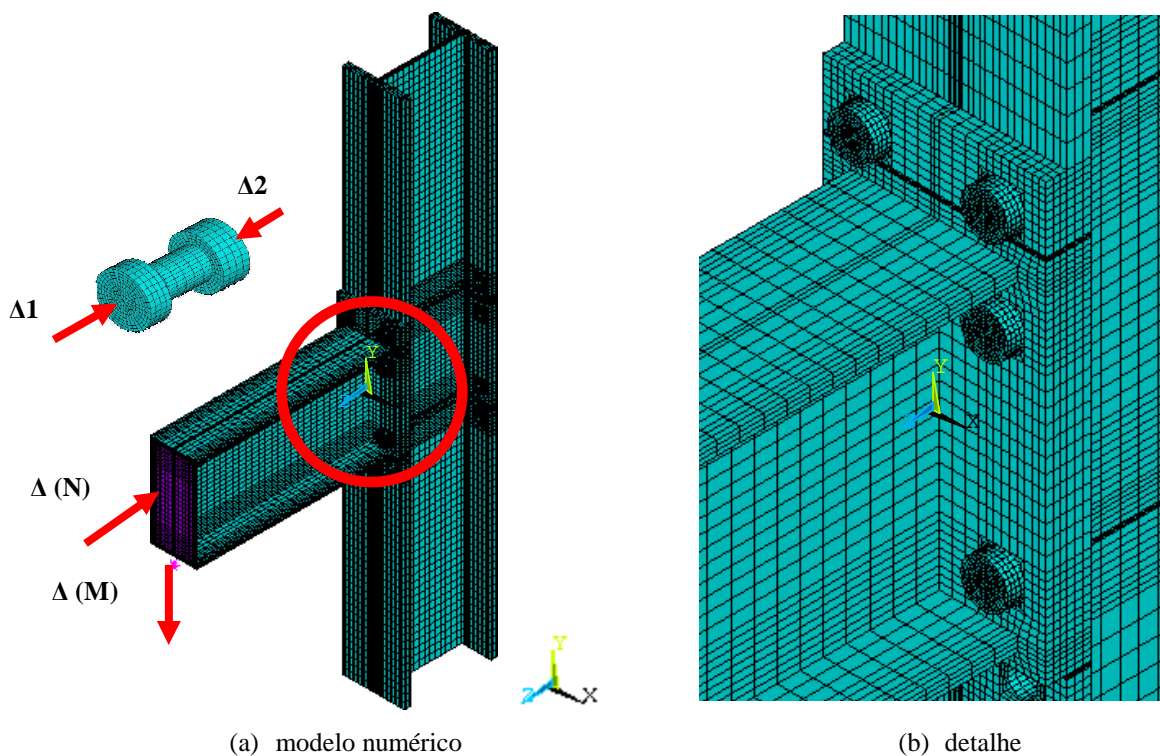


Figura 7: Ligação com placa de extremidade estendida (série EE)

2.2 Algoritmos numéricos e estratégias de análise não-linear

As condições em que se verifica a deformação plástica foram definidas através do critério de escoamento de Von Mises. Utilizou-se o método de Newton-Raphson para a resolução do sistema de equações não-lineares, que apesar de ser mais complicado em termos de cálculo, é o mais adequado, dada a não-linearidade do problema. O algoritmo de integração utilizado é do tipo implícito (*implicit backward Euler*), que garante a convergência quadrática do esquema de iteração associado ao método Newton-Raphson.

A não-linearidade geométrica dos elementos sólidos é baseada na formulação lagrangiana (*Total lagrangiana formulation*) que permite grandes deslocamentos e rotações. Nesta formulação, as grandezas envolvidas (tensões, deformações, forças exteriores, etc.) são definidas em relação à configuração deformada da estrutura. Esta formulação, intuitivamente pouco clara, é a mais utilizada porque é independente da deformação. Nesta formulação, a lei constitutiva do material é definida pela relação tensão-deformação utilizando uma definição logarítmica da extensão ($\sigma_n - \varepsilon_n$), em vez da lei constitutiva convencional. Estas duas grandezas relacionam-se através das seguintes expressões, descritas na Eq. (1):

$$\sigma_n = \sigma(1 + \varepsilon) \quad \text{e} \quad \varepsilon_n = \ln(1 + \varepsilon) \quad (1)$$

A Tabela 2 apresenta as características mecânicas dos materiais utilizados no modelo numérico, após a aplicação dos algoritmos numéricos, para correção destas propriedades em relação aos valores encontrados experimentalmente.

		f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)
CHAPAS	Alma da viga	364,08	545,10	203714
	Mesa da viga	340,68	537,89	215222
	Alma da coluna	372,69	572,76	206936
	Mesa da coluna	343,48	538,55	220792
	Placa de extremidade	370,12	604,14	2000248
PARAFUSOS	M20	943,88	1222,40	210000
ENRIJECEDOR	t= 10mm	1000		210000

Tabela 2: Propriedades mecânicas dos materiais.

ID	Momento Fletor kN.m	Esforço Normal	
		(% N_{pl} da viga)	kN
EE1	118,7	-	-
EE2	125,4	-10	-135,9
EE3	113,2	-20	-259,2
EE4	111,9	-27	-363,5
EE5	118,1	-15	-193,3
EE6	111,5	+10	+127,2
EE7	101,0	+20	+257,9

Tabela 3: Descrição dos carregamentos aplicados nos ensaios.

2.3 Casos de estudo

A Tabela 3 apresenta os casos analisados nos ensaios desenvolvidos por Lima (2003) e os respectivos carregamentos analisados nos ensaios experimentais, onde o esforço normal representa uma percentagem da resistência plástica da viga à força normal (1084 kN). O carregamento de flexão foi aplicado na extremidade da mesa inferior da viga, o carregamento normal ao longo da área da seção transversal da viga, e a protensão na cabeça e porca do parafuso. Todos os carregamentos foram reproduzidos sob a forma de deslocamentos. Os casos analisados numericamente estão marcados na tabela e correspondem aos ensaios EE1, EE2 e EE6.

3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS COMPONENTES

O dimensionamento da ligação de acordo com o Método das Componentes foi efetuado a fim de se comparar os resultados numéricos, experimentais e teóricos para o caso de aplicação de momento fletor, somente. Os coeficientes de resistência foram considerados iguais a 1,0.

	Componente		F _{Rd} (kN)	k / E (mm)
Componentes na região em compressão	(1)	alma da coluna ao corte	475,0	5,68
	(2)	alma da coluna à compressão	506,3	10,13
	(7)	mesa da viga à compressão	438,4	∞
linha 1 (h=267,1 mm)	(1)	alma da coluna ao corte	475,0	5,68
	(2)	alma da coluna à compressão	506,3	10,13
	(7)	mesa da viga à compressão	438,4	∞
	(3)	alma da coluna à tração	394,2	5,74
	(4)	mesa da coluna à flexão	375,5	31,21
	(5)	placa de extremidade à flexão	215,7	18,99
	(10)	parafusos à tração	441,0	7,76
linha 2 (h=193,1 mm)	(1)	alma da coluna ao corte	259,3	5,68
	(2)	alma da coluna à compressão	290,6	10,13
	(7)	mesa da viga à compressão	222,7	∞
	(3)	alma da coluna à tração	327,8	4,91
	(4)	mesa da coluna à flexão	375,5	26,70
	(5)	placa de extremidade à flexão	305,7	13,35
	(8)	alma da viga à tração	365,5	∞
	(10)	parafusos à tração	441,0	7,76
linha 3 (h=37,1 mm)	(1)	alma da coluna ao corte		5,68
	(2)	alma da coluna à compressão		10,13
	(7)	mesa da viga à compressão		∞
	(3)	alma da coluna à tração		7,03
	(4)	mesa da coluna à flexão		38,22
	(5)	placa de extremidade à flexão		11,42
	(8)	alma da viga à tração		∞
	(10)	parafusos à tração		7,76
$M_{j,Rd} = 215,7 \times 0,267 + 222,7 \times 0,193 = 100,6 \text{ kN.m}$ $S_{j,ini} = 22740,4 \text{ kN.m/rad}$ e $S_{i,ini} / \eta = 11370,2 \text{ kN.m/rad}$				

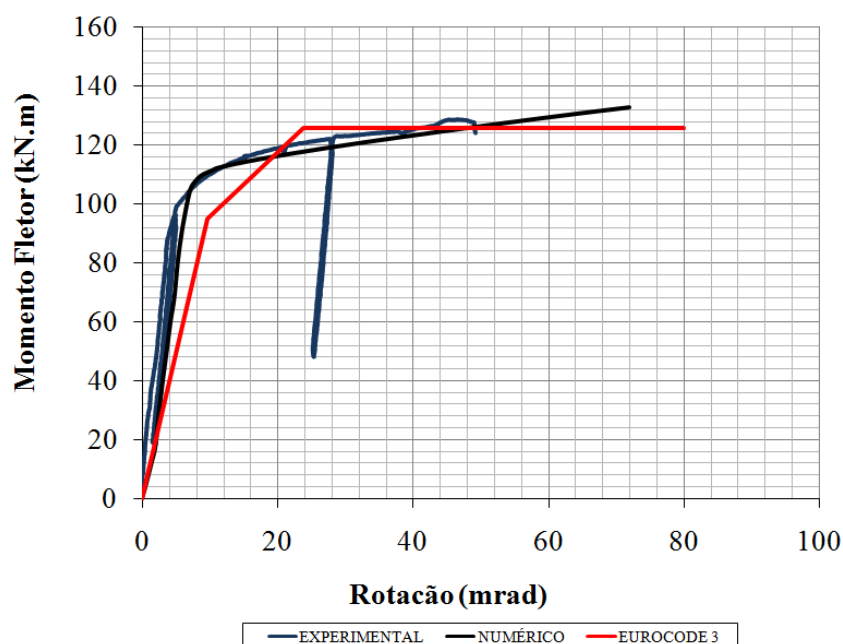
Tabela 4: Dimensionamento das componentes – Ensaios EE.

Na Tabela 4 apresentam-se os valores individuais de resistência e de rigidez de cada componente para a ligação considerada, onde o esforço normal representa uma porcentagem da resistência plástica da viga à força normal (1084kN). Para a terceira linha de parafusos, não foi efetuado o cálculo do valor de sua contribuição na resistência global da ligação porque, segundo o Eurocode 3 (2003), se a altura de uma linha de parafusos em tração é inferior a 40% da altura da linha de parafusos mais afastada, esta pode ser desprezada no dimensionamento. Pode-se perceber que as componentes críticas são a placa de extremidade à flexão (5) (zona tracionada) e a mesa da viga em compressão (7) (zona em compressão).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ligação sujeita a momento fletor

O primeiro ensaio utilizado para calibração do modelo foi o EE01, onde é aplicado apenas o momento fletor. A Figura 8 apresenta as curvas momento *versus* rotação para esta ligação, onde verifica-se uma boa concordância entre o resultado numérico e experimental. Nas Figuras 11 e 12 - item (a) - apresenta-se para o ensaio EE1, a distribuição das tensões de *Von Mises* em três níveis diferentes de momento fletor aplicado: 30, 120 e 130 kN.m. Quanto ao escoamento, observa-se que a seqüência de escoamento das componentes é compatível com o previsto pelos cálculos baseados no Eurocode 3, ou seja, primeiro verifica-se o escoamento da placa de extremidade à flexão, seguido pela mesa da viga a compressão.



	— EXPERIMENTAL	— NUMÉRICO	— EUROCODE 3
$M_{j,Rd}^{exp}$	118,7 kN.m	$S_{j,ini}^{exp}$	26933,0 kN.m/rad
$M_{j,Rd}^{num}$	112,1 kN.m	$S_{j,ini}^{num}$	18336,0 kN.m/rad
$M_{j,Rd}^{EC3}$	100,6 kN.m	$S_{j,ini}^{EC3}$	22740,4 kN.m/ rad

Figura 8: Curva momento *versus* rotação – Ensaio EE1 (somente momento).

Na curva numérica, observa-se que a partir do momento fletor de aproximadamente 110 kN.m, a linha inicial da curva deixa de ser linear, e a partir deste ponto, começam a se formar zonas plastificadas na placa de extremidade em flexão, conforme os resultados obtidos experimentalmente. Para o segundo nível de momento analisado, já é possível verificar-se a

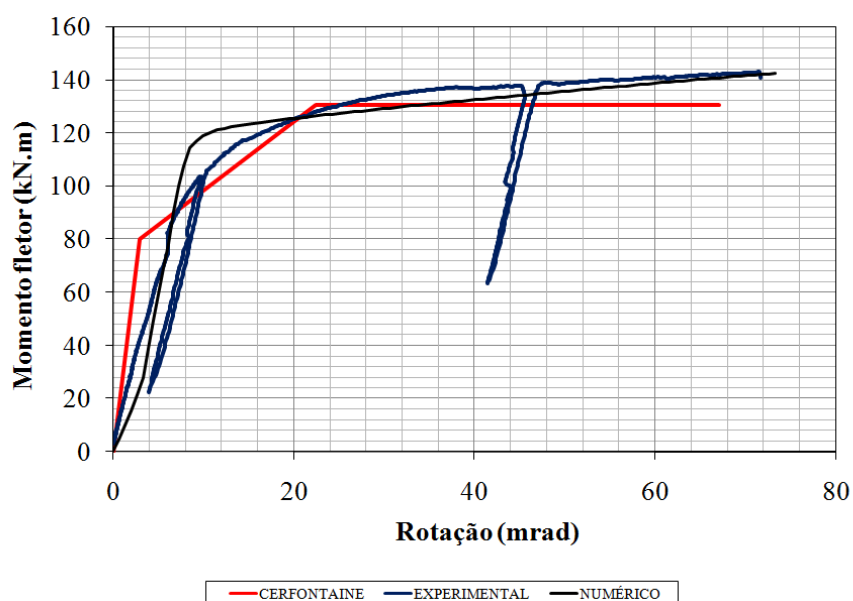
plastificação da mesa da viga a compressão.

4.2 Ligação sujeita a momento fletor e esforço normal

Neste item, apresentam-se os resultados numéricos para a situação de aplicação de momento fletor e esforço normal. Nestes modelos, seguindo o procedimento adotado nos ensaios experimentais, aplicou-se primeiro o esforço normal para depois aplicar-se o momento fletor. As curvas momento *versus* rotação para os ensaios estudados são apresentadas da Figura 9 a Figura 10 onde pode-se verificar uma boa concordância entre os ensaios experimentais e os resultados numéricos. A Figura 11 e a Figura 12 representam a distribuição de tensões de Von Mises para os três níveis de momento fletor aplicado, considerando-se os três casos estudados, para comparação: somente momento fletor (EE1), esforço axial de compressão (EE2) e esforço axial de tração (EE6).

Observando-se a Figura 13, onde são apresentadas as curvas momento *versus* rotação dos modelos numéricos estudados, verifica-se que com o aumento do esforço normal de compressão aplicado à ligação, obtém-se um aumento na resistência à flexão da mesma. Porém, com a aplicação do esforço normal a tração, para o nível estudado, há pequena modificação da resistência, quando comparada aos resultados encontrados para a aplicação de momento fletor somente.

Comparando os resultados obtidos para os ensaios relativos a aplicação de momento fletor somente e a adição de esforço axial à compressão (EE1 e EE2), pode-se verificar que a presença de esforço axial de compressão retarda o escoamento da primeira componente, fato verificado através da Figura 13 e da Figura 14, onde são apresentadas as curvas momento *versus* rotação obtidas nos ensaios experimentais. A menor resistência ao momento fletor obtida no ensaio EE2 deve-se ao fato de que o escoamento da segunda componente, ou seja, a mesa da viga em compressão (7), ocorreu imediatamente após ao escoamento da primeira componente.



$M_{j,Rd}^{exp}$	125,4 kN.m	$S_{j,ini}^{exp}$	14923,0 kN.m/rad
$M_{j,Rd}^{num}$	122,0 kN.m	$S_{j,ini}^{num}$	17853,0 kN.m/rad

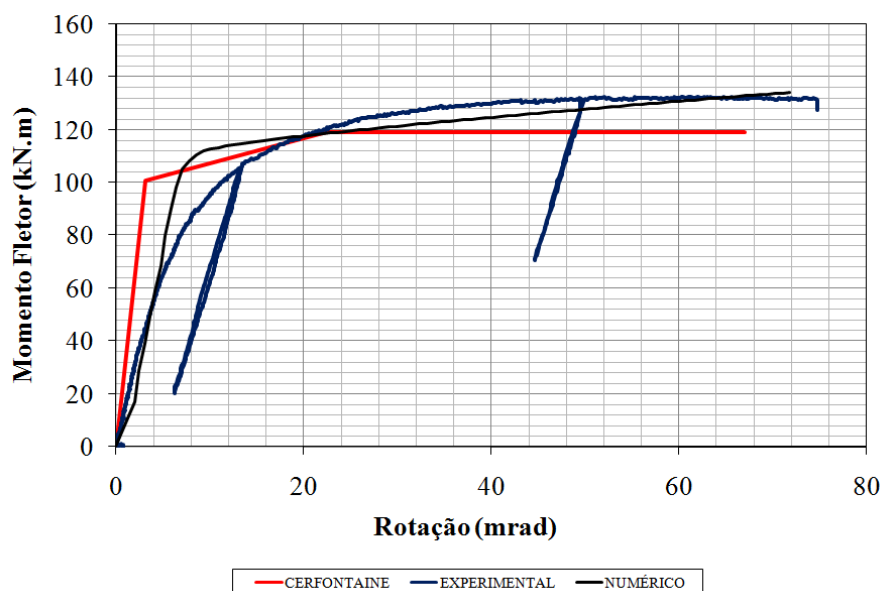
Figura 9: Curva momento *versus* rotação – Ensaio EE2 ($N=-10\% N_{pl}=-125,4$ kN).

Para o ensaio EE6, verifica-se que o modelo numérico fornece valores de rigidez inicial superiores aos modelos experimentais, mas em termos de momento fletor, os resultados se mostraram razoáveis. Este aumento de resistência também foi observado nos ensaios experimentais, apesar das diferenças observadas nas curvas momento *versus* rotação quando comparadas individualmente com os valores obtidos numericamente. Isto deve-se ao fato de que as componentes das zonas comprimidas, mesmo tendo um acréscimo de força aplicada, não atingem seus valores limites de resistência e, conseqüentemente, as componentes em tração são aliviadas pelo esforço normal à compressão.

Para os ensaios à compressão é possível verificar que com o aumento do esforço normal aplicado a ligação obtém-se um aumento da resistência à flexão da mesma. Para o ensaio à tração, ocorre o efeito contrário, ou seja, há um decréscimo de nível para o momento obtido, diminuindo a resistência a flexão da ligação.

O modelo numérico apresentou rigidez superior ao ensaio experimental, porém para a resistência à flexão, os resultados obtidos mostraram-se próximos ao experimental. Pode-se verificar que, com o aumento do esforço normal aplicado na ligação, a componente placa de extremidade à flexão deixa de ser a mais solicitada, passando a controlar o dimensionamento, a mesa inferior da viga à compressão. Estes resultados também foram observados experimentalmente, porém, devido às condições de contorno impostas ao modelo, não foi possível verificar-se este efeito com tanta intensidade no modelo numérico.

A Figura 11 e a Figura 12 apresentam a evolução das tensões de *Von Mises* para três níveis de momento fletor: 30 kN.m, 120 kN.m e 130 kN.m. Para o ensaio EE02 é possível verificar que a placa de extremidade já apresenta pontos de plastificação no primeiro ponto estudado, com a mesa inferior da viga, sofrendo o escoamento no segundo nível de momento fletor avaliado.



$M_{j,Rd}^{exp}$	111,5 kN.m	$S_{j,ini}^{exp}$	10275,0 kN.m/rad
$M_{j,Rd}^{num}$	113,9 kN.m	$S_{j,ini}^{num}$	18132,0 kN.m/rad

Figura 10: Curva momento versus rotação – Ensaio EE6 (N=+10% Npl=+11,5 kN).

Comparando-se os resultados experimentais encontrados, verifica-se que com o aumento do esforço normal aplicado, retarda-se a plastificação da placa de extremidade à flexão, passando a componente da mesa inferior da viga à compressão a controlar o dimensionamento.

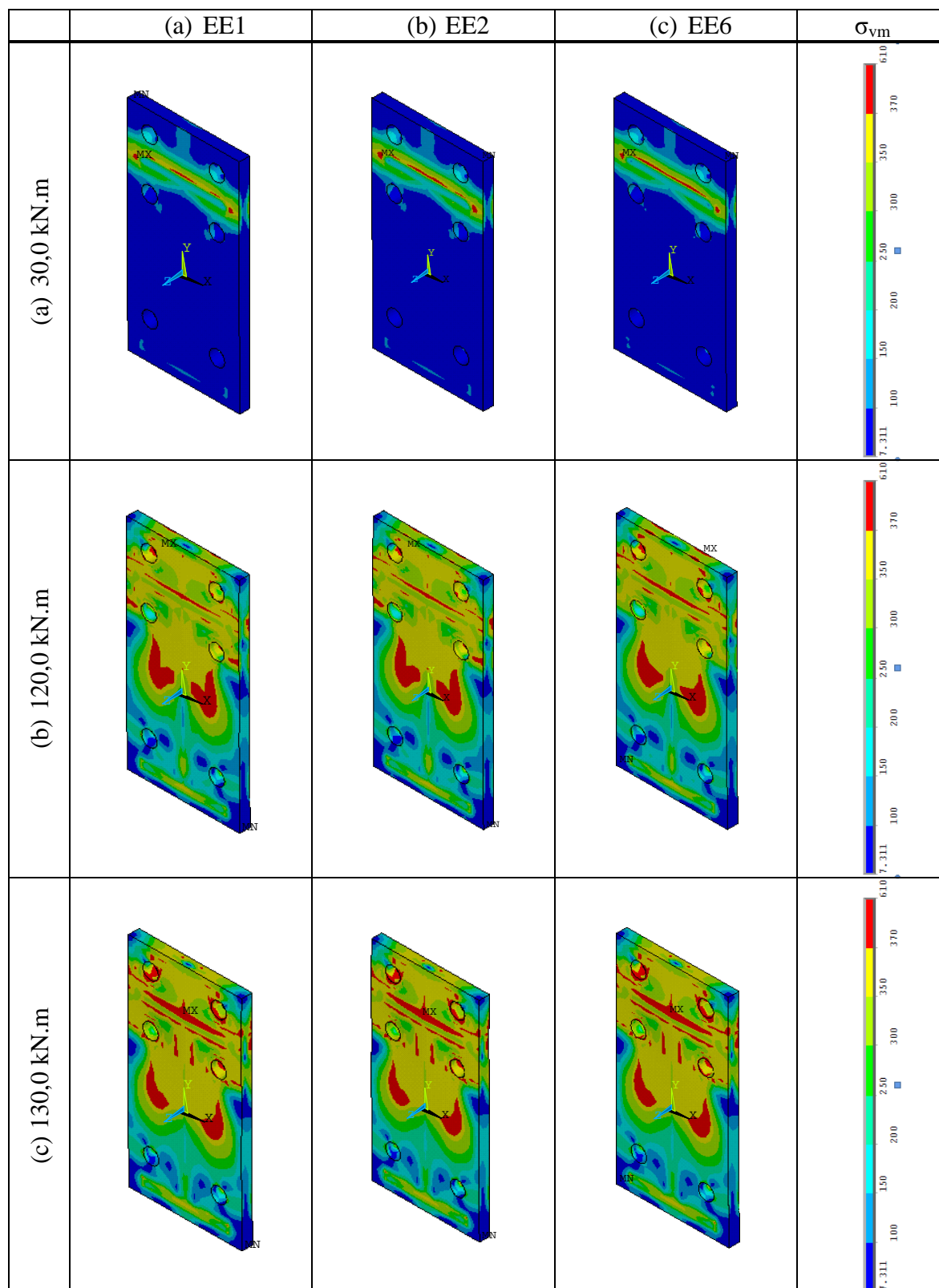


Figura 11: Distribuição de tensões de Von Mises – Placa de extremidade à flexão (em MPa).

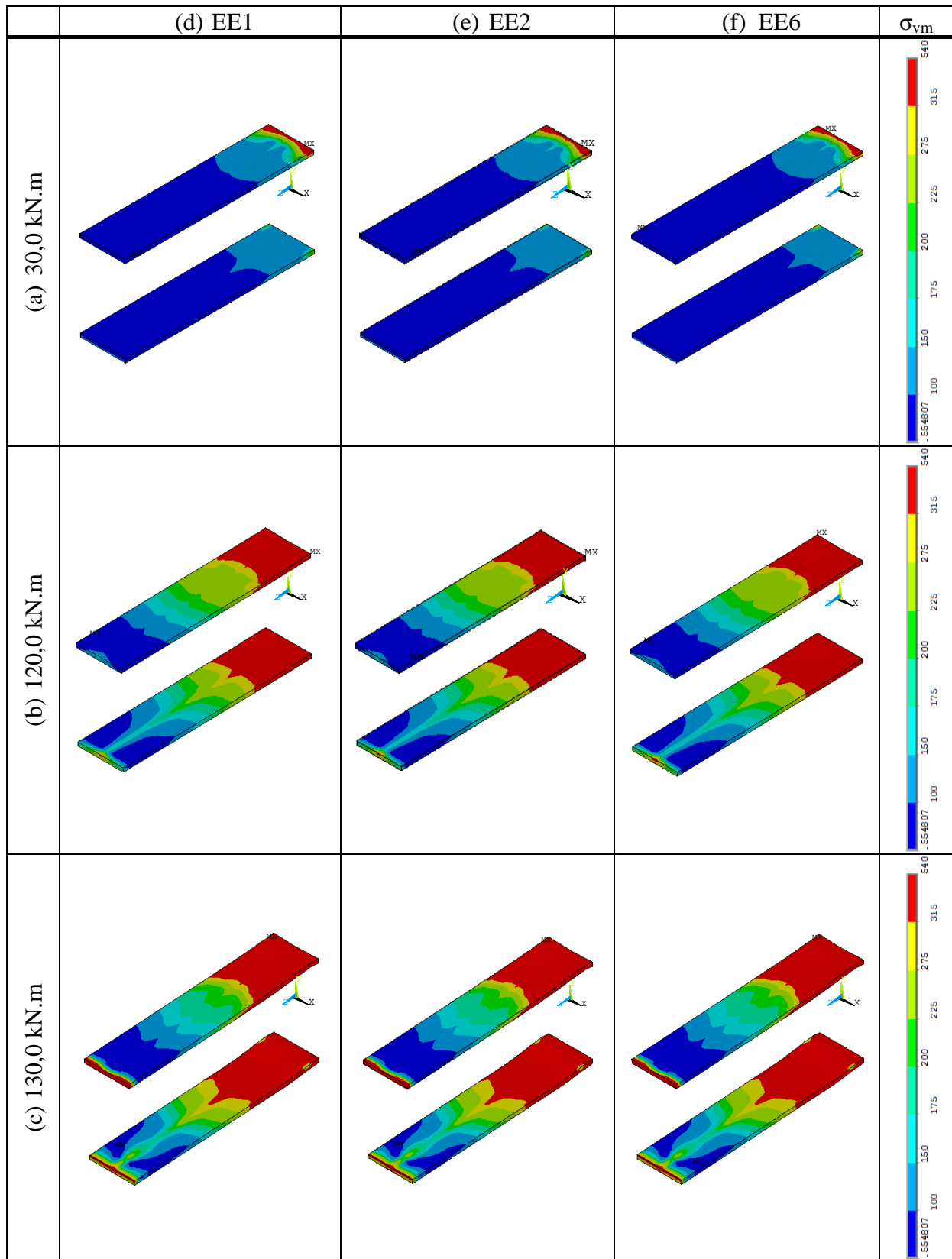


Figura 12: Distribuição de tensões de Von Mises – Mesa da viga à compressão (em MPa).

Comparando-se os resultados numéricos aos experimentais é possível observar-se que para os modelos EE2 e EE6, os resultados foram próximos, com valores numéricos superiores aos obtidos pelo Modelo de Cerfontaine.

A Tabela 05 apresenta os resultados comparativos entre os valores numéricos e experimentais encontrados para os modelos estudados.

Ensaio	$M_{j,Rd}^{exp}$	$M_{j,rd}^{num}$	$M_{j,Rd}^{exp}$	$S_{j,ini}^{exp}$	$S_{j,ini}^{num}$	$S_{j,ini}^{exp}$
	(kN.m)	(kN.m)	$M_{j,rd}^{num}$	(kN.m/rad)	(kN.m/rad)	$S_{j,ini}^{num}$
EE1	118,7	112,1	1,06	26933,0	18336,0	1,50
EE2	125,4	122,0	1,03	14923,0	17853,0	0,84
EE6	111,5	113,9	0,98	10275,0	18132,0	0,60

Tabela 5: Comparação dos resultados encontrados.

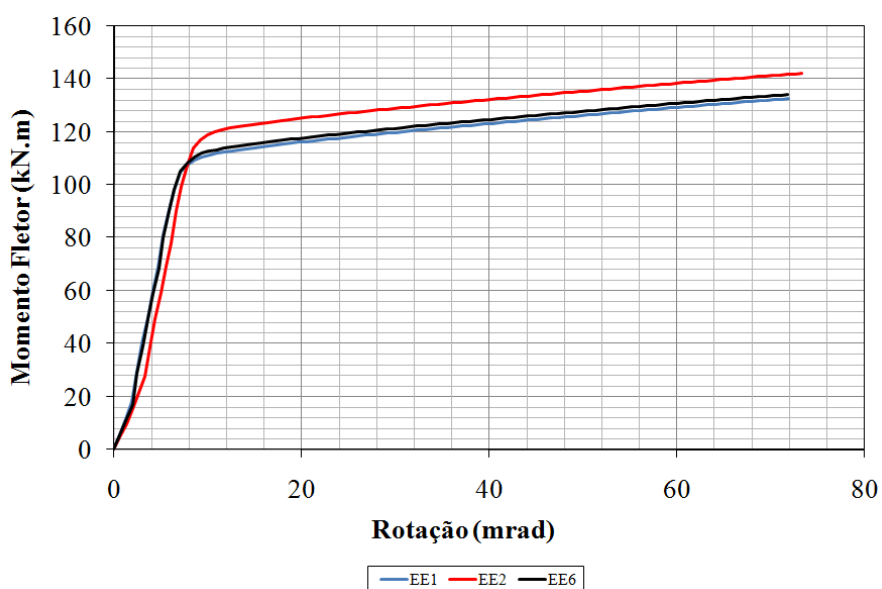


Figura 13: Curva momento *versus* rotação – Modelo Numérico

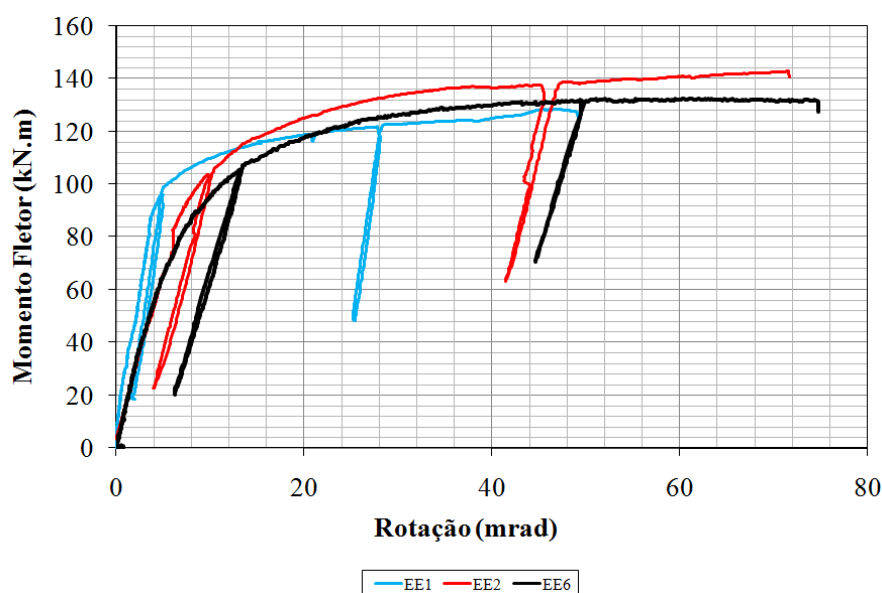


Figura 14: Curva momento *versus* rotação – Modelo Experimental

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um modelo numérico para estudo do comportamento de ligações viga-coluna com placa de extremidade estendida submetidas a momento fletor e esforço normal.

Para tanto foi utilizado o procedimento de dimensionamento de ligações semi-rígidas proposto pelo Eurocode 3, através dos modelos mecânicos. Estes modelos são baseados na simulação da ligação através da utilização de um conjunto de componentes rígidos e flexíveis. Porém, esta metodologia de cálculo tem uma limitação empírica de 5% da resistência plástica da viga como esforço axial máximo, para o qual os procedimentos disponíveis se mantêm aplicáveis. Para que se pudesse avaliar os resultados para valores não inseridos nestes limites, foram desenvolvidos os modelos experimentais e numéricos, que também foram comparados ao Modelo de Cerfontaine, para avaliação dos casos não cobertos pelo Eurocode 3.

De acordo com os valores obtidos pode-se verificar que os valores experimentais para a rigidez inicial das ligações foram inferiores aos obtidos numericamente, para os casos de aplicação do esforço normal, exceto para o ensaio EE1.

A presença do esforço axial nos ensaios de ligações com placa de extremidade estendida modificou a resposta da ligação no que diz respeito à resistência à flexão das mesmas. O ensaio que apresentou maior momento resistente, foi o EE2, para um nível de esforço axial de compressão equivalente a 10% da resistência plástica da viga.

Nos cenários que consideram a presença de esforço normal na ligação, os resultados numéricos mostraram-se mais rígidos que os obtidos experimentalmente; no entanto, as diferenças encontradas não devem invalidar os resultados.

Os resultados numéricos bem como os experimentais, evidenciaram que quando as ligações estão sujeitas a momento fletor e esforço normal de compressão, este último pode ser favorável no aumento da resistência da ligação e conseqüentemente permitir a utilização de configurações de ligações mais econômicas. Todavia, para níveis mais elevados de esforço normal de compressão, a resistência à flexão da ligação pode diminuir como verificado experimentalmente.

Os desenvolvimentos futuros neste trabalho de investigação passam pela modelagem dos demais casos ensaiados experimentalmente e revisão da modelagem numérica. Este cenário levará à diminuição na resistência à flexão da ligação uma vez que o aumento de esforço normal conduzirá ao escoamento da componente mesa da viga à compressão, componente crítica no dimensionamento da região comprimida.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a UERJ, ao CNPq e a CAPES, pelo apoio financeiro. Agradecimentos também são devidos ao LABCIV - Laboratório de Computação da Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UERJ pelo suporte computacional.

REFERÊNCIAS

- Ansys, Inc. Theory Reference (version 11), 2008.
- Bursi, O. and Jaspart, J. P., 1997. Calibration of a Finite Element Model for Isolated Bolted End-Plate Steel Connections *Journal of Constructional Steel Researchers*, vol. 44, n° 3, pp. 225-262.
- Cerfontaine, F., 2001. Etude analytique de l'interaction entre moment de flexion et effort normal dans les assemblages boulonnés, *Construction Métallique*, n° 3, p. 1 -25, 2001.
- Eurocode 3, prEN 1993-1.8, 2003. Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints (“final draft”), CEN, European Committee for Standardisation, Brussels.
- Jaspart, J. P., 1997. Recent Advances in the Field of Steel Joints Column Bases and Further Configurations for Beam-to-Column Joints and Beam Splices, 353 f. Chercheur qualifié du F.N.R.S., Université de Liège, Belgique, 1997.
- Lima, L.R.O, 2003. Comportamento de Ligações com Placa de Extremidade em Estruturas de Aço Submetidas a Momento Fletor e Força Axial, 267f. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003.
- Nunes, P.C. da L, 2006. Análise Paramétrica de Ligações com Placa de Extremidade em Estruturas de Aço Submetidas a Momento Fletor e Força Axial, 136f. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, UERJ, Rio de Janeiro, 2006.
- Rodrigues, M.C.,2009. Modelagem Numérica de Ligações Viga-Coluna em Aço Sob Momento Fletor e Força Normal, 178f. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, UERJ, Rio de Janeiro, 2009.
- Santiago, A., Lima, L. R. O. de, Silva, L. S. da, Jordão, S., 2007. Análise Numérica de Ligações Viga-Pilar submetidas a Momento Fletor e Esforço Axial, CILAMCE, 2007.