

6

Modelo Mecânico Proposto

6.1

Introdução

Conforme comentado no capítulo dois, os modelos mecânicos, geralmente conhecidos como modelos de molas, são baseados na simulação de uma ligação através da utilização de um conjunto de componentes rígidos e flexíveis que procuram representar todos os elementos que compõem a ligação. A não-linearidade destes elementos é obtida por meio de leis constitutivas inelásticas adotadas para os elementos de mola. Estes modelos mecânicos são apropriados para caracterizar a ligação desde que se tenha um conhecimento prévio das leis constitutivas de cada uma destas molas. Estas leis podem ser obtidas através de ensaios experimentais ou por meios analíticos.

Todavia, a informação existente na literatura a respeito do comportamento individual de cada uma das componentes apresentadas no Eurocode 3 [8,9] é muito limitada, principalmente quando se refere ao comportamento pós-limite das mesmas.

A capacidade de deformação plástica antes da ruína, chamada ductilidade, é uma propriedade importante do aço estrutural. Através desta propriedade, garante-se que a parte da estrutura mais solicitada se deformará suficientemente, após o início do escoamento, possibilitando que outras partes absorvam incrementos de carregamento. Este fenômeno é chamado de redistribuição de esforços e ocorre não só isoladamente numa peça, mas também, na estrutura como um todo.

Silva *et al.* [55] propôs a utilização de modelos mecânicos considerando que as componentes presentes numa ligação com placa de extremidade dividem-se em três classes distintas de acordo com sua ductilidade: componentes com ductilidade significativa, componentes com ductilidade limitada e componentes com ruptura frágil.

As componentes que possuem ductilidade significativa são classificadas assim por apresentarem um diagrama força *versus* deslocamento como mostrado na Figura 6.1(a). Neste diagrama nota-se que a curva possui uma

rigidez inicial elástica (K_e) correspondente a um deslocamento (Δ_e). A partir de um determinado ponto, a curva passa a ter a inclinação referente a rigidez pós-limite (K_p) caracterizada pelo aumento dos deslocamentos com respectivo aumento de carga e perda de rigidez. O deslocamento na ruptura destas componentes é considerado elevado fazendo com que a razão (Δ_e/Δ_f) seja praticamente nula. Dentre as componentes consideradas em uma ligação viga-coluna com placa de extremidade típica que apresentam este comportamento, pode-se citar: alma da coluna submetida ao cisalhamento (1) - desde que não ocorra flambagem local, mesa da coluna em flexão (4), placa de extremidade à flexão (5) e alma da viga à tração (8). Todavia, deve-se enfatizar que o Eurocode 3 [8,9] considera que esta última componente tem seu comportamento caracterizado como rígido-plástico[38], ou seja, sua rigidez inicial (K_e) é infinita.

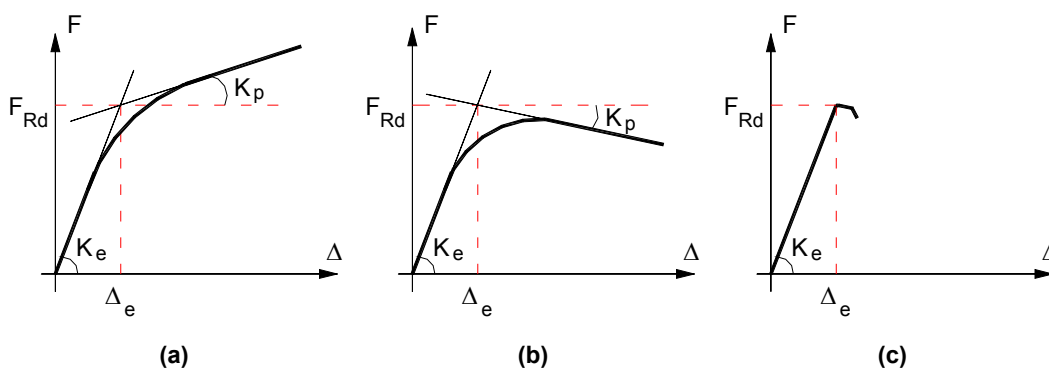


Figura 6.1 – Diferentes leis constitutivas de componentes

Quanto às componentes que possuem ductilidade limitada, pode-se citar: alma da coluna à compressão (2), alma da coluna à tração (3) e mesa da viga em compressão (7). Estas apresentam um diagrama força *versus* deslocamento como o mostrado na Figura 6.1(b) onde se verifica que após atingir a sua resistência, os deslocamentos aumentam sem que ocorra o acréscimo da força aplicada e a partir de um determinado ponto, começam a perder resistência. Kuhlmann [56] realizou alguns ensaios onde procurou avaliar o comportamento da componente alma da coluna à compressão que comprovam este tipo de comportamento. Todavia, verificou-se através dos resultados experimentais deste trabalho que a componente mesa da viga em compressão (7) pode apresentar um comportamento dúctil, devendo ser classificada como tal. Isto ocorre porque nestes casos, a mesa da viga pertence à classe 1, podendo atingir o momento plástico da viga e possibilitando a redistribuição do momento fletor atuante na mesma.

As componentes que têm uma ruptura frágil são associadas a componente dos parafusos à tração (10) e às soldas cujo comportamento é apresentado na Figura 6.1(c). Entretanto, a componente referente às soldas não é considerada no cálculo da rigidez rotacional da ligação no Eurocode 3 [8,9] que sugere apenas que a sua resistência deva ser suficiente para resistir aos efeitos de um momento fletor igual ao momento de plastificação da viga ou γ vezes o momento resistente da ligação $M_{j,Rd}$ onde γ é igual a 1,4 e 1,7 para estruturas indeslocáveis e deslocáveis, respectivamente.

6.2

Caracterização do Modelo de Molas

O primeiro passo para o desenvolvimento de um modelo mecânico de uma ligação viga-coluna é a identificação das componentes presentes na ligação que representam as trajetórias de esforços/deformação existentes e os possíveis modos de colapso da ligação.

Sendo assim, apresenta-se na Figura 6.2, o modelo de molas referente às ligações da primeira série, ou seja, ligações com placa de extremidade ajustada submetidas a momento fletor e esforço axial de tração ou compressão. Para este modelo, as componentes referentes à zona em compressão da ligação (1), (2) e (7) são adicionadas às linhas em tração. Isto porque no momento em que se aplica o esforço axial de compressão, a zona em tração estará sujeita, inicialmente, a esforço axial de compressão e este esforço não poderá provocar o escoamento de nenhuma destas componentes. De forma análoga, na região em compressão da ligação deve-se adicionar as componentes em tração (3), (4), (5), (8) e (10) para caracterizar os ensaios com esforço axial de tração.

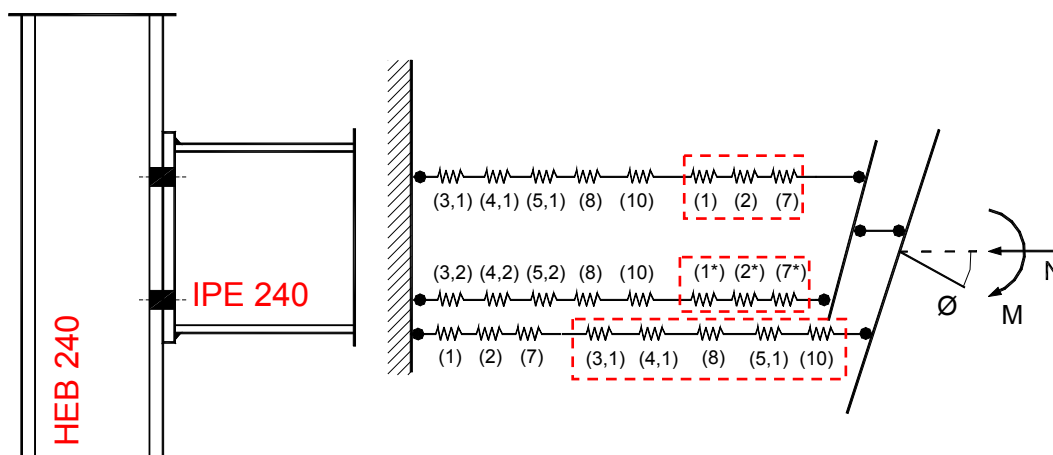


Figura 6.2 – Modelo de molas para ligações com placa de extremidade ajustada

Deve-se ressaltar que as componentes em compressão presentes na linha de parafusos inferior, ou seja, (1*), (2*) e (7*), devem ter sua rigidez reduzida tendo em vista que o esforço de compressão na região inferior da ligação será transmitido, basicamente, através da mesa inferior da viga através das componentes (1), (2) e (7), respectivamente. Este modelo de molas, conforme apresentado acima, somente será válido quando o momento atuante na ligação tiver o sentido apresentado na Figura 6.2. Quando o momento aplicado for em sentido contrário, o modelo deve ser invertido, pois caso contrário, a simetria da ligação não mais existiria. No entanto, o modelo pode ser simplificado, ou seja, desconsidera-se a presença da segunda linha de parafusos tendo em vista que, devido ao pequeno braço de alavanca, sua contribuição para a resistência ao momento fletor da ligação ser mínima conforme verificado experimentalmente, fazendo com que o dimensionamento esteja a favor da segurança.

De forma análoga, obtém-se o modelo de molas para as ligações com placa de extremidade estendida, Figura 6.3. Neste caso, as componentes da terceira linha de parafusos não são consideradas devido a simplificação proposta no Eurocode 3, §6.2.1.3(6) [8,9] que ignora a resistência de linhas de parafusos em tração cujo braço de alavanca seja inferior a 40% do braço de alavanca da linha mais afastada do centro de compressão. Vale observar que esta simplificação modifica a rigidez inicial da ligação conforme será verificado em uma seção a seguir. Este modelo também pressupõe que as componentes em compressão adicionadas às duas linhas de parafusos superiores, ou seja, (1*), (2*) e (7*), devem ter o valor de sua rigidez elástica dividida por dois. Isto é feito de forma que metade do esforço axial aplicado à ligação que é transmitido pela mesa superior da viga, seja redistribuído pelas duas linhas de parafusos.

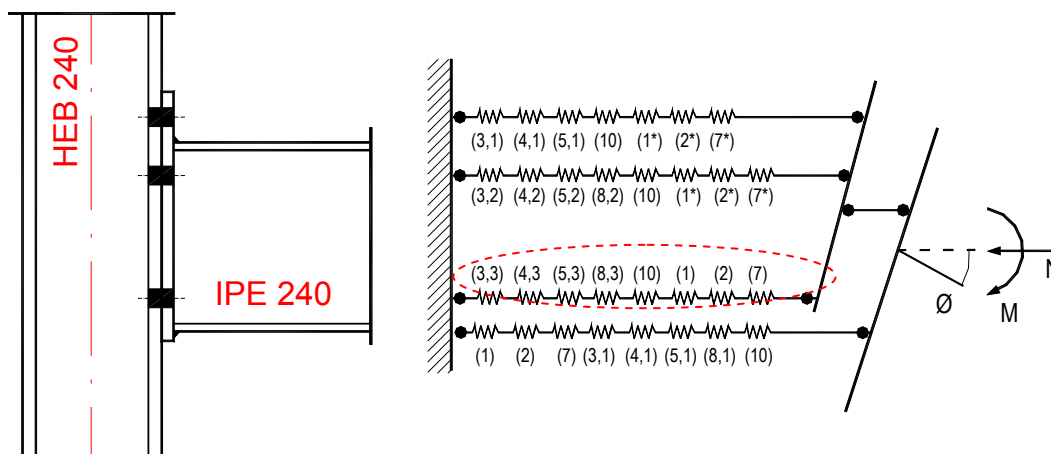
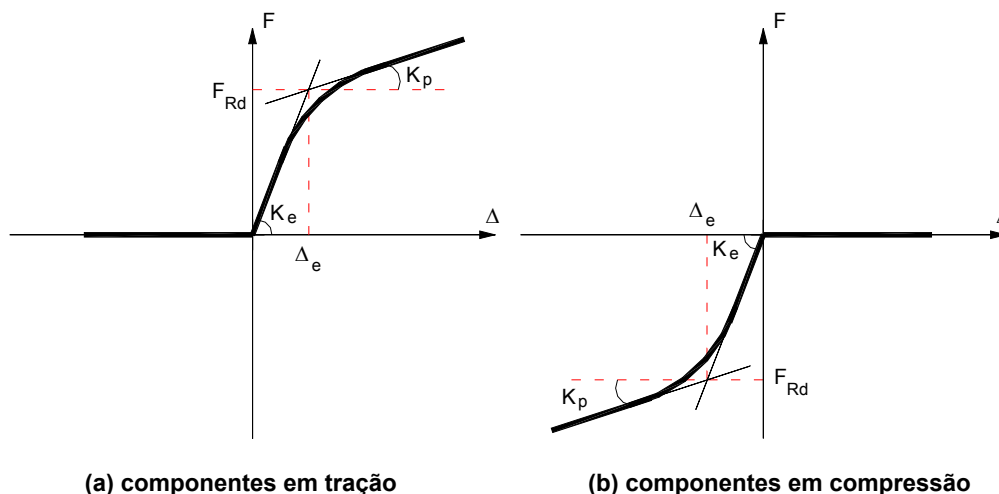


Figura 6.3 – Modelo de molas para ligações com placa de extremidade estendida

As molas representativas de componentes em tração não devem possuir nenhuma resistência à compressão na sua lei constitutiva. De forma recíproca, as molas em compressão não podem ter resistência à tração. Ambos os comportamentos podem ser observados na Figura 6.4.



(a) componentes em tração

(b) componentes em compressão

Figura 6.4 – Leis constitutivas para molas em tração e compressão

Algumas considerações sobre as leis constitutivas adotadas devem ser mencionadas de acordo com o tipo de análise a ser efetuado para as ligações em estudo, segundo recomendações do Eurocode 3. Neste regulamento são propostos três tipos de análises diferentes:

- análise global elástica;
- análise global rígido-plástica;
- análise global elasto-plástica.

No primeiro caso, as ligações são classificadas de acordo com sua rigidez inicial cujo valor é obtido através da eq. 2.5 apresentada no §2.2.2 do capítulo dois. Todavia, como simplificação, pode-se adotar o procedimento descrito a seguir:

- a) enquanto o momento aplicado na ligação, $M_{j,Sd}$ não exceder $2/3 M_{j,Rd}$, a rigidez inicial da ligação $S_{j,ini}$ deve ser usada - Figura 6.5(a);
- b) quando o momento aplicado na ligação, $M_{j,Sd}$ ultrapassar $2/3 M_{j,Rd}$, a rigidez inicial da ligação adotada deve ser $S_{j,ini} / \eta$ - Figura 6.5(b);

- c) alternativamente, permite-se adotar o valor de $S_{j,ini}/\eta$ para a rigidez inicial da ligação na análise global elástica, para todos os valores de momento fletor $M_{j,Sd}$ conforme apresentado na Figura 6.5(c).

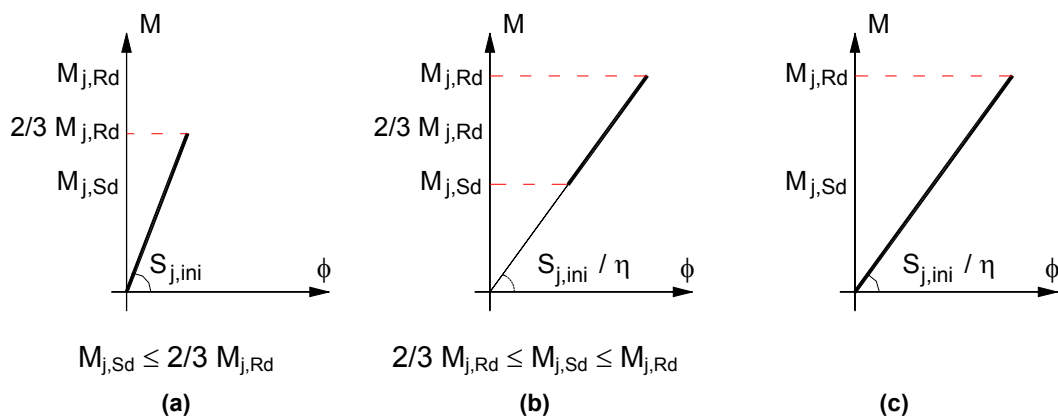


Figura 6.5 – Rigidez inicial a ser usada na análise global elástica [8,9]

Na análise global rígido-plástica, as ligações são classificadas de acordo com sua resistência, ou seja, ligações com resistência parcial ou completa. Neste tipo de análise, nenhuma consideração sobre a rigidez inicial a ser adotada é exigida.

Finalmente, quando se utiliza a análise global elasto-plástica, as ligações são classificadas de acordo com a rigidez inicial e a resistência. Neste tipo de análise, a curva momento *versus* rotação é simplificada adotando-se a representação bi-linear apresentada na Figura 6.6 onde o valor de η dado no capítulo dois é igual a 2 para ligações aparafusadas com placa de extremidade.

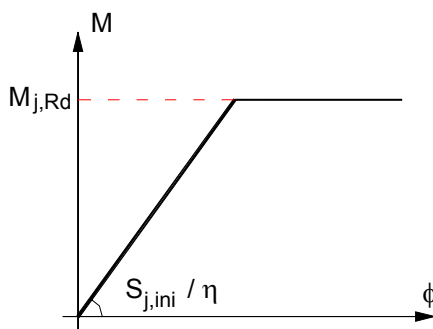


Figura 6.6 – Aproximação bi-linear da curva momento *versus* rotação [8,9]

Portanto, para que se possa efetuar a análise pretendida neste trabalho, ou seja, uma análise global elasto-plástica, deve-se considerar:

- a) em uma primeira análise, considera-se o valor da rigidez elástica individual das componentes dividido por 2 para que se possa obter a rigidez inicial da ligação $S_{j,ini}/\eta$ caracterizando um comportamento elasto-plástico perfeito, ou seja, a rigidez pós-limite das componentes é nula;
- b) em seguida, considera-se o valor global de rigidez elástica das componentes com uma respectiva rigidez pós-limite diferente de zero conforme apresentado anteriormente na Figura 6.4.

6.3

Descrição dos “Softwares” Avaliados

Inicialmente, utilizou-se um programa de elementos finitos, LUSAS, [57]. Todavia, neste programa, não se permite atribuir a uma mola, um comportamento com valores de rigidez diferentes para tração e compressão. Entretanto, como era necessário caracterizar uma mola com comportamentos diferenciados para compressão e tração, adotou-se uma solução com duas molas em paralelo, sendo uma com comportamento de tração e outra com comportamento de compressão.

Esta hipótese tornava o processamento lento e isto motivou a utilização do programa NASCon, [58-60], desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Portugal, pelo engenheiro Luís Borges em sua dissertação de mestrado. Como este programa foi desenvolvido especificamente para a análise de ligações através de modelos mecânicos, o tempo necessário para o processamento dos modelos tornou-se bastante reduzido quando comparado com o programa anterior. Na Figura 6.7 apresenta-se a tela principal do programa onde várias opções de carregamento podem ser utilizadas, tais como, controle de força (F), controle de deslocamentos (D) ou controle através do trabalho externo (W).

Este programa também possui um pré-processador para geração do modelo de molas utilizado nas ligações onde pode-se atribuir qualquer tipo de comportamento para cada uma das molas consideradas, Figura 6.8.

Com a finalidade de se comparar e validar os resultados obtidos neste último programa, um exemplo da ligação foi testado em ambos os aplicativos. O resultado obtido, apresentado na Figura 6.9, foi satisfatório tendo em vista a coincidência das curvas.

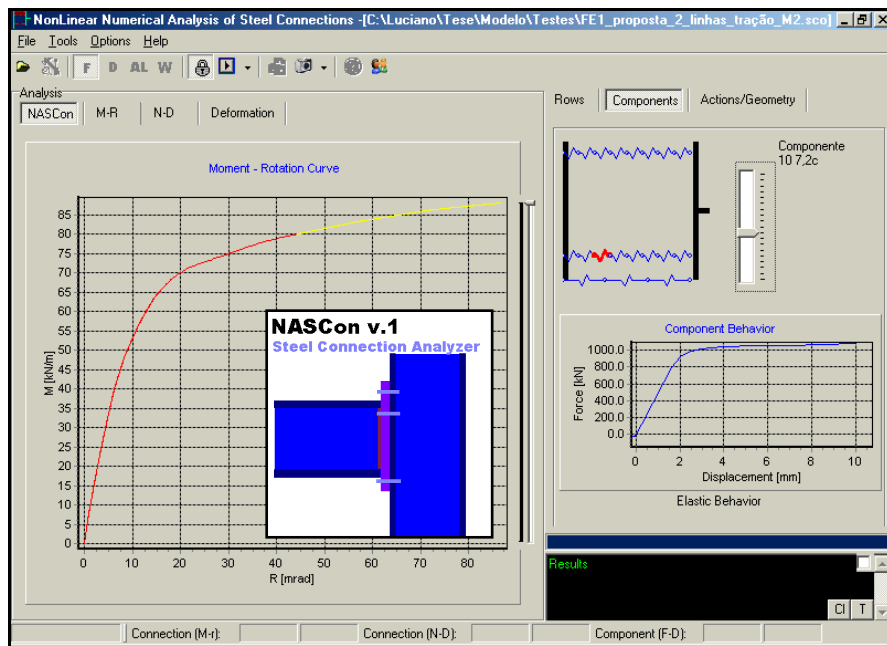


Figura 6.7 – Tela de resultados - NASCon [58-60]

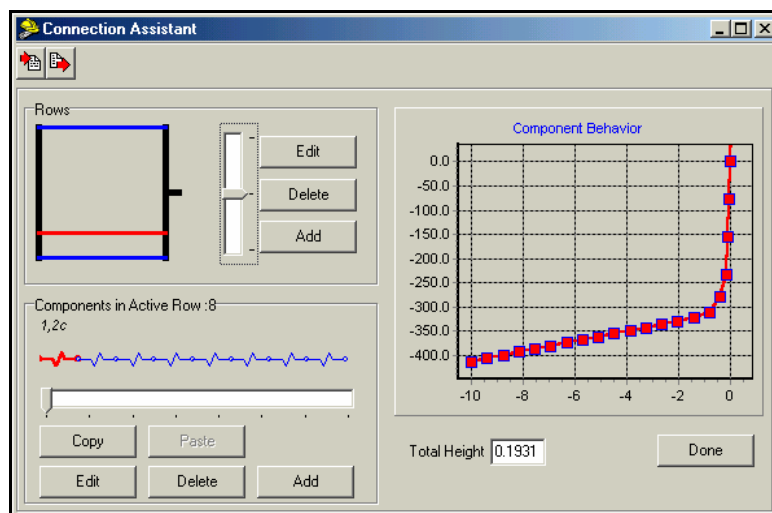


Figura 6.8 – Pré-processador - NASCon [58-60]

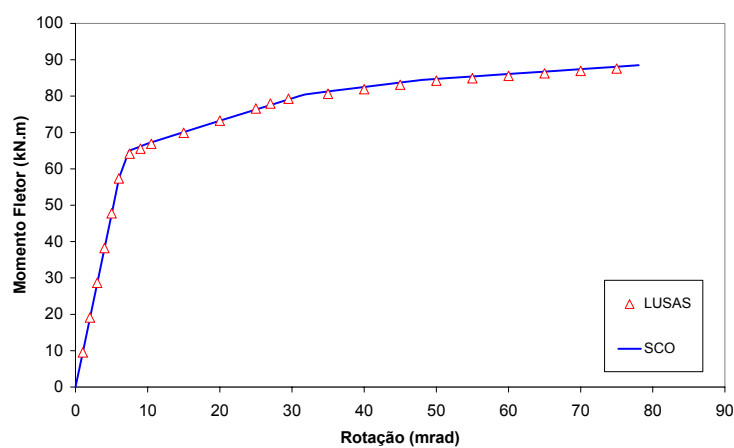


Figura 6.9 – Comparação entre LUSAS [57] e NASCON [58-60]

6.4

Análise de Resultados – Ligação com Placa de Extremidade Ajustada

6.4.1 Componentes com comportamento elasto-plástico perfeito

Conforme comentado anteriormente, nesta primeira análise, considera-se apenas a linha de parafusos superior e que as molas tem um comportamento bi-linear com uma rigidez elástica ($K_e = k_e \times \frac{E}{2}$), ou seja, equivalente a metade da calculada através do Eurocode 3, e nenhuma rigidez pós-limite. O uso deste modelo objetiva representar a curva momento *versus* rotação mostrada na Figura 6.6 com o maior grau de precisão possível. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.10 através das curvas momento *versus* rotação para os oito ensaios de ligações com placa de extremidade ajustada.

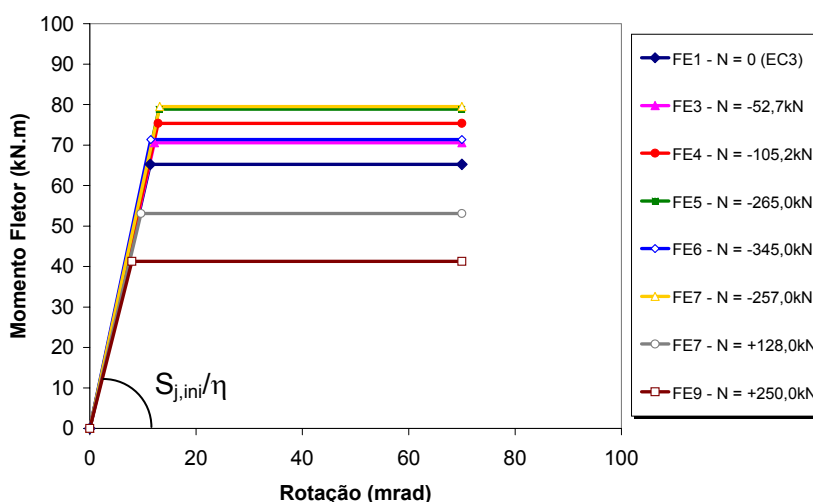


Figura 6.10 – Curvas momento fletor *versus* rotação – Ensaio FE

Na Figura 6.11 efetua-se uma comparação entre os resultados provenientes do modelo de molas com os experimentais para os oito casos testados experimentalmente.

Através destas curvas, nota-se que a simplificação do modelo, utilizando apenas uma linha de parafusos em tração, prejudica a boa concordância entre a curva experimental e a numérica nos ensaios com esforço axial de tração mas, como comentado anteriormente, ao adotar esta simplificação, gera-se um limite inferior para o problema estudado fornecendo valores a favor da segurança.

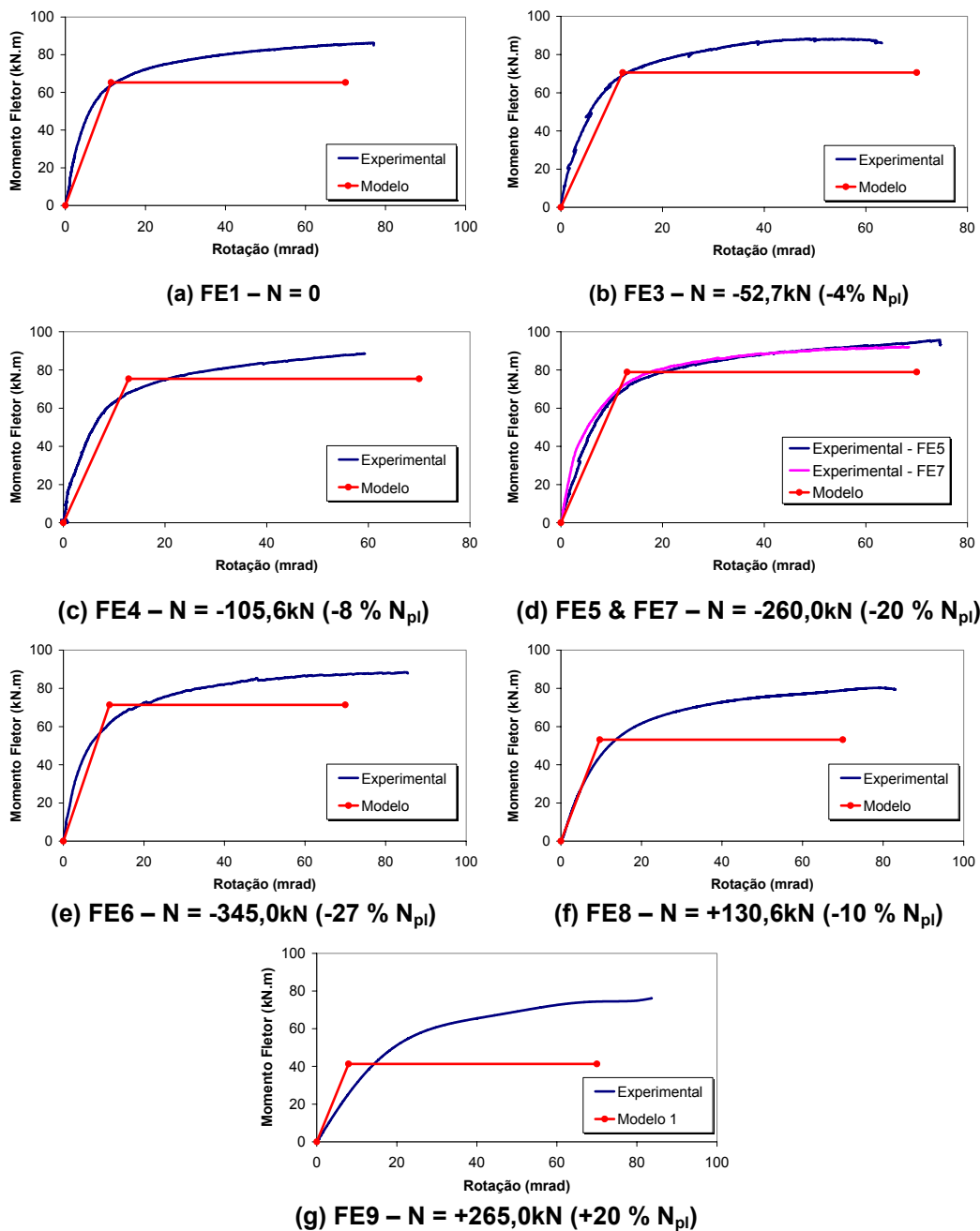


Figura 6.11 – Comparação de curvas momento versus rotação ($k_p=0$) – Ensaio FE

Os valores de rigidez elástica de cada uma das componentes são sumarizados na Tabela 6.1. Já a Tabela 6.2 apresenta os valores de momento fletor e rigidez inicial para cada um dos ensaios, obtidos numericamente e através dos ensaios experimentais. As componentes representadas nesta tabela são caracterizadas por dois números onde o primeiro representa a componente propriamente dita e o segundo, a linha a qual esta componente pertence.

Tabela 6.1 – Coeficientes de rigidez das componentes dos ensaios da série FE

	Componente	F _{Rd} (kN)	k _e (mm)	K _e (kN/mm)	K _e /2 (kN/mm)
(C) Compressão	(1)	-642,56	7,52	1579292	789646
	(2)	-690,67	10,40	2183852	1091926
	(7)	-542,27	∞	100000000	50000000
(T ₁) Tração 1 h = 193,1mm	(3,1)	533,28	7,03	1475552	737776
	(4,1)	408,34	40,47	8499353	4249677
	(5,1)	339,31	14,13	2968123	1484062
	(8,1)	483,05	∞	100000000	50000000
	(10)	441,00	7,76	1630099	815050

Tabela 6.2 – Comparação entre M_{j,Rd} e S_{j,ini} – numérico e experimental

Ensaio	M _{j,Rd} (kN.m)			S _{j,ini} (kN.m/rad)		
	ensaio	modelo	erro (%)	ensaio	modelo	erro (%)
FE1	72,2	65,2	-10,74	8564	5725	-49,59
FE3	77,2	70,6	-9,35	9713	5796	-67,58
FE4	74,7	75,4	0,93	11262	5859	-92,22
FE5	80,5	78,9	-2,03	10763	6059	-77,64
FE6	72,3	71,4	-1,26	9379	6219	-50,81
FE7	80,7	79,5	-1,51	7326	6046	-21,17
FE8	61,7	53,1	-16,20	7185	5506	-30,49
FE9	51,3	41,3	-24,21	5315	5206	-2,09

Com a simplificação efetuada no modelo, deve-se reavaliar seus efeitos na rigidez inicial da ligação. Considerando-se todas as linhas de parafusos, tem-se que a rigidez inicial S_{j,ini}/η é igual a 5965kN.m/rad, conforme se verifica a seguir, utilizando-se as equações apresentadas no capítulo dois.

$$k_{\text{eff},r} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_c} \frac{1}{k_{i,r}}} \Rightarrow k_{\text{eff},1} = k_{\text{eff},2} = \frac{1}{\frac{1}{7,03} + \frac{1}{40,47} + \frac{1}{14,30} + \frac{1}{7,76}} = 2,734\text{mm} \quad (6.1)$$

$$Z_{\text{eq}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} k_{\text{eff},i} h_i^2}{\sum_{i=1}^{n_b} k_{\text{eff},i} h_i} = \frac{2,734 \cdot (193,1)^2 + 2,734 \cdot (37,1)^2}{2,734 \cdot (193,1) + 2,734 \cdot (37,1)} = 167,96\text{mm} \quad (6.2)$$

$$k_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} k_{eff,i} h_i}{z_{eq}} = \frac{2,734 \cdot (193,1) + 2,734 \cdot (37,1)}{167,96} = 3,74 \text{mm} \quad (6.3)$$

$$S_{j,ini} = \frac{E z^2}{\mu \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_{eq}} \right)} = \frac{210000 \cdot (167,96)^2}{\left(\frac{1}{7,52} + \frac{1}{10,40} + \frac{1}{3,74} \right)} = 11929 \text{kN.m/rad} \quad (6.4)$$

$$\frac{S_{j,ini}}{\eta} = \frac{11929}{2} = 5965 \text{kN.m/rad} \quad (6.5)$$

Quando se considera apenas a linha superior em tração e a linha em compressão, tem-se uma nova rigidez inicial $S_{j,ini}/\eta$ igual a 6013kN.m/rad.

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_c} \frac{1}{k_{i,r}}} \Rightarrow k_{eff,1} = \frac{1}{\frac{1}{7,03} + \frac{1}{40,47} + \frac{1}{14,30} + \frac{1}{7,76}} = 2,734 \text{mm} \quad (6.6)$$

$$z_{eq} = h_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} k_{eff,i} h_i^2}{\sum_{i=1}^{n_b} k_{eff,i} h_i} = \frac{2,734 \cdot (193,1)^2}{2,734 \cdot (193,1)} = 193,1 \text{mm} \quad (6.7)$$

$$k_{eq} = k_{eff,1} = 2,374 \text{mm} \quad (6.8)$$

$$S_{j,ini} = \frac{E z^2}{\mu \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_{eq}} \right)} = \frac{210000 \cdot (193,1)^2}{\left(\frac{1}{7,52} + \frac{1}{10,40} + \frac{1}{2,37} \right)} = 12027 \text{kN.m/rad} \quad (6.9)$$

$$\frac{S_{j,ini}}{\eta} = \frac{12027}{2} = 6013 \text{kN.m/rad} \quad (6.10)$$

Com isso, verificou-se que o valor encontrado acima quando comparado com o obtido para o ensaio FE1, apresentado na Tabela 6.2, fornece um dimensionamento a favor da segurança.

Finalmente, de posse destes resultados, torna-se possível traçar a curva de interação momento fletor *versus* esforço axial apresentada abaixo onde o domínio de aplicação de acordo com o Eurocode 3, correspondente a limitação de 5% da resistência plástica da viga, está representado pelas linhas verticais. Nota-se que o modelo proposto, mesmo após as simplificações, apresenta resultados coerentes quando comparados com os ensaios, sempre a favor da segurança.

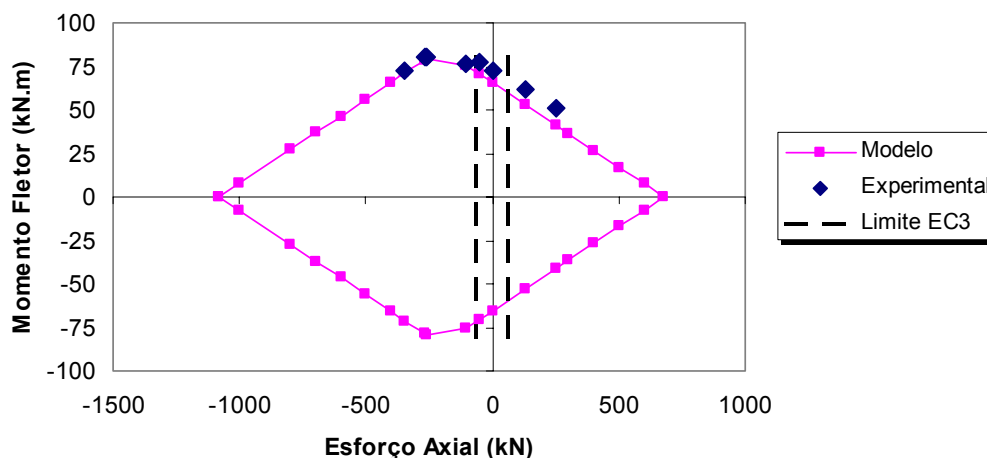


Figura 6.12 – Curva de interação momento fletor *versus* esforço axial

6.4.2 Comportamento elasto-plástico com rigidez pós-limite

Nesta segunda análise, considera-se que as componentes possuem uma rigidez pós-limite diferente de zero e o comportamento das componentes é considerado bi-linear, ou seja, a rigidez elástica permanece constante até atingir a resistência da componente, quando então, passa a ter a inclinação referente à rigidez pós-limite. Vale lembrar que, nesta análise, a rigidez elástica das componentes corresponde ao valor integral obtido através do Eurocode 3.

Apresentam-se na Figura 6.13, as curvas momento *versus* rotação, obtidas através do modelo de molas e sua comparação com os ensaios experimentais onde a seqüência de escoamento das componentes para cada um dos ensaios é evidenciada.

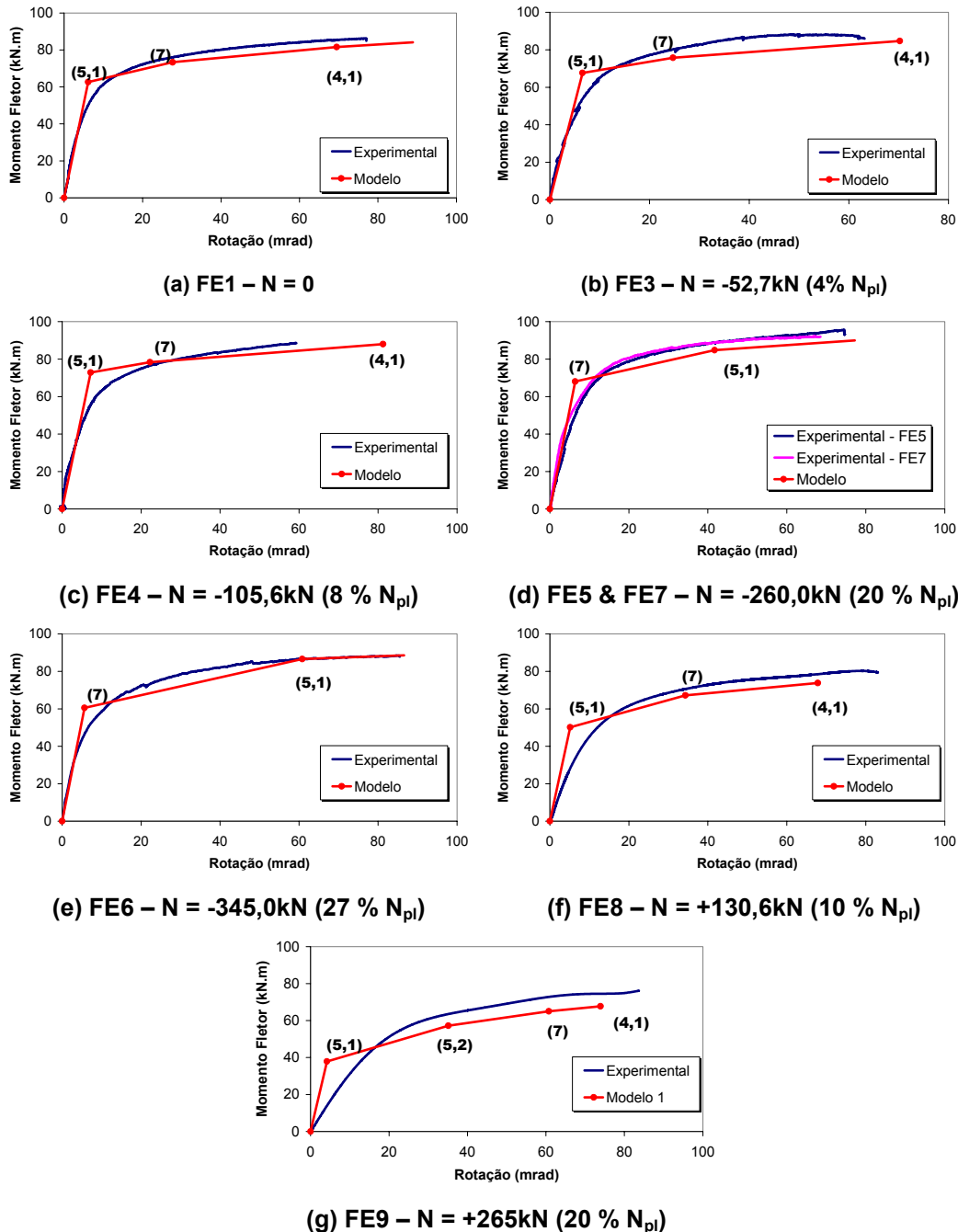


Figura 6.13 – Comparação de curvas momento *versus* rotação – $k_p \neq 0$

A partir destas curvas obtidas, nota-se que ao considerar que as componentes tem uma rigidez pós-limite, as curvas obtidas através do modelo de molas apresentam uma melhor concordância com os resultados obtidos experimentalmente.

Todavia, nem todas as componentes atingiram o valor correspondente ao escoamento, fazendo com que apenas algumas componentes tivessem sua rigidez pós-limite calibrada. Sendo assim, apresentam-se na Tabela 6.3, os

valores de k_p (como percentual de k_e) das componentes utilizadas na obtenção das curvas apresentadas na Figura 6.13.

Algumas considerações com relação a componente mesa da viga em compressão (7) precisam ser citadas. Esta componente teve seu comportamento considerado inicialmente como rígido-plástico conforme comentado anteriormente. Isto ocorre pois se considera que esta componente, assim como a alma da viga à tração (8) possuem rigidez elástica infinita. Entretanto, a partir da adoção do modelo elasto-plástico, a componente da mesa da viga em compressão deve ter uma rigidez pós-limite calibrada neste caso, não como percentual da rigidez elástica pois seria infinita, mas sim, com um valor suficiente para ajustar a curva momento *versus* rotação.

Este efeito pode ser observado com maior evidência, na comparação da curva referente aos ensaios FE5 a FE7 onde se notou que esta componente é a primeira a atingir o escoamento.

Tabela 6.3 – Valores calibrados para rigidez pós-limite k_p

	Componente	k_e (mm)	K_e (kN/mm)	k_p/k_e (%)	K_p (kN/mm)
C	(7)	∞	1,0E+08	-	2000
T	(4,1)	40,47	8499353	0,200	17000
	(5,1)	14,13	2968123	0,280	8310
	(5,2)	14,13	2968123	0,280	8310

6.5

Análise dos Resultados – Ligação com Placa de Extremidade Estendida

6.5.1 Comportamento elasto-plástico perfeito para as componentes

Seguindo a mesma metodologia apresentada para os ensaios de ligações com placa de extremidade ajustada, a primeira análise a ser apresentada consiste da reprodução do comportamento bi-linear proposto pelo Eurocode 3. Todavia, ao considerar duas linhas de parafusos em tração, tem-se um comportamento tri-linear para a curva momento *versus* rotação tendo em vista que esta curva somente atinge o ponto referente ao início do patamar horizontal, no instante em que a segunda componente de uma outra linha atinge o

escoamento, desde que a primeira a atingir o escoamento não seja uma componente em compressão (caso representado pela linha traço – ponto na mesma figura). Portanto, as duas hipóteses apresentadas na Figura 6.14 poderiam ser utilizadas sendo a representação bi-linear (linha tracejada) a proposta pelo Eurocode 3 e a tri-linear (linha cheia), mais precisa. Sendo assim, por coerência, adotou-se a representação tri-linear. Os resultados obtidos nesta primeira análise são apresentados na Figura 6.15 através das curvas momento *versus* rotação para os sete ensaios de ligações com placa de extremidade estendida e na Figura 6.16 efetua-se a comparação individual entre os resultados provenientes do modelo de molas e os dos ensaios.

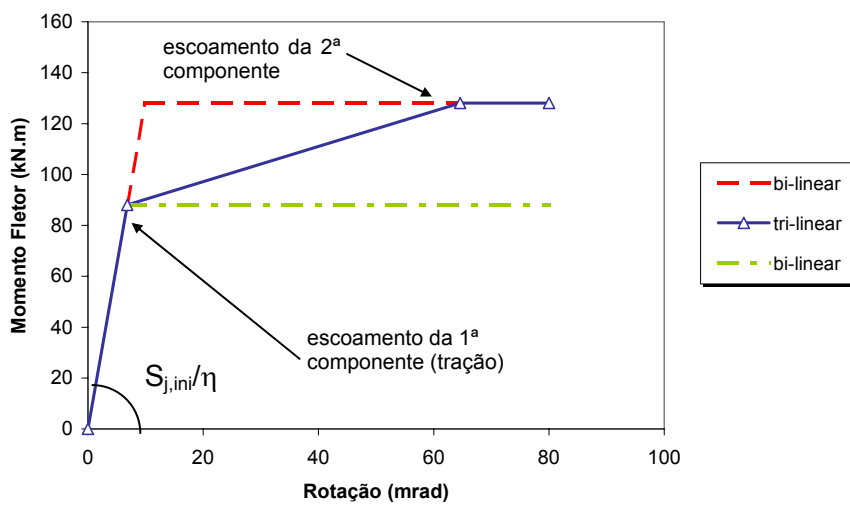


Figura 6.14 – Curva momento fletor *versus* rotação adotada

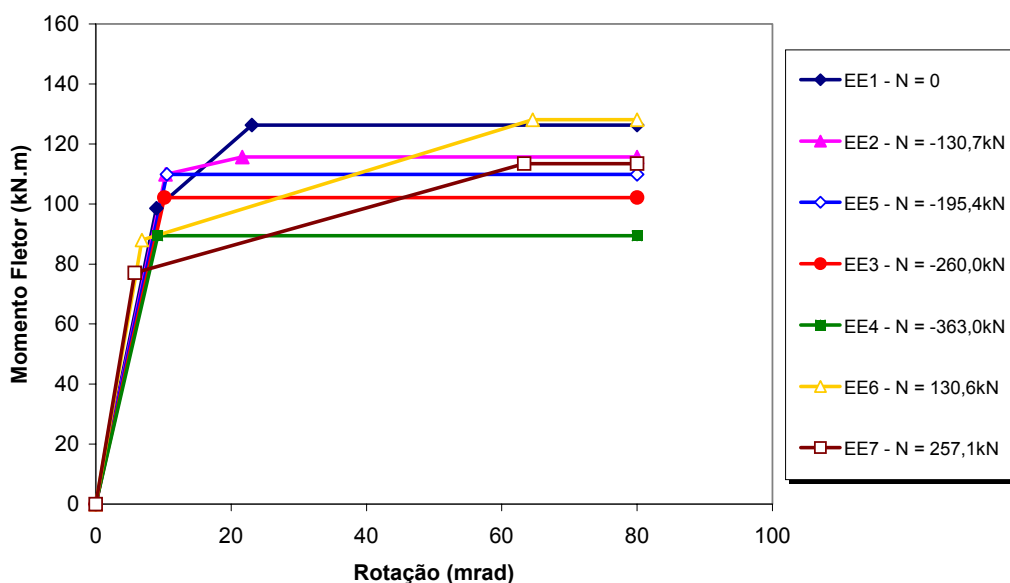


Figura 6.15 – Curvas momento fletor *versus* rotação – Ensaios EE

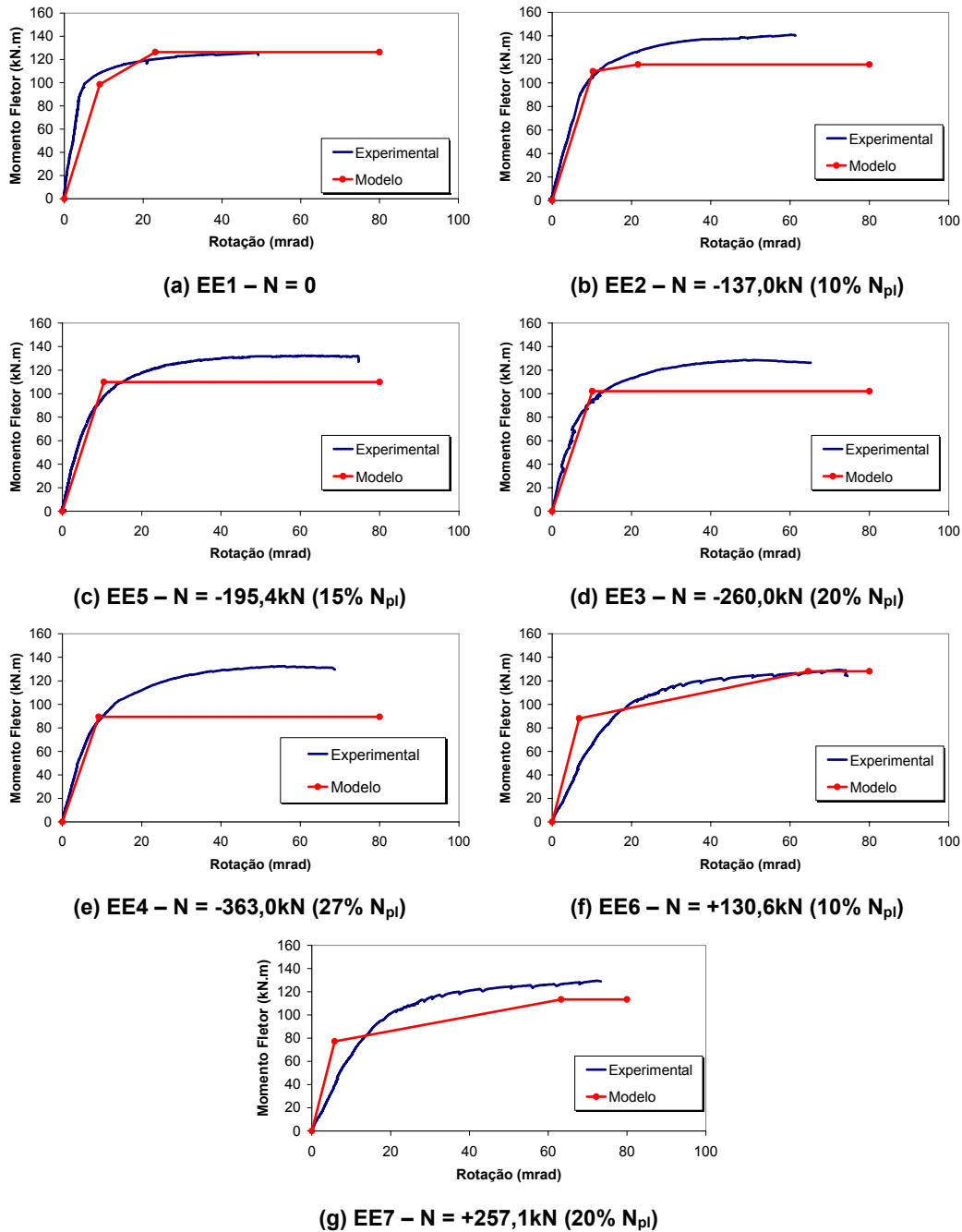


Figura 6.16 – Comparação de curvas momento *versus* rotação ($k_p=0$) – Ensaios EE

Nota-se que os resultados obtidos através do modelo de molas proposto representaram um limite inferior para a curva experimental exceto para o ensaio EE1 apenas com momento fletor. Todavia, uma análise mais detalhada das curvas dos ensaios EE1 e EE2 mostra uma diferença do modelo em relação aos resultados experimentais. Este fato ocorreu pois, de acordo com os ensaios realizados, a resistência ao momento fletor do ensaio EE2 onde se aplicou um esforço axial de compressão correspondente a 10% da resistência plástica da viga, deveria ser maior do que a obtida no ensaio EE1 (somente momento fletor).

No ensaio EE1, verificou-se que a ligação atinge o nível de momento fletor equivalente ao calculado através do Eurocode 3 com uma rotação associada bastante elevada, algo em torno de 50mrad, mostrando que caso o dimensionamento fosse feito desta forma, valores contra a segurança seriam obtidos.

Isto se deve entre outros motivos, ao fato de que no Eurocode 3, admite-se que o centro de compressão encontra-se na linha média da mesa inferior da viga, gerando um braço de alavanca superior ao verificado experimentalmente.

Owens [54] propõe que o eixo neutro de ligações viga-coluna com placa de extremidade estendida, onde não se utiliza enrijecedor na alma da coluna, encontra-se a 1/6 da altura da viga em relação a mesa inferior. Isto deve-se ao fato de que o esforço de compressão não é transmitido apenas através da mesa inferior da viga – Figura 6.17(a) – mas também, através de parte da alma da viga – Figura 6.17(b).

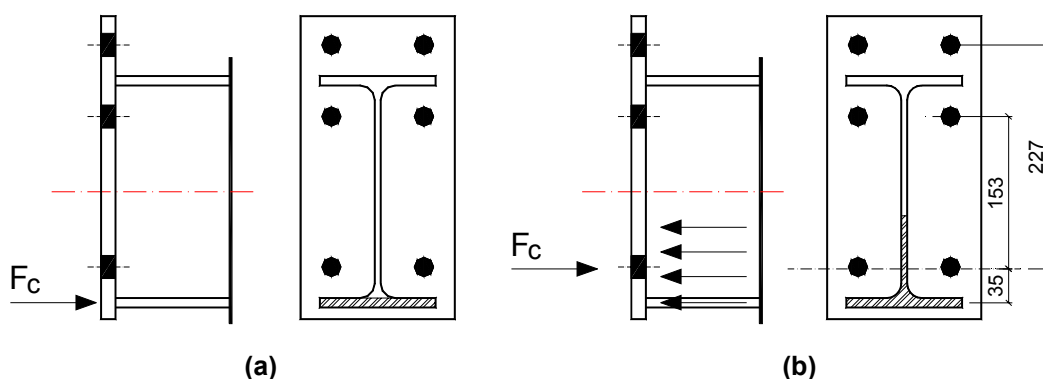


Figura 6.17 – Transmissão do esforço de compressão na ligação

Com isso, os novos braços de alavanca para as duas linhas superiores de parafusos passam a ser $h_1 = 227,3\text{mm}$ e $h_2 = 153,1\text{mm}$. Com estes novos valores, tem-se uma resistência ao momento fletor igual a 104,5kN.m contra os 126,3kN.m obtidos anteriormente. Ambas as curvas podem ser comparadas na Figura 6.18. Comparando-se o novo valor obtido para a resistência ao momento fletor com o obtido experimentalmente, 118,7kN.m, nota-se uma melhor concordância entre os resultados, ou seja, a favor da segurança.

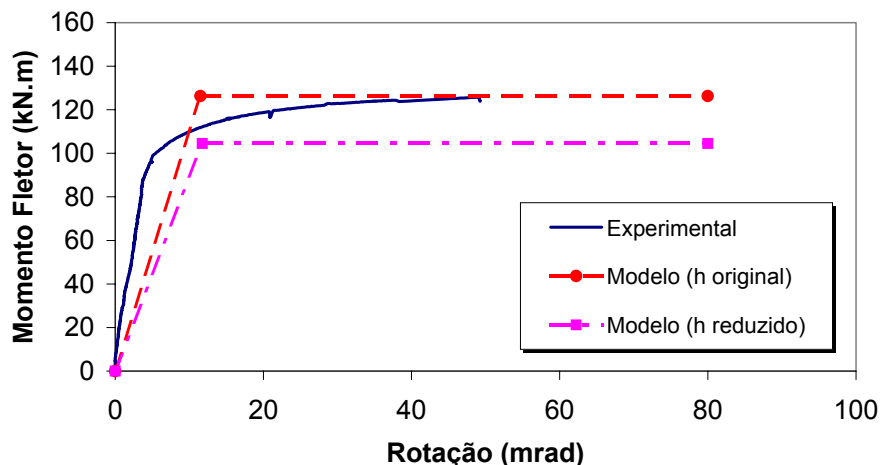


Figura 6.18 – Comparações de curvas momento versus rotação – Ensaio EE

Entretanto, a seqüência de escoamento das componentes observada nos resultados obtidos através do modelo de molas apresentou-se de forma coerente conforme pode ser verificado na Figura 6.19. A primeira componente a atingir o escoamento nos ensaios EE1 e EE2 foi a placa de extremidade à flexão (5,1) para um nível de momento fletor igual a 98,1kN.m e 109,7kN, respectivamente. Isto demonstra que a presença do esforço axial de compressão equivalente a 10% da resistência plástica da viga no ensaio EE2 retarda o escoamento da primeira componente. A menor resistência ao momento fletor obtida no ensaio EE2 deve-se ao fato de que o escoamento da segunda componente, ou seja, mesa da viga em compressão (7), ocorreu imediatamente após ao escoamento da primeira componente para um nível de momento fletor aplicado da ordem de 115,5 kN contra os 126,2kN.m do ensaio EE1.

Para os ensaios EE3, EE4 e EE5, verificou-se que a primeira componente a atingir o escoamento foi a mesa da viga em compressão. Esta componente além de controlar o dimensionamento da zona em compressão da ligação, representa também, uma limitação da resistência da zona em tração devido ao equilíbrio do sistema. Por este motivo, considerando um comportamento elasto-plástico perfeito para as componentes, quando o escoamento se verifica através de uma componente em compressão, este nível de momento fletor corresponde a resistência ao momento fletor da ligação. Nestes ensaios, devido ao esforço axial de compressão e ao fato de que a mesa da viga pertence à classe 1 permitindo uma redistribuição dos esforços, observa-se um ganho de resistência que também pode ser provocado pelo encruamento do aço naquela região.

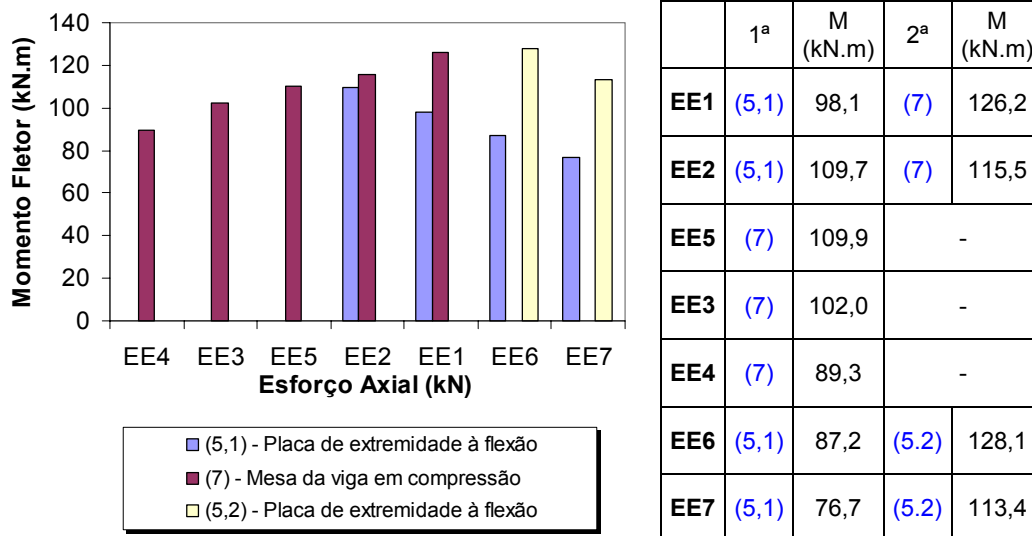


Figura 6.19 – Seqüência de escoamento de componentes ($k_p=0$) – Ensaio EE

Já para os ensaios com esforço axial de tração, EE6 e EE7, verificou-se que o modelo de molas fornece valores de rigidez inicial superiores aos obtidos experimentalmente mas em termos de momento fletor, os resultados se mostraram razoáveis.

Apresenta-se na Tabela 6.4 os valores utilizados para a rigidez de cada uma das componentes, bem como suas resistências calculadas de acordo com as recomendações do Eurocode 3 com coeficientes de resistência tomados iguais a 1,0 e valores reais para a tensão de escoamento dos materiais.

Tabela 6.4 – Coeficientes de rigidez das componentes dos ensaios da série EE

	Componente	F_{Rd} (kN)	k_e (mm)	K_e (kN/mm)	$K_e/2$ (kN/mm)
(C) Compressão	(1)	-642,52	5,75	1206490	603245
	(2)	-653,11	10,13	2128160	1064080
	(7)	-542,21	∞	100000000	50000000
Primeira linha em tração (h = 267,1mm)	(3,1)	533,24	5,74	1204683	602341
	(4,1)	408,32	33,04	6939113	3469557
	(5,1)	289,77	20,11	4222138	2111069
	(10)	441,00	7,76	1630099	815050
Segunda linha em tração (h = 193,1mm)	(3,2)	4,91	7,03	1030793	515396
	(4,2)	28,27	40,47	5937485	2968743
	(5,2)	26,85	14,13	5637909	2818955
	(8)	542,21	∞	100000000	50000000
	(10)	441,00	7,76	1630099	815050

A Tabela 6.5 ilustra as divergências encontradas entre os resultados obtidos numericamente e os resultados experimentais. Neste instante, vale ressaltar que a obtenção da resistência a flexão dos ensaios foi obtida de acordo com o apresentado na Figura 6.20. Uma das formas de avaliar a resistência a flexão através da curva momento *versus* rotação de um ensaio experimental é através do encontro de duas retas que, representam respectivamente, a inclinação da parte elástica e da parte plástica da curva momento *versus* rotação experimental. Porém, a escolha de qual trecho deve ser utilizado para representar a parte plástica da curva faz com que a inclinação desta reta varie significativamente e influencie consideravelmente o valor experimental da resistência a flexão. Sendo assim, adotou-se um valor de comparação obtido para uma rotação de aproximadamente 20mrad para que se pudesse comparar os ensaios executados.

Tabela 6.5 – Comparação entre $M_{j,Rd}$ e $S_{j,ini}$ – numérico e experimental

Ensaio	$M_{j,Rd}$ (kN.m) – $\phi = 20\text{mrad}$			$S_{j,ini}$ (kN.m/rad)		
	teste	modelo ⁴	erro (%)	teste	modelo	erro (%)
EE1	118,7	120,2	16,13	26933	10983	-145,22
EE2	125,4	115,5	2,94	14923	10670	-39,86
EE5	118,1	109,9	-0,72	12077	10467	-15,38
EE3	113,2	102,0	-3,68	11260	10049	-12,05
EE4	111,9	89,3	-16,85	12032	9748	-23,43
EE6	111,5	97,1	2,21	10275	12888	20,27
EE7	101,0	86,1	1,29	10611	13349	20,51

Com os resultados obtidos até o presente momento, torna-se possível traçar as curvas de interação momento fletor *versus* esforço axial, apresentadas na Figura 6.21, considerando os braços de alavanca originais e apenas momento fletor que traciona a mesa superior da viga. Os valores de momento fletor foram obtidos, respectivamente, para níveis de rotação iguais a 15, 20, 25 e 50mrad, sendo o nível de 20mrad adotado para comparação como comentado anteriormente. São apresentadas duas curvas de interação obtidas através do

⁴ Para o caso em que a primeira componente a atingir o escoamento pertença a zona em tração, adota-se o valor de momento fletor no instante em que a segunda componente atinja o escoamento. Já para o caso em que a primeira componente a atingir o escoamento pertença à zona em compressão, considera-se este nível de momento fletor como sendo a resistência à flexão da ligação.

modelo de molas sendo a primeira para um nível de rotação da ordem de 20mrad (termo de comparação com os resultados experimentais) e a segunda correspondente ao momento último obtido.

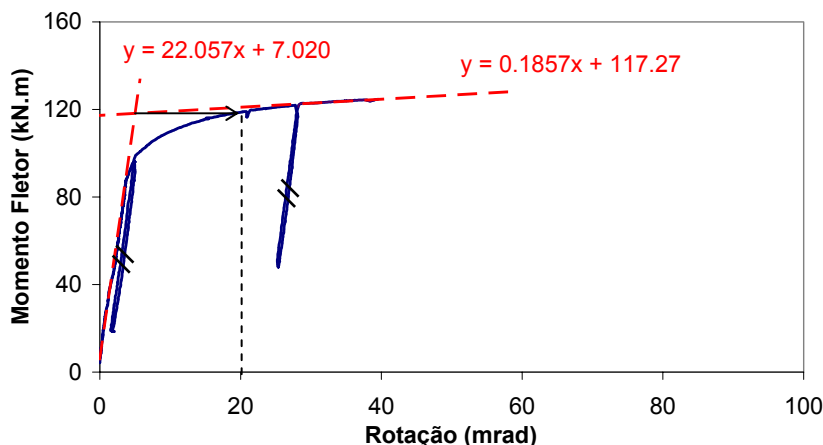


Figura 6.20 – Obtenção de $M_{j,Rd}$ a partir da curva momento versus rotação

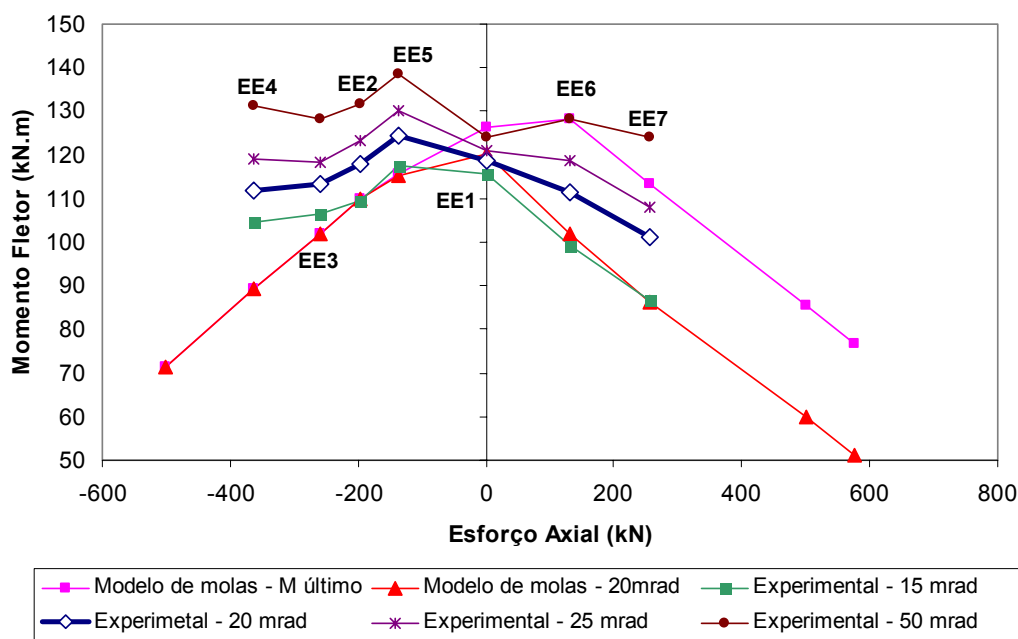


Figura 6.21 – Curva de interação momento fletor versus esforço axial

Conforme pode-se observar, a curva de interação obtida através do modelo proposto para um nível de rotação de 20mrad foi capaz de identificar a perda de resistência à flexão para ensaios com esforço axial de tração, EE6 e EE7. Por outro lado, apesar de fornecer valores consistentes para os ensaios com esforço axial de compressão, ou seja, dentro de limites aceitáveis, também não foi possível reproduzir através do modelo, um ganho de resistência para

níveis com pouco esforço axial, ou seja, ensaios EE2, EE3 e EE5. Observa-se também que, para o ensaio EE4, os valores obtidos experimentalmente podem indicar alguma inconsistência tendo em vista que devido ao nível elevado de esforço axial de compressão, esperava-se uma resistência ao momento fletor inferior aos demais ensaios com esforço axial de compressão.

6.5.2 Comportamento elasto-plástico com rigidez pós-limite

Neste parágrafo, apresenta-se a análise dos resultados obtidos através do modelo proposto para as ligações com placa de extremidade estendida considerando-se que as componentes possuem uma lei constitutiva elasto-plástica com uma rigidez pós-limite diferente de zero. Tendo em vista a grande diferença encontrada entre a rigidez inicial teórica e a experimental, optou-se por utilizar a rigidez inicial elástica das componentes dividida por 2 e a partir destes valores, calibrar-se a rigidez pós-limite das componentes necessárias. As curvas individuais de cada um dos ensaios são apresentadas na Figura 6.22.

Do mesmo modo como foi verificado na primeira análise das ligações com placa de extremidade estendida onde adotou-se $k_p=0$, os resultados obtidos para o ensaio EE1 apresentaram-se bastante diferentes do experimental. Para os ensaios com esforço axial de compressão, a concordância entre as curvas foi mais satisfatória mas para os ensaios com esforço axial de tração, a curva do ensaio EE7 ajustou-se melhor do que para o ensaio EE6.

Na Tabela 6.6 são apresentados os valores da rigidez pós-limite (k_p) calibrados para as componentes necessárias.

Tabela 6.6 – Valores calibrados para rigidez pós-limite k_p

	Componente	k_e (mm)	K_e (kN/mm)	k_p/k_e (%)	K_p (kN/mm)
C	(1)	5,68	596122	0,9000	5365
	(2)	10,4	1064080	0,0400	426
	(7)	∞	1,0E+08	0,0004	20000
T	(5,1)	21,11	2968123	0,0200	422
	(5,2)	14,13	1484061	0,3500	5194

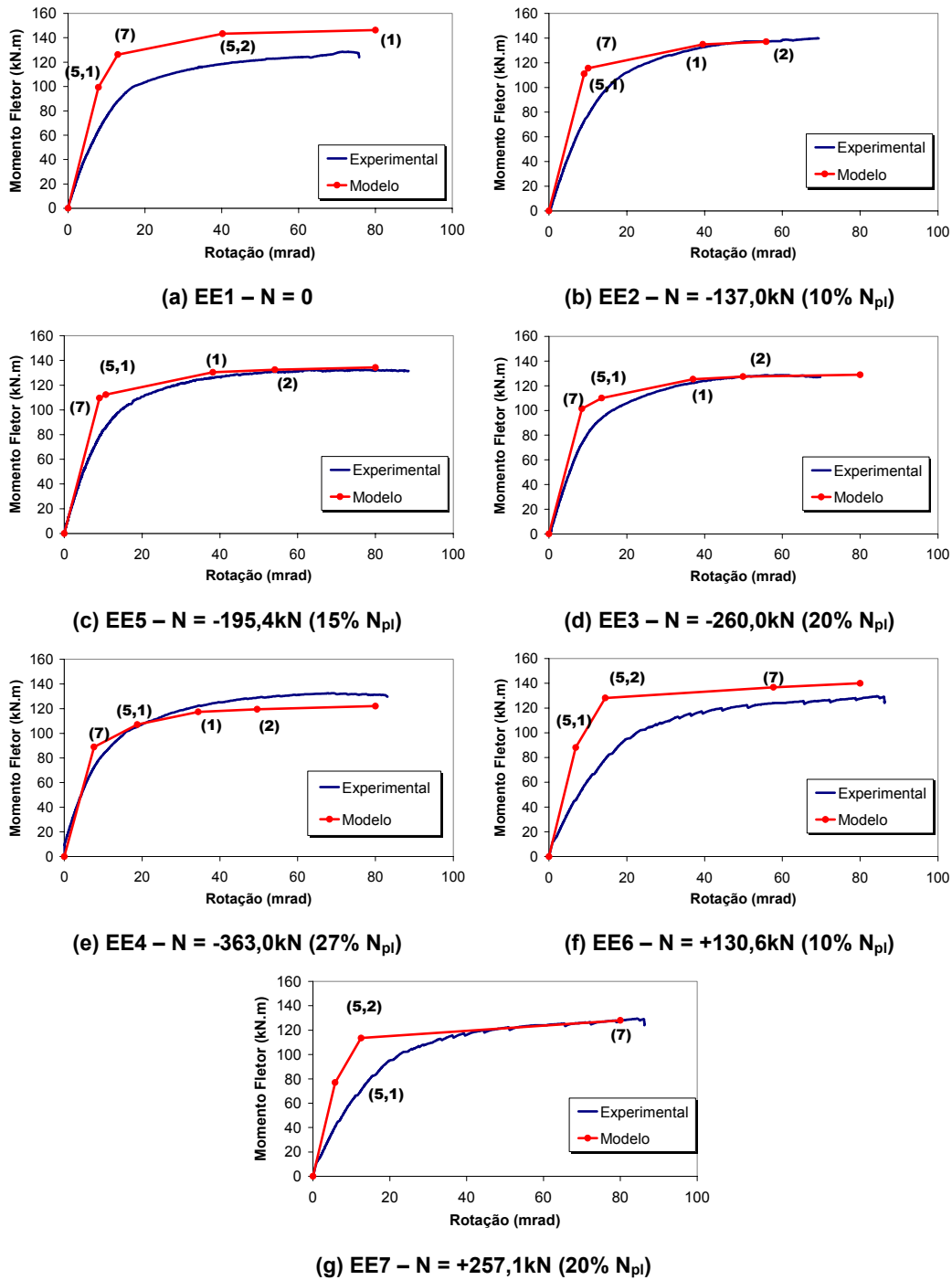


Figura 6.22 – Comparação de curvas momento *versus* rotação – $k_p \neq 0$

6.6

Comparação com o Modelo Proposto por Cerfontaine [11]

Conforme comentado no capítulo dois, o modelo proposto por Cerfontaine [11] baseado nos princípios de dimensionamento recomendados pelo Eurocode 3 fornece a curva de interação momento fletor *versus* esforço

axial para ligações viga-coluna submetidas a momento fletor e esforço axial. Desta forma, apresentam-se a seguir, os diagramas de interação para as duas configurações de ligações utilizadas neste trabalho.

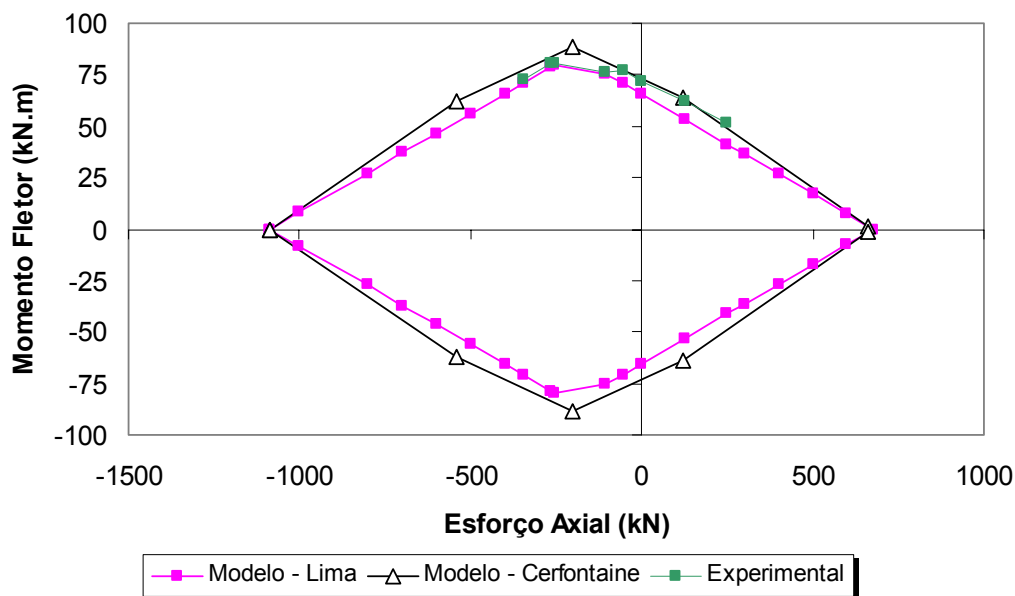


Figura 6.23 – Comparação de curvas momento *versus* – série FE

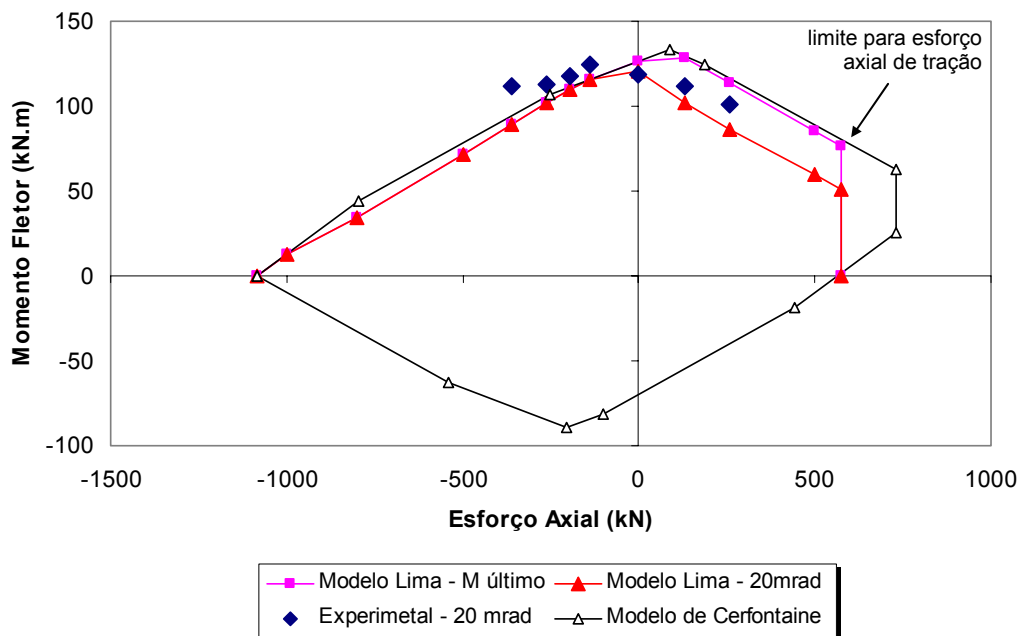


Figura 6.24 – Comparação de curvas momento *versus* – série EE

Comparando-se os resultados obtidos, para os ensaios da primeira série, ou seja, ligações com placa de extremidade ajustada, o modelo proposto neste

trabalho apresentou resultados mais coerentes, até porque, considerou-se apenas uma linha de parafusos em tração. Ambas as curvas são semelhantes por se basearem no mesmo princípio proposto pelo Eurocode 3.

Já para os ensaios da segunda série, existe uma divergência entre os modelos tendo em vista que para esforço axial de tração, tem-se o limite referente ao escoamento da componente mais fraca desta zona, ou seja, a placa de extremidade à flexão cujo valor é de 289,8kN. Ao se aplicar um esforço de tração igual a 576,0kN, tem-se que a força na linha inferior corresponde ao escoamento da componente referida acima.

O modelo proposto por Cerfontaine que considera o momento último da ligação não apresentou uma boa coerência com os resultados experimentais, principalmente para esforços axiais de tração.

Neste capítulo foi apresentado o modelo mecânico proposto neste trabalho e no capítulo seguinte, apresentar-se-ão as considerações finais com as principais conclusões deste trabalho além sugestões para trabalhos futuros.