

## MODELAGEM NUMÉRICA DE LIGAÇÕES VIGA-COLUNA EM AÇO SOB MOMENTO FLETOR E FORÇA NORMAL

**Monique Cordeiro Rodrigues**

**Luciano Rodrigues Ornelas de Lima**

**Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco**

**Sebastião Arthur Lopes de Andrade**

*moniquecordeiorodrigues@gmail.com*

*lucianolima@uerj.br*

*vellasco@eng.uerj.br*

*seb.andrade@uol.com.br*

Departamento de Estruturas e Fundações, UERJ, Brasil

**José Guilherme Santos da Silva**

*jgss@eng.uerj.br*

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

**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 se desenvolve 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 ajustada 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.*

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

# 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.

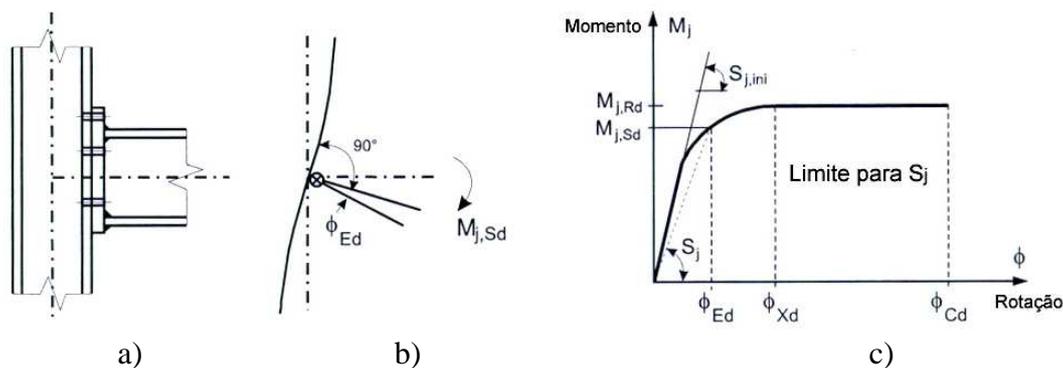
Atualmente, sabe-se que o comportamento real das ligações encontra-se entre duas situações extremas: rígidas ou flexíveis. Avaliando-se o momento fletor e a rotação associada de uma ligação viga-coluna, uma ligação é classificada como rígida quando os membros ligados por ela sofrem a mesma rotação. Desta 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.

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 (Wald & Svarc, Lima *et al*, Silva *et al*) e de abordagens teóricas (Jaspart, Laurent, Cerfontaine e Silva & Coelho), 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 1. O projeto de uma ligação deve definir três propriedades básicas: momento resistente,  $M_{j,Rd}$ ; rigidez inicial rotacional,  $S_{j,ini}$ ; capacidade de rotação,  $\phi_{Cd}$ .

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  $\eta$  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 1 – Propriedades para dimensionamento de uma ligação**

**Tabela 1 – Coeficiente de modificação de rigidez  $\eta$**

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

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 2 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).

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.

Com referência à ligação em estudo, o modelo mecânico adotado é apresentado na Figura 3 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 ajustada. 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 e ao Modelo de Cerfontaine.

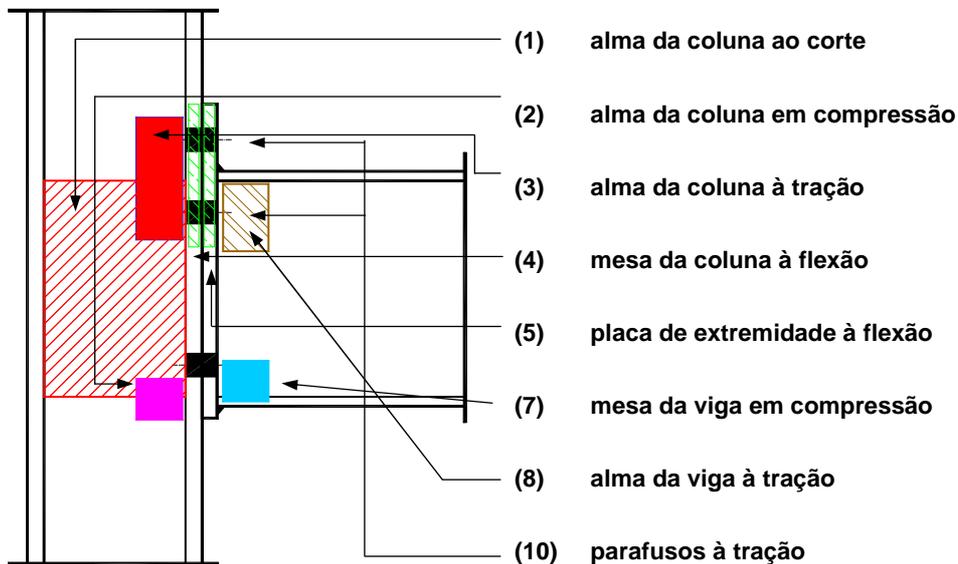


Figura 2 – Componentes de uma ligação com placa de extremidade (Faella *et al*, 2000)

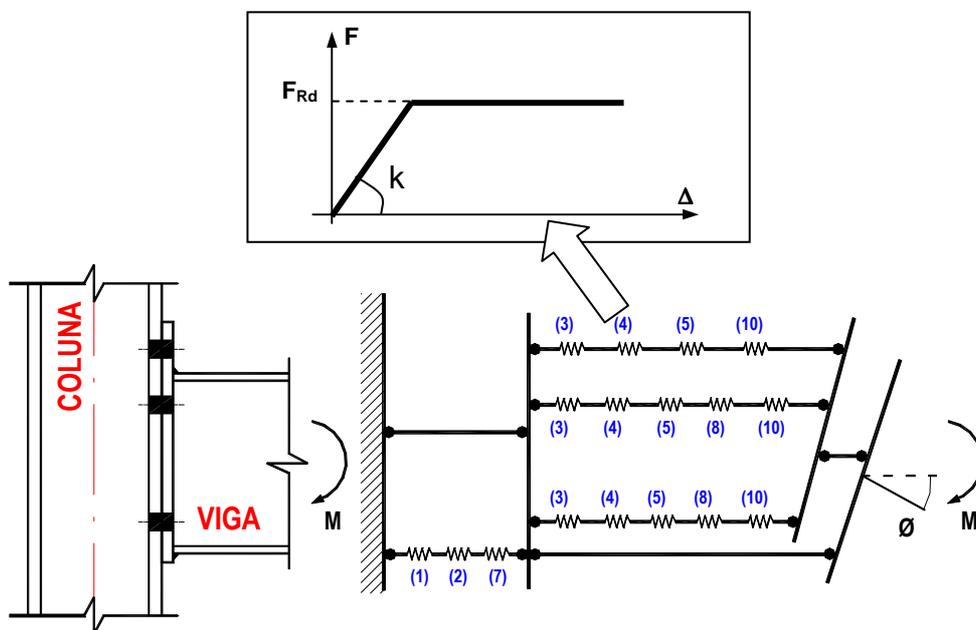


Figura 3 – Modelo mecânico – ligação com placa de extremidade estendida (Lima *et al*, 2004)

## 2 MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico foi baseado nos ensaios realizados por Lima (2003), para ligações viga-coluna com placa de extremidade ajustada à altura da viga (ver Figura 4). 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. 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.

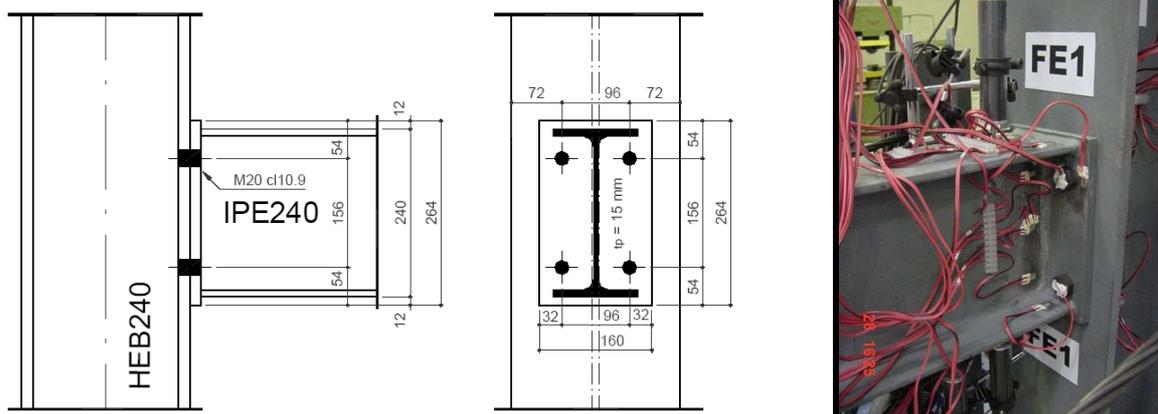


Figura 4 – Ligação com placa de extremidade ajustada (série FE)

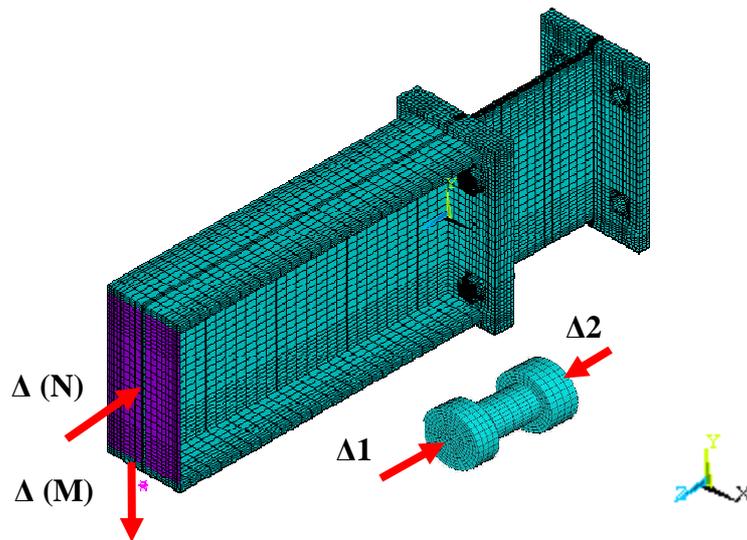
### 2.1 Características do modelo

A simulação numérica foi realizada através do programa de elementos finitos ANSYS 11, considerando todos os elementos de composição da ligação viga-coluna. Para a constituição do modelo, foram utilizados diferentes tipos de elementos: 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 e 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 5 apresenta o modelo numérico estudado. Este modelo satisfaz o estudo de convergência da malha previamente efetuado. A espessura da mesa da coluna, da placa de extremidade e da mesa da viga é definida 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 36958 elementos e 41952 nós.

## 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.



**Figura 5 – Ligação com placa de extremidade ajustada (série FE)**

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 original 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 ( $\sigma_n - \epsilon_n$ ), em vez da lei constitutiva convencional utilizada vulgarmente. Estas duas grandezas relacionam-se através das seguintes expressões, descrita na Eq. (1):

$$\sigma_n = \sigma(1 + \epsilon) \quad \text{e} \quad \epsilon_n = \ln(1 + \epsilon) \quad (1)$$

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

## 2.3 Casos de estudo

A Tabela 3 apresenta um resumo dos casos analisados e os respectivos carregamentos. 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.

**Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos materiais**

		$f_y$ (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	200248
PARAFUSOS	M20	943,88	1222,40	210000
ENRIJECEDOR	t = 10 mm	1000		210000

**Tabela 3 – Descrição dos carregamentos aplicados nos ensaios**

ID	Momento Fletor kN.m	Esforço Normal	
		(% $N_{pl}$ da viga)	(kN)
FE1	72,2	-	-
FE3	77,2	-4%	-52,7
FE5	80,5	-20%	-265,0
FE6	72,3	-27%	-345,0
FE8	61,7	+10%	+130,6

### 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. 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 percentagem da resistência plástica da viga à força normal (1084kN). Pode-se perceber que a componente que controla o dimensionamento na zona tracionada é a placa de extremidade à flexão (5) e na zona comprimida, a mesa da viga em compressão (7).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Ligação sujeita a momento fletor

O primeiro ensaio utilizado para calibração do modelo foi o FE01, onde é aplicado apenas o momento fletor. A Figura 6 apresenta as curvas momento *versus* rotação para esta ligação onde verifica-se uma boa concordância entre o resultado numérico e experimental. Apresenta-se ainda a seqüência de escoamento obtida a partir da leitura dos extensômetros: placa de extremidade à flexão, mesa da viga à compressão e parafusos à tração. Na curva numérica, observa-se que a partir do momento fletor de 49,6 kN.m, a linha inicial da curva deixa de ser linear, a partir deste ponto, começam a se formar zonas plastificadas na placa de extremidade em flexão, conforme pode ser visualizado na Figura 7, confirmando os resultados obtidos experimentalmente. A mesa da viga em compressão começa a plastificar para um nível de momento fletor de 65,9 kN.m, a partir deste nível de carregamento as tensões de *Von Mises* para esta componente atingem a tensão de escoamento.

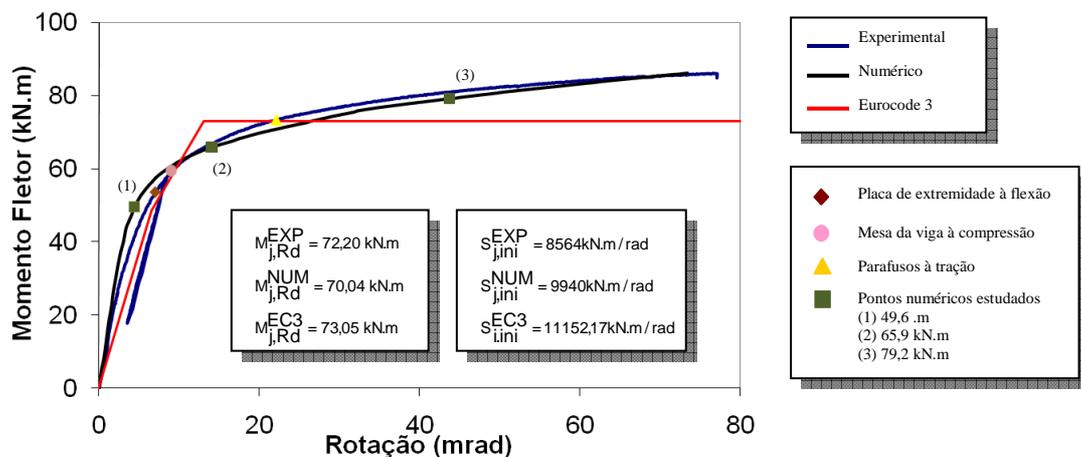
A Figura 8 apresenta a avaliação das curvas momento *versus* deformação. Para o comportamento da placa de extremidade à flexão (5) foi avaliada através dos extensômetros 23 e 24, localizados na placa de extremidade na lateral do furo para o parafuso.

**Tabela 4 – Dimensionamento da ligação sujeita a momento fletor somente**

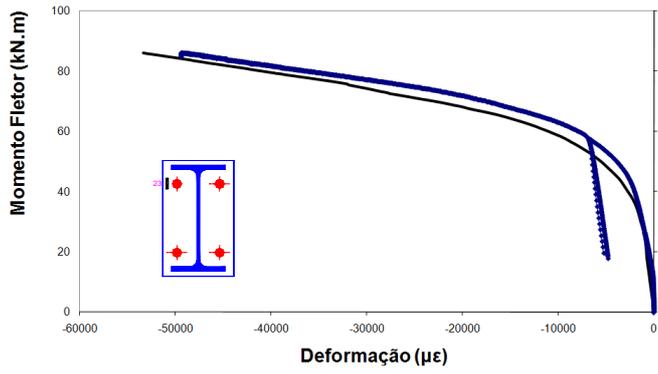
		Componente	$F_{Rd}$ (kN)	k/E (mm)
Componentes na região em compressão	(1)	Alma da coluna ao corte	494,8	8,43
	(2)	Alma da coluna à compressão	690,7	10,40
	(7)	Mesa da viga à compressão	444,3	$\infty$
Linha 1 (h=193,1mm)	(1)	Alma da coluna ao corte	642,6	8,43
	(2)	Alma da coluna à compressão	690,7	10,40
	(7)	Mesa da viga à compressão	542,3	$\infty$
	(3)	Alma da coluna à tração	533,3	7,03
	(4)	Mesa da coluna à flexão	408,3	40,47
	(5)	Placa de extremidade à flexão	339,3	13,35
	(8)	Alma da viga à tração	483,0	$\infty$
Linha 2 (h=37,1mm)	(10)	Parafusos à tração	441,0	7,76
	(1)	Alma da coluna ao corte	303,2	8,43
	(2)	Alma da coluna à compressão	351,4	10,40
	(7)	Mesa da viga à compressão	203,0	$\infty$
	(3)	Alma da coluna à tração	533,3	7,03
	(4)	Mesa da coluna à flexão	408,3	40,47
	(5)	Placa de extremidade à flexão	339,3	13,35
	(8)	Alma da viga à tração	483,0	$\infty$
	(10)	Parafusos à tração	441,0	7,76
$M_{j,Rd} = 339,3 \times 0,193 + 203 \times 0,037 = 73,05 \text{ kN.m}$				
$S_{j,ini} = 11152,2 \text{ kN.m/rad}$ e $S_{j,ini}/\eta = 5576,1 \text{ kN.m/rad}$				

#### 4.2 Ligação sujeita a momento fletor e esforço normal

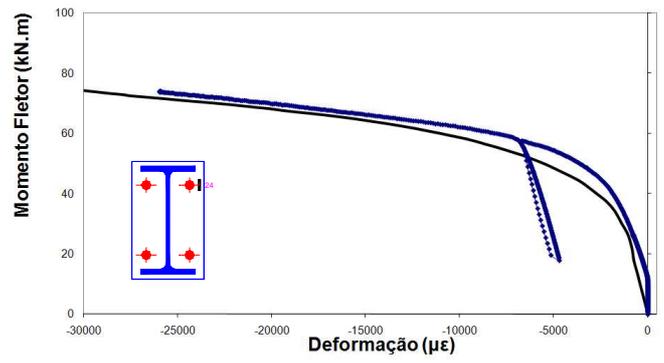
Neste item, apresentam-se os resultados numéricos para a situação de aplicação de momento fletor e esforço normal. Nestes modelos, seguindo o procedimento adotado nos ensaios experimentais, aplicou-se primeiro o esforço normal para depois se aplicar o momento fletor. As curvas momento *versus* rotação para os ensaios estudados são apresentadas da Figura 9 a Figura 12.



**Figura 6 – Curva momento *versus* rotação – Ensaio FE01 – somente M**

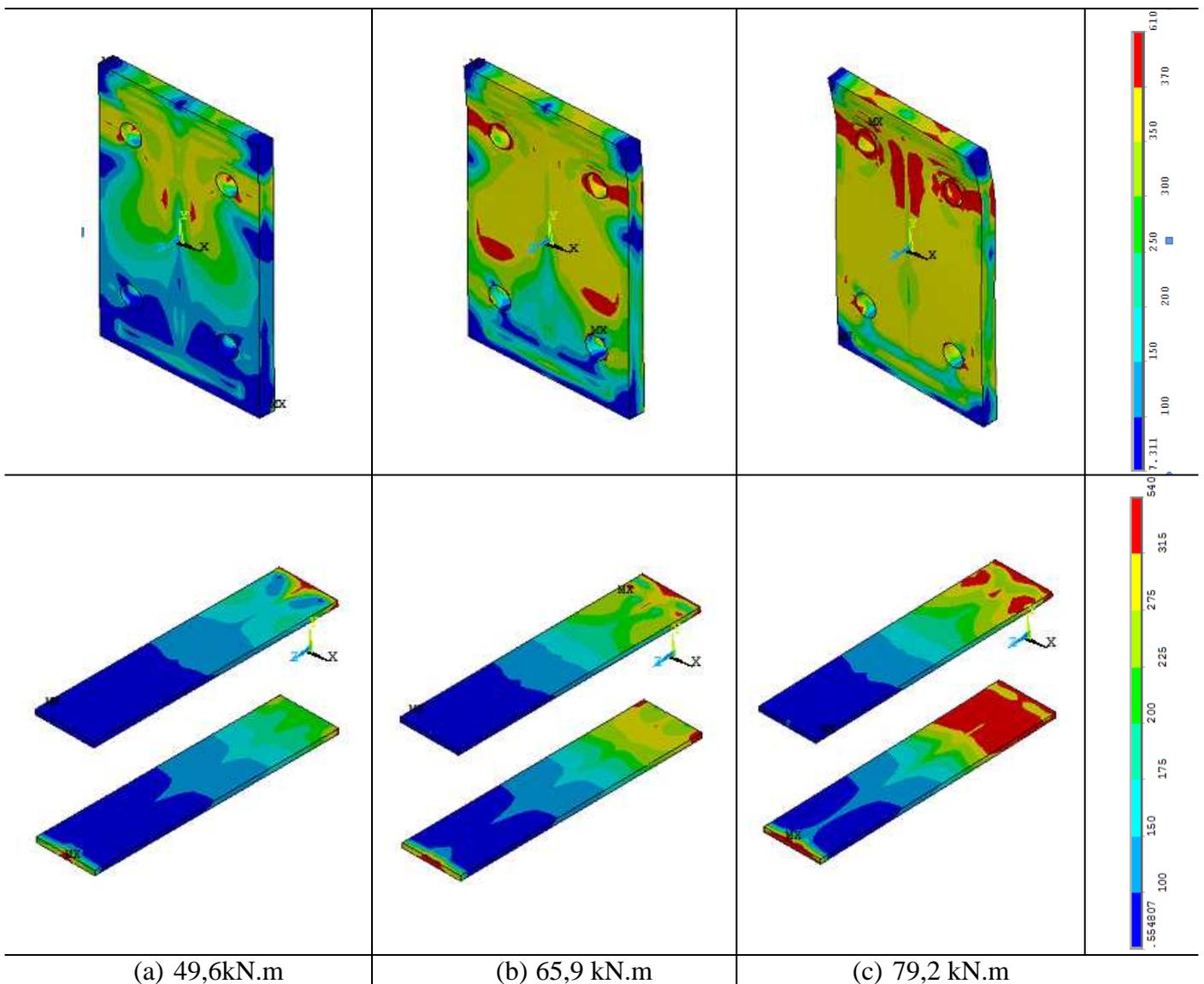


(a) Extensômetro 23



(b) Extensômetro 24

**Figura 7 – Curva momento *versus* deformação – Ensaio FE01 – somente M**



(a) 49,6kN.m

(b) 65,9 kN.m

(c) 79,2 kN.m

**Figura 8 – Distribuição de tensões de *Von Mises* (em MPa)**

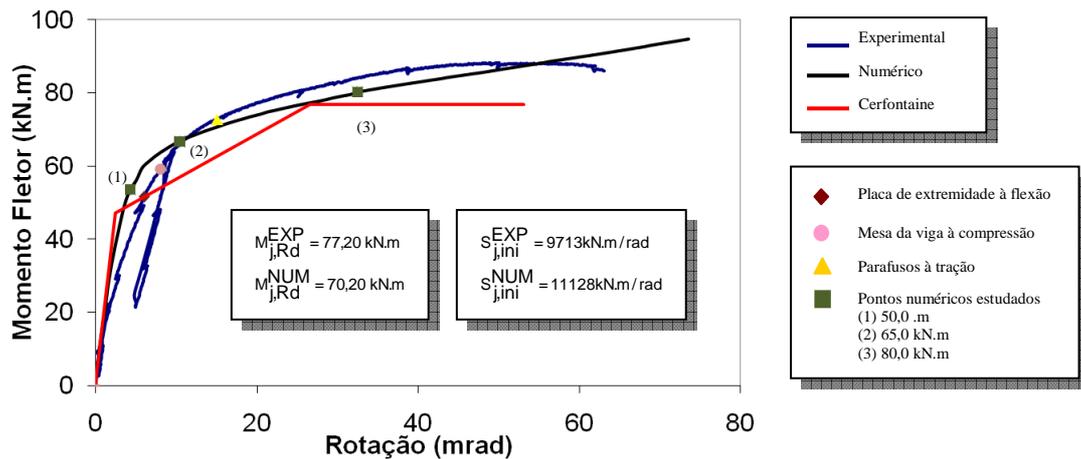


Figura 9 – Curva momento *versus* rotação – Ensaio FE03 – N=-52,7kN

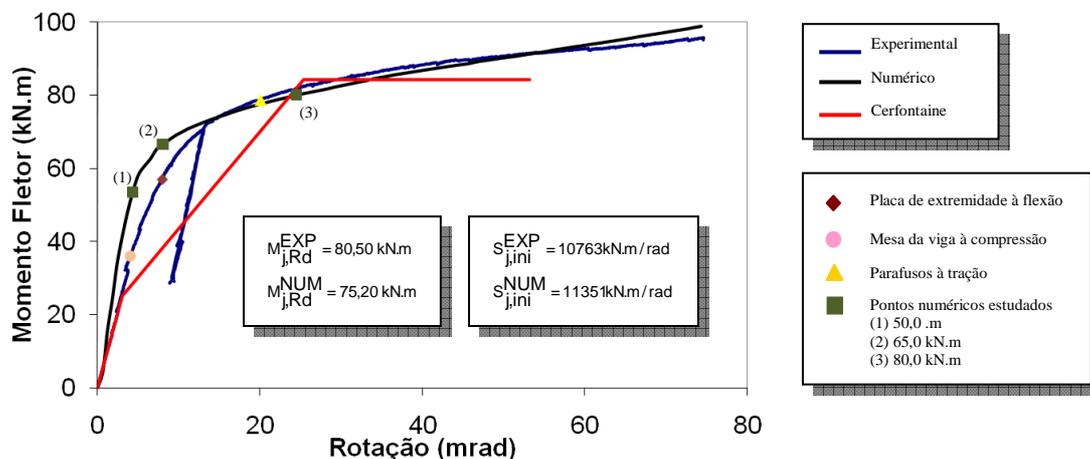


Figura 10 – Curva momento *versus* rotação – Ensaio FE05 – N=-265,0kN

Observando 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, mesmo para o caso de aplicação de esforço normal de compressão equivalente a 20% da resistência plástica da viga. Este aumento de resistência também foi observado nos ensaios experimentais, apesar das diferenças observadas nas curvas momento *versus* rotação individuais. Isto se deve ao fato de que as componentes da zona comprimida, 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. Pequenas alterações na rigidez inicial destas curvas também foram observadas.

Para os ensaios à compressão é possível verificar que 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 a resistência à flexão obteve resultado 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 foram bem observados experimentalmente, porém, devido às condições de contorno impostas ao modelo, não foi possível se verificar com tanta intensidade no modelo numérico.

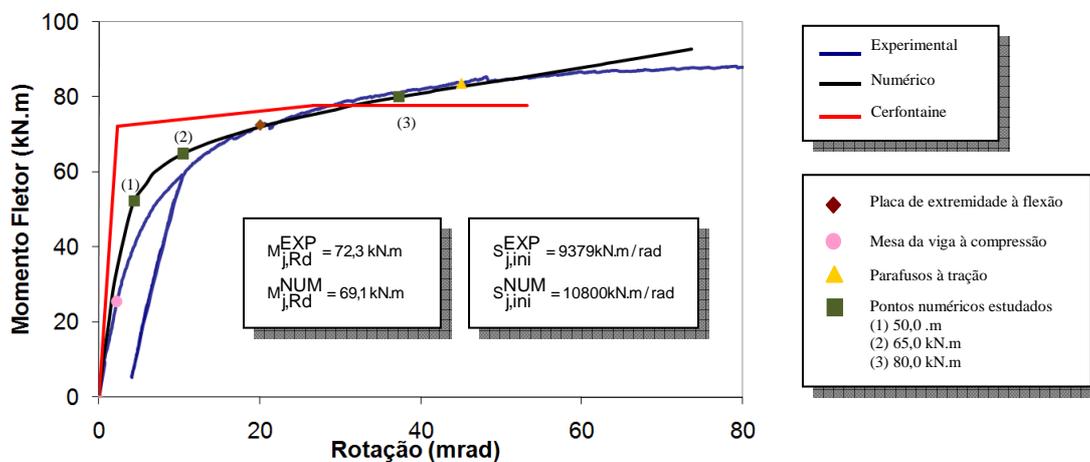


Figura 11 – Curva momento *versus* rotação – Ensaio FE06 – N=-345,0kN

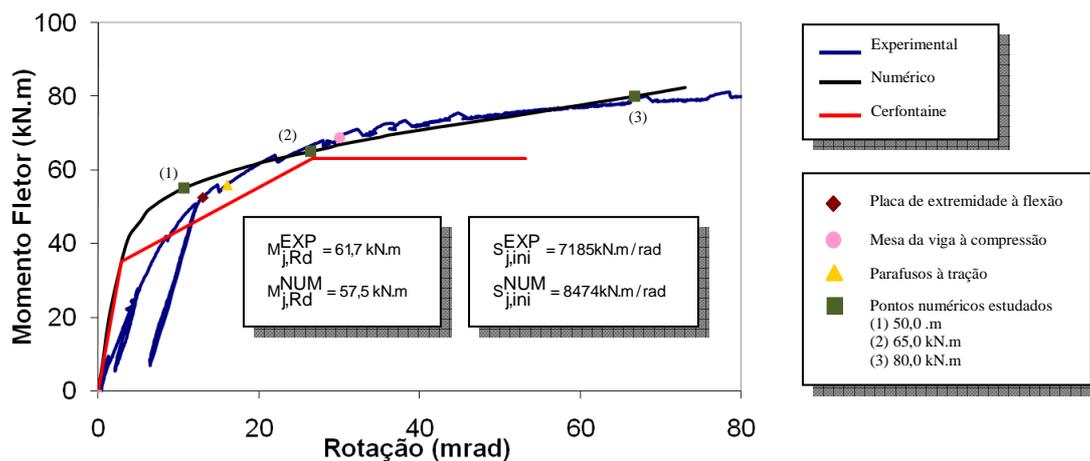


Figura 12 – Curva momento *versus* rotação – Ensaio FE08 – N=+130,6,0kN

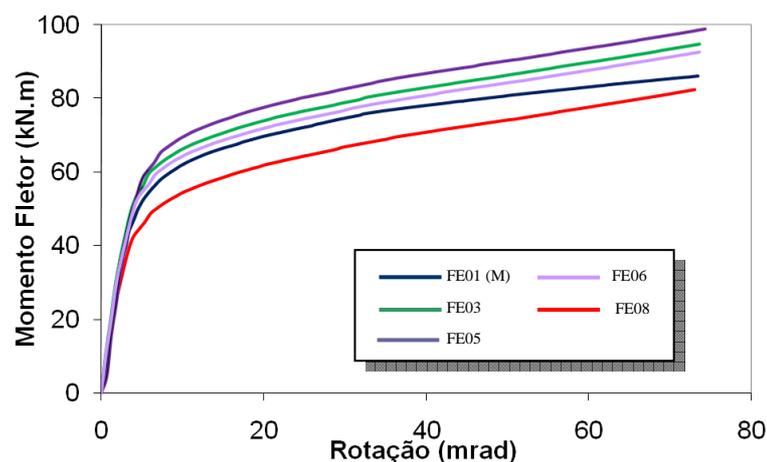
A Figura 15 e a Figura 16 apresentam a evolução das tensões de *Von Mises* para três níveis de momento fletor: 50 kN.m, 65kN.m e 80 kN.m. A Figura 14 apresenta os resultados na curva momento *versus* deformação para os extensômetros 23 e 24, referente a placa de extremidade à flexão. Para o ensaio FE03 é possível verificar que a placa de extremidade plastifica no primeiro ponto estudado, com a mesa inferior da viga, sofrendo o escoamento no segundo momento fletor apresentado. Observa-se que a placa de extremidade, que é a componente crítica no dimensionamento da região tracionada da ligação, ocorre para níveis superiores de momento fletor conforme se aumenta o nível de esforço normal aplicado. Por exemplo, para o momento fletor nota-se que no modelo FE05, ainda não ocorreu o início de plastificação nesta componente, fato já verificado no modelo FE03. Para o segundo nível de momento, verifica-se que as linhas de charneiras plásticas já se encontram bem definidas enquanto que no modelo FE05, observa-se na sua formação ainda em estado inicial. E, para o último nível de momento fletor estudado, verifica-se diversos pontos onde o valor de tensão

de *Von Mises* já representa a plastificação da componente para os modelos enquanto que na FE05, existe pouca plastificação.

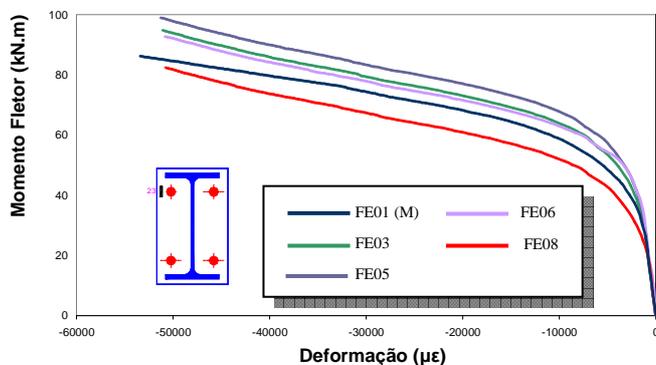
Comparando os resultados encontrados, verifica-se que com o aumento do esforço normal aplicado retarda o aumento da plastificação da placa de extremidade à flexão, passando a, se ocorresse o aumento da aplicação do esforço normal, o componente a controlar o dimensionamento ser substituído para a mesa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

Para o ensaio FE06, cuja aplicação do máximo esforço normal, pode-se verificar que a curva, representada pela cor cinza, sofre um decréscimo em relação aos outros níveis de compressão aplicada. Desta forma, constata-se que a mudança de componente que controla o dimensionamento da placa de extremidade à flexão para a mesa da viga à compressão ocorre antes deste esforço aplicado. O valor limiar desta mudança está compreendido entre a aplicação do ensaio FE05 e FE06, de acordo com o modelo numérico proposto.

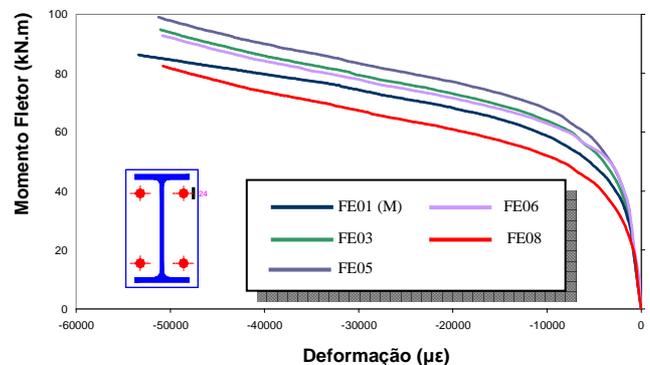
Comparando os resultados numéricos aos experimentais é possível se observar que para os modelos FE03, FE08 os resultados comparados foram próximos, com valores numéricos superiores ao Modelo de Cerfontaine. Para FE05 é possível se verificar um ponto de fragilidade, caracterizado pelo valor superior do Modelo em comparação ao obtido numérica e experimentalmente. Para FE06, o valor obtido pelo Modelo de Cerfontaine foi inferior ao obtido para os demais modelos.



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



(a) Extensômetro 23



(b) Extensômetro 24

**Figura 14 – Curva momento *versus* deformação**

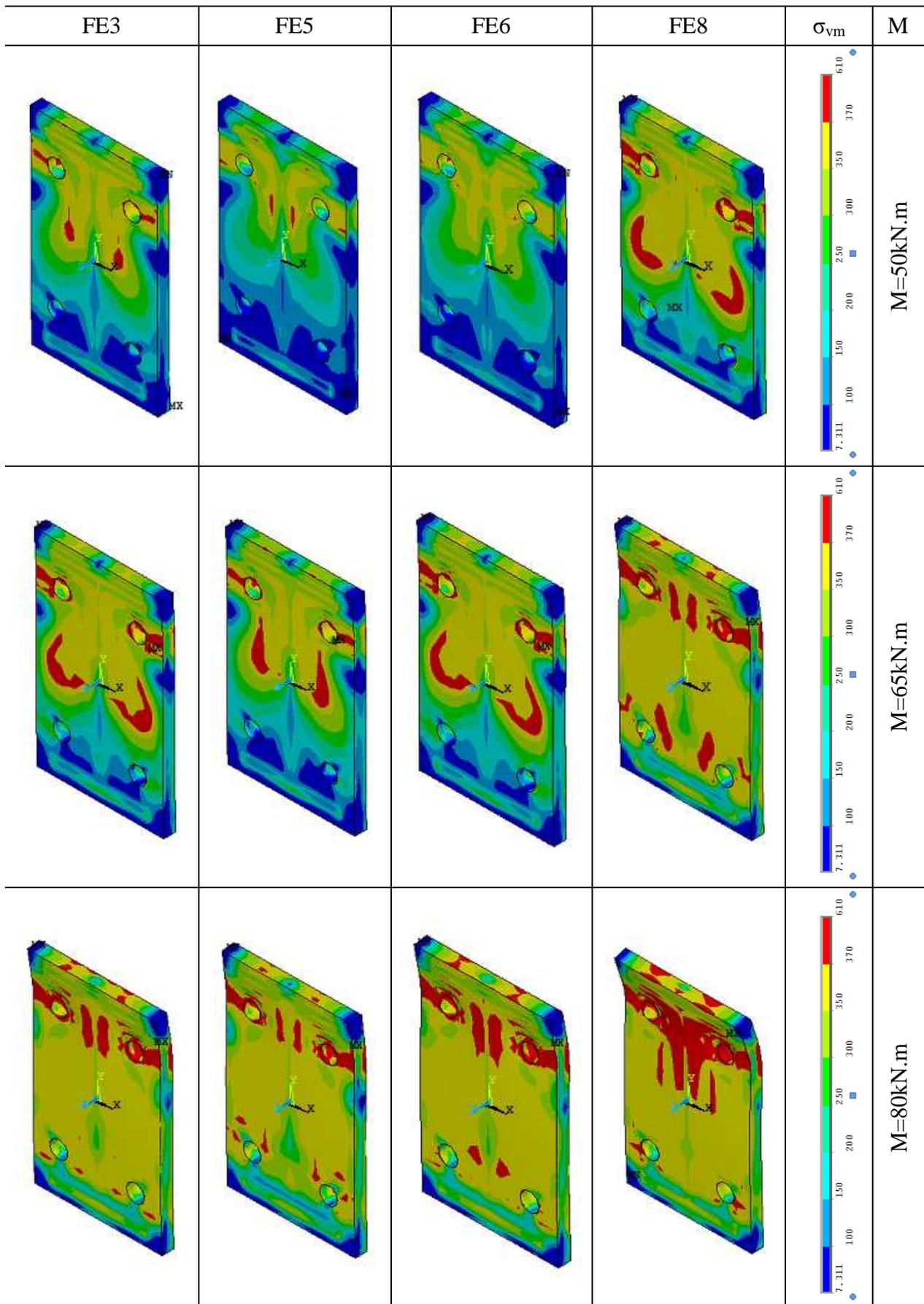


Figura 15 – Distribuição de Von Mises – Placa de extremidade (em MPa)

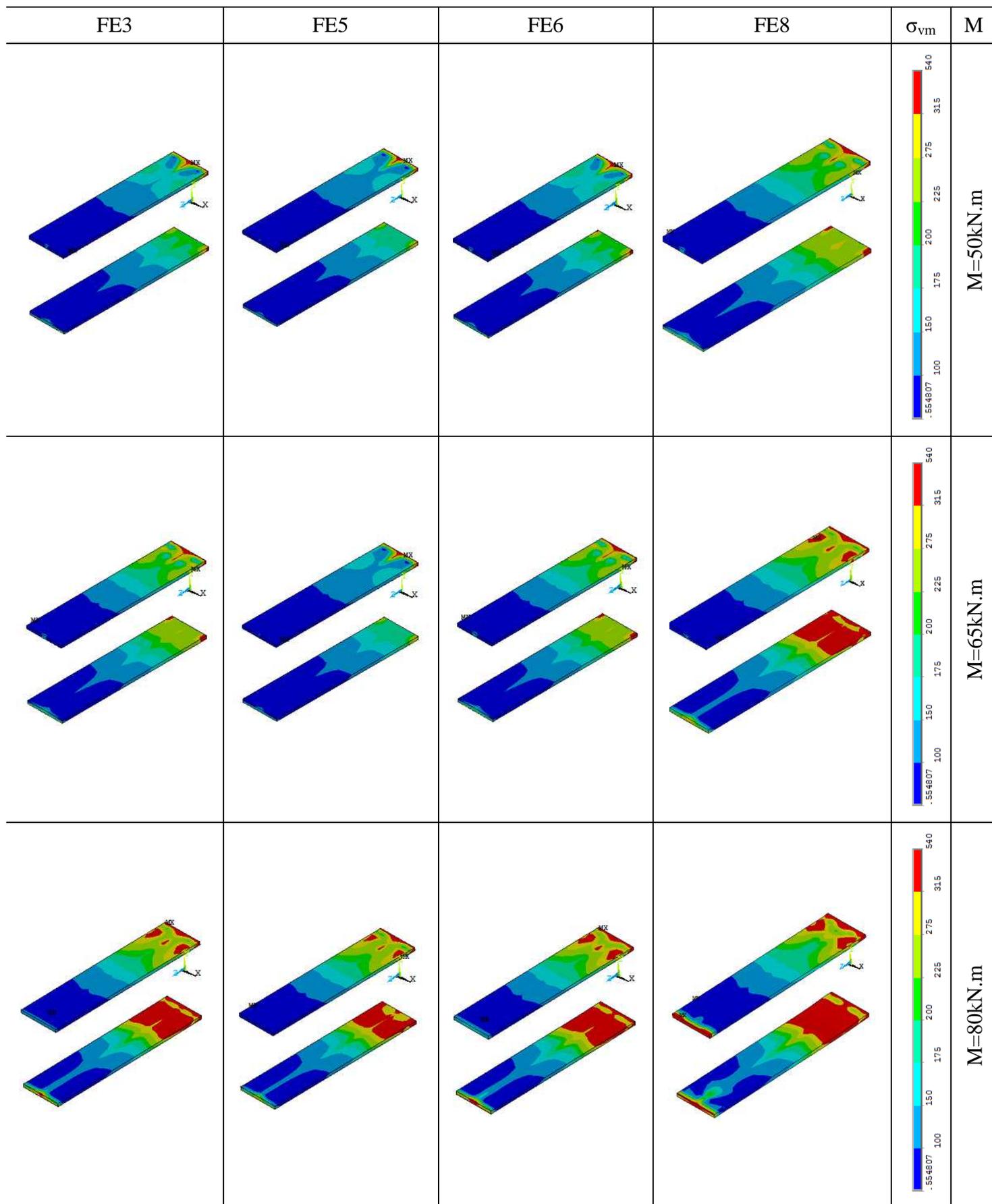


Figura 16 – Distribuição de Von Mises – Mesa inferior da viga (em MPa)

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um modelo numérico para estudo do comportamento de ligações viga-coluna com placa de extremidade ajustada à altura da viga submetida a momento fletor e esforço normal.

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. Evidentemente, a simplificação do modelo numérico contribui para que ocorresse esta diferença.

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.

Os desenvolvimentos futuros neste trabalho de investigação passam pela revisão da modelação. 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, nº 3, pp. 225-262.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.