

## 4

# Avaliação dos Resultados Experimentais – Ensaios de Ligações com Placa de Extremidade Ajustada (FE)

### 4.1

#### Introdução

Neste capítulo apresenta-se a análise dos resultados dos ensaios de ligações com placa de extremidade ajustada – série FE - descritos no capítulo três. Apresentam-se as características relevantes das ligações observadas nos ensaios através de curvas momento *versus* rotação, momento *versus* deslocamento, momento *versus* deformações e, finalmente, momento *versus* tensões. As tensões foram calculadas utilizando-se a lei de Hooke, tendo sua validade limitada ao regime elástico [50]. Nos gráficos onde uma das grandezas representativas seja a tensão, apresenta-se o limite de validade do seu cálculo, obtido dos ensaios uniaxiais de tração. A convenção de sinais utilizada considera que as tensões são positivas quando de tração e os momentos fletores positivos na ligação provocam tração na mesa superior da viga. Da mesma forma, as rotações das ligações são consideradas positivas quando provocadas por um momento positivo, ou seja, com deslocamentos de cima para baixo na extremidade da viga. Os detalhes das ligações são apresentados no capítulo três, §3.2.

### 4.2

#### Verificações Preliminares

Antes da realização de ensaios com aplicação de esforço axial, foi necessário calibrar o sistema de aplicação de carga. Para os ensaios com esforço axial de compressão, a verificação foi efetuada comparando-se os valores obtidos através da célula de carga central, das células localizadas nos cabos de protensão e dos extensômetros localizados nas mesas da viga. Esta comparação pode ser observada na Figura 4.1.

Para os ensaios com esforço axial de tração, a verificação foi realizada através da comparação entre a força medida nas células de carga individuais e

nos parafusos, obtidas com os extensômetros elétricos. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.1.

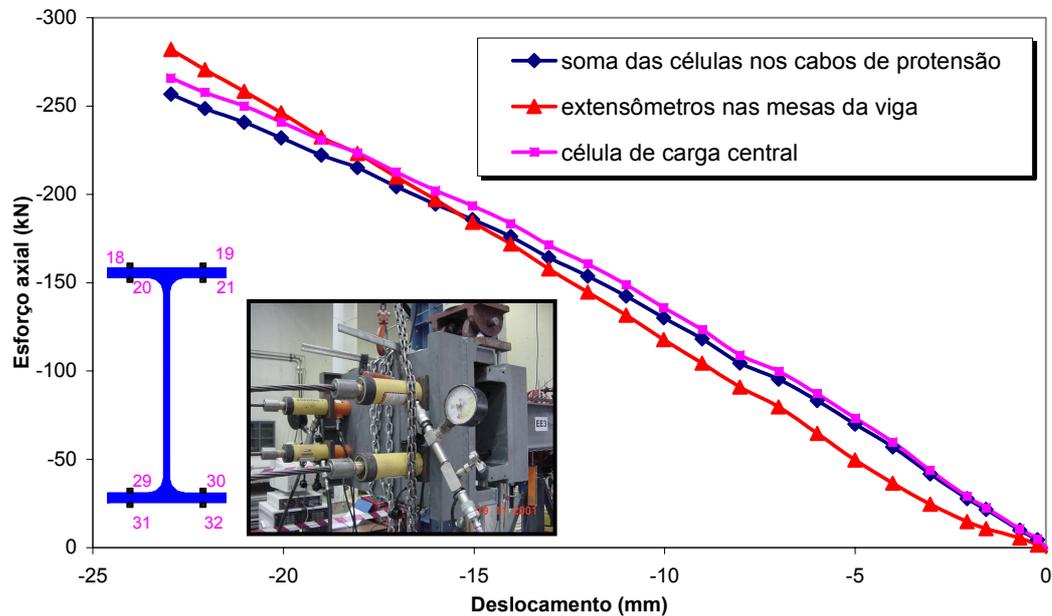


Figura 4.1 – Verificação da aplicação de esforço axial de compressão

Tabela 4.1 – Verificação da aplicação de esforço axial de tração

Parafuso ID	33	34	35	36	37	38
deformação - protensão ( $\mu\epsilon$ )	360	683	574	481	386	916
deformação - esforço axial ( $\mu\epsilon$ )	1	64	108	196	378	430
deformação total ( $\mu\epsilon$ )	361	747	682	677	764	1346
força por linha de parafusos (kN)	66,32		81,34		126,29	
força total - parafusos (kN)	257,0					
força total - células de carga (kN)	274,0					

Observando-se os dados apresentados, verifica-se que ambos os sistemas de aplicação de esforço axial funcionaram adequadamente. Sendo assim, passa-se à análise dos resultados dos ensaios propriamente ditos.

## 4.3

### Análise de Resultados

#### 4.3.1

#### Avaliação das Curvas Momento *versus* Rotação

As curvas momento *versus* rotação dos oito ensaios com placa de extremidade ajustada são apresentadas na Figura 4.1 onde pode-se observar que, mesmo para um nível de esforço axial de compressão, equivalente a 20% da resistência plástica da viga, o momento resistente ainda é superior ao previsto pelo Eurocode 3. Isto deve-se 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 axial de compressão. Vale ressaltar que a rotação medida foi a rotação do nó como um todo, obtida pelos transdutores de deslocamento localizados na viga.

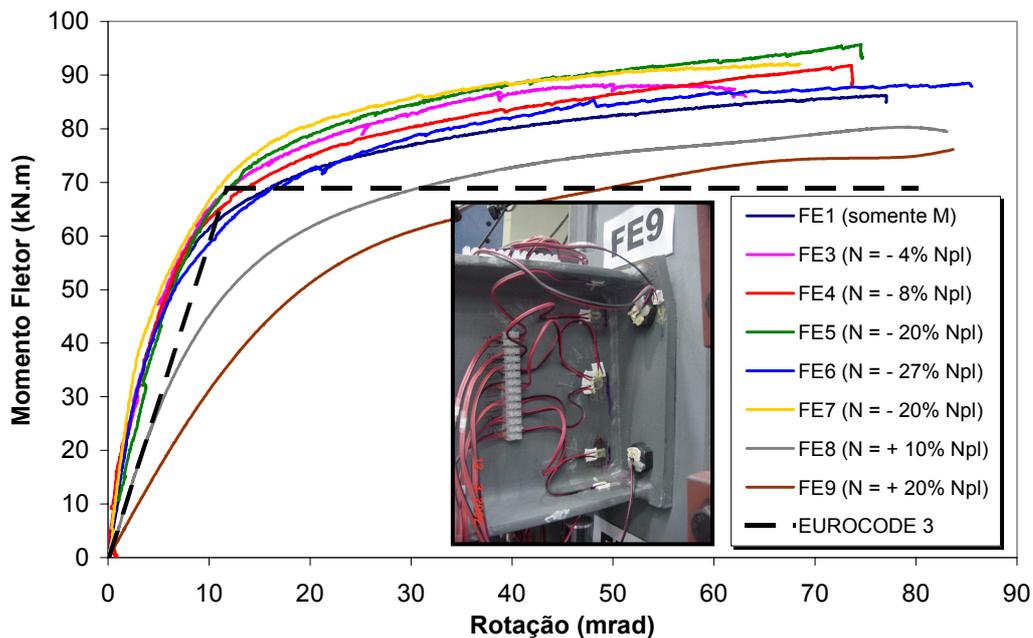
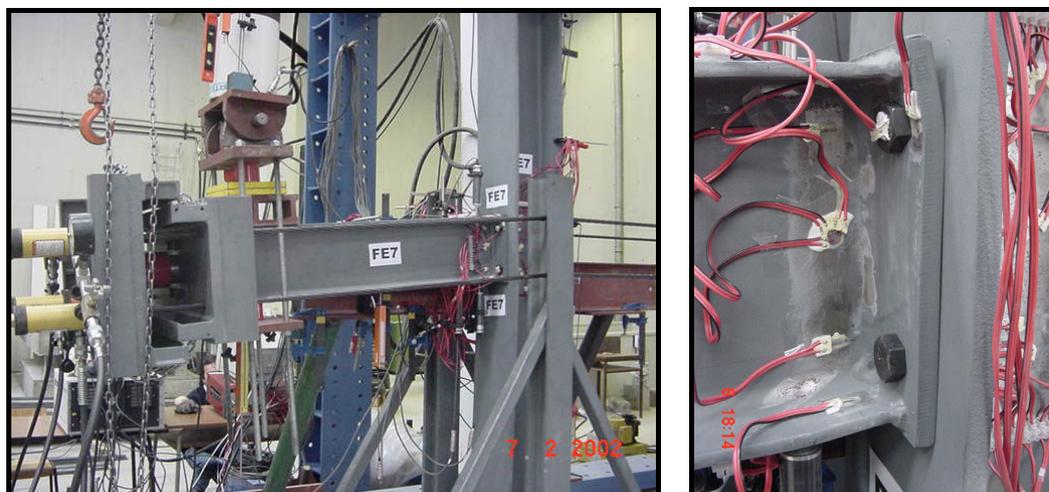


Figura 4.2 – Curvas momento *versus* rotação

Apresenta-se na Figura 4.3(a) uma vista global da estrutura deformada para o ensaio FE7 (-20% N<sub>pl</sub>) e na Figura 4.3(b), um detalhe da ligação, propriamente dita, correspondente ao ensaio FE4 (-8% N<sub>pl</sub>) onde pode-se notar claramente que devido ao nível de esforço axial baixo, a mesa inferior da viga

não sofre deformações muito significativas. Por outro lado, a flexão da placa de extremidade pode ser observada, sendo esta, a componente que controla a ruína da ligação.



(a) vista geral da estrutura do ensaio deformada

(b) detalhe da ligação deformada

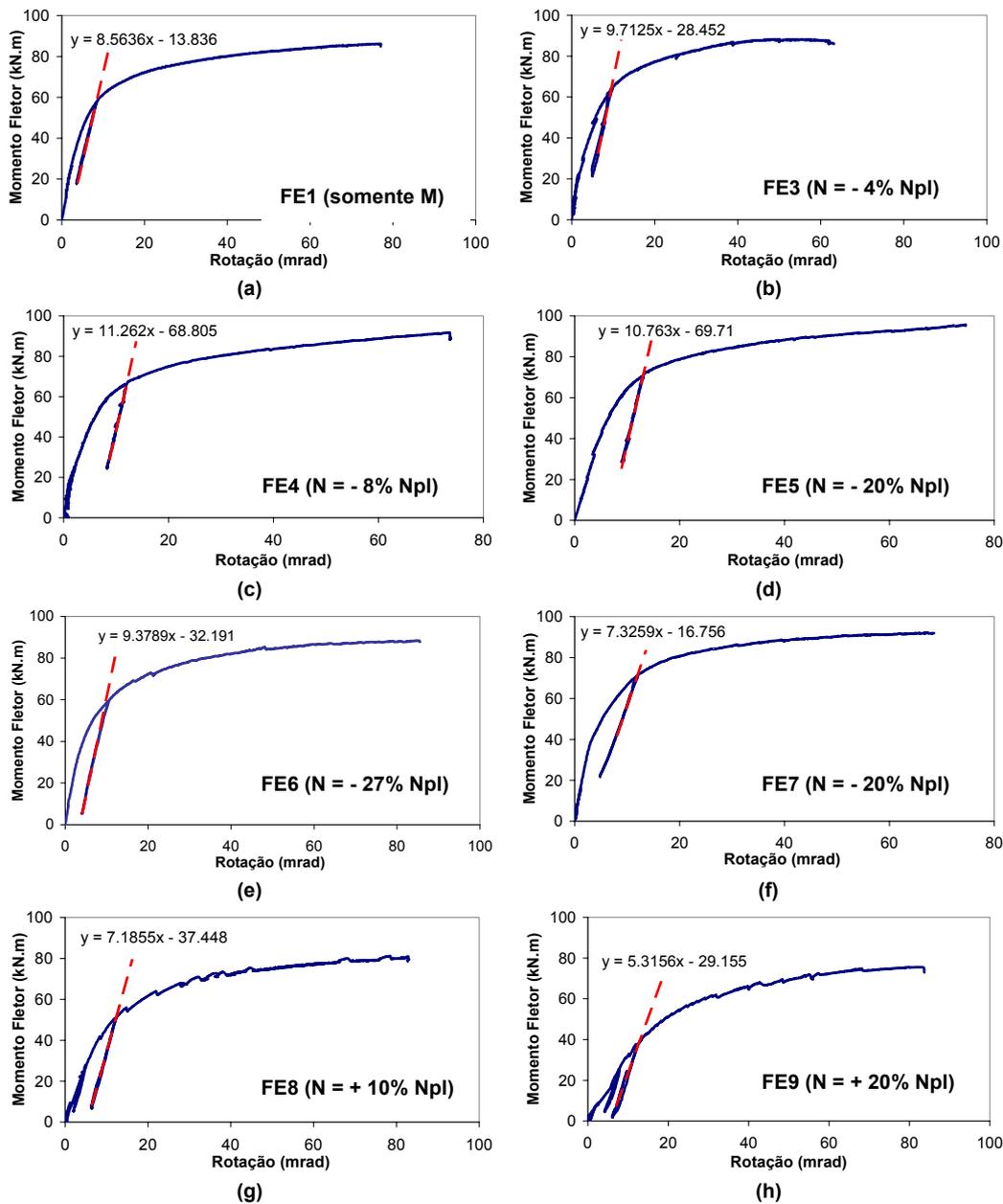
**Figura 4.3 – Deformações ocorridas nos ensaios FE**

A Tabela 4.2 apresenta os valores obtidos para a resistência ao momento fletor e rigidez inicial da ligação para todos os ensaios da série FE. Os valores da rigidez inicial foram obtidos pela inclinação da curva momento *versus* rotação na segunda descarga conforme pode ser observado na Figura 4.4 [52]. Adotou-se este procedimento tendo em vista que na parte inicial da curva, alguns ajustes podem ocorrer na ligação e invalidar a obtenção da rigidez inicial.

**Tabela 4.2 – Valores experimentais para  $M_{j,Rd}$  e  $S_{j,ini}$**

Ensaio	N (kN)	$M_{j,Rd}$ (kN.m)	$M_{j,Rd} / M_{j,Rd FE1}$	$S_{j,ini}$ (kN.m/rad)
FE1 (somente M)	-	72,2	1,00	8564
FE3 (- 4% $N_{pl}$ )	-52,7	77,2	1,07	9713
FE4 (- 8% $N_{pl}$ )	-105,6	74,7	1,03	11262
FE5 (- 20% $N_{pl}$ )	-265,0	80,5	1,11	10763
FE6 (- 27% $N_{pl}$ )	-345,0	72,3	1,00	9379
FE7 (- 20% $N_{pl}$ )	-265,0	80,7	1,12	7326
FE8 (+ 10% $N_{pl}$ )	130,6	61,7	0,85	7185
FE9 (+ 20% $N_{pl}$ )	264,9	51,3	0,71	5315

Os valores teóricos calculados de acordo com o Eurocode 3 utilizando as propriedades mecânicas reais dos materiais, tomando os coeficientes de resistência iguais a 1,0 e desconsiderando a presença do esforço axial, foram respectivamente de,  $M_{j,Rd} = 73,05 \text{ kN.m}$  e  $S_{j,ini} = 11831,4 \text{ kN.m/rad}$ .



**Figura 4.4 – Curvas momento versus rotação com respectivas descargas**

Analisando os valores obtidos, verifica-se que o valor obtido para a resistência ao momento fletor do ensaio FE1 está de acordo com o previsto pelo Eurocode 3. Os ensaios que apresentaram maior momento resistente foram o FE5 e FE7, respectivamente com um ganho de aproximadamente 11,3% em relação ao ensaio FE1. No ensaio FE6, mesmo com um esforço axial elevado,

ainda obteve-se uma resistência ao momento também superior ao ensaio FE1. Por outro lado, para os dois ensaios onde aplicou-se esforço axial de tração, FE8 e FE9, a perda de resistência ao momento fletor foi da ordem de 15,0% e 29,0%, respectivamente.

No que diz respeito à rigidez inicial dos ensaios, os valores não variaram muito entre os ensaios, exceto para o ensaio FE9 que apresentou uma rigidez inicial 38% menor do que no ensaio FE1 devido a influência do elevado esforço axial de tração.

Após a obtenção destes valores, torna-se possível traçar a curva de interação momento *versus* esforço axial apresentada na Figura 4.5. Nesta curva, nota-se claramente que o valor obtido através do Eurocode 3 é bastante conservador para ensaios com esforço axial de compressão e, um tanto quanto, contra a segurança, para ensaios com esforço axial de tração.

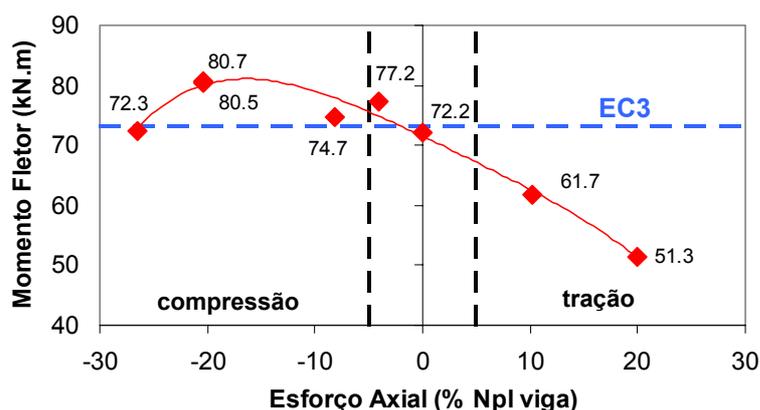


Figura 4.5 – Curva de interação M *versus* N

Na Figura 4.6 são apresentadas as curvas momento *versus* esforço axial para todos os ensaios com placa de extremidade ajustada juntamente com a identificação dos cabos. Observando-se as curvas apresentadas nesta figura e lembrando-se dos comentários feitos no capítulo anterior a respeito da compensação da força aplicada em cada um dos cabos, verifica-se que a solução adotada apresentou resultados satisfatórios.

Além disso, os efeitos provocados pela diferença de força nos cabos nos ensaios iniciais não foram significativos no comportamento global da curva momento *versus* rotação dos mesmos como pode ser comprovado comparando-se as curvas obtidas para os ensaios FE5 e FE7 - Figura 4.7.

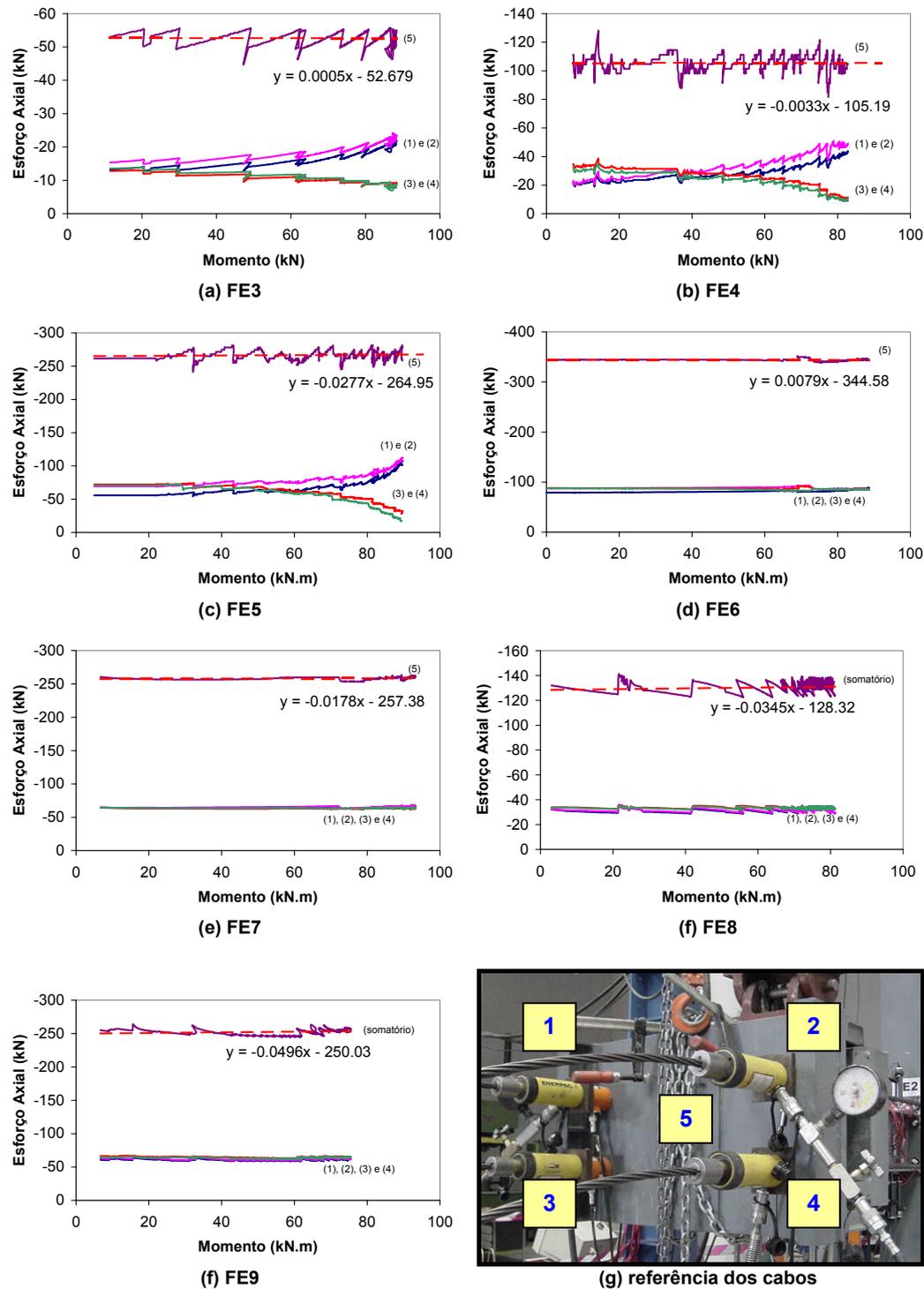


Figura 4.6 – Controle do esforço axial aplicado nos ensaios

A seguir, apresenta-se a análise das componentes mais relevantes para os ensaios das ligações com placa de extremidade ajustada através dos extensômetros e transdutores de deslocamentos utilizados na instrumentação dos mesmos.

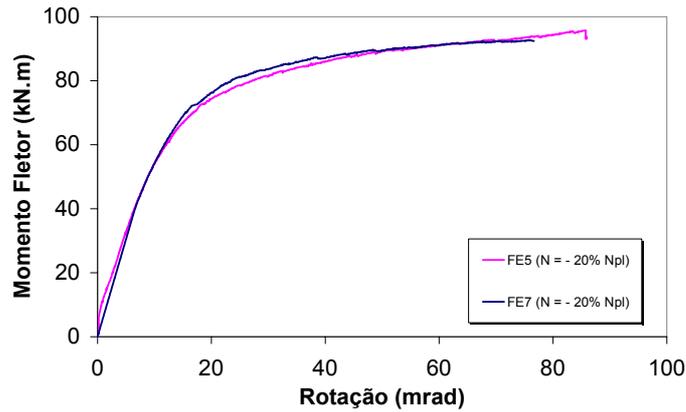


Figura 4.7 – Curvas momento *versus* rotação – ensaios FE5 e FE7

#### 4.3.2

##### Comportamento da alma da coluna em cisalhamento (1)

Por se tratar de uma ligação de um nó de extremidade do pórtico de uma estrutura, grandes deformações são esperadas para a componente alma da coluna em cisalhamento.

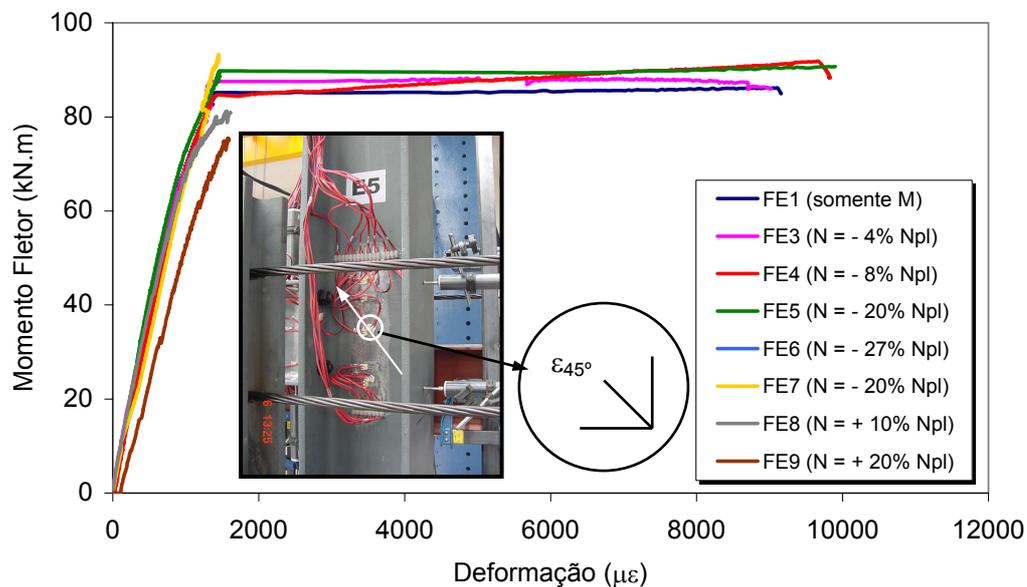


Figura 4.8 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (roseta B – canal 8)

Conforme pode ser observado na Figura 4.8, esta componente atingiu o escoamento nos ensaios FE1, FE3, FE4 e FE5. Nos ensaios, FE7, FE8 e FE9 não se verificou o escoamento desta componente, porém, deformações bastante

elevadas ainda foram observadas. Estas curvas foram obtidas através da roseta colocada no centro do painel de alma da coluna onde utilizou-se o canal a 45° [53]. Vale ressaltar que os canais 7 e 9 correspondem às leituras a 0° e 90°, respectivamente. Nestes gráficos não são apresentados os dados relativos ao ensaio FE6, tendo em vista a perda do canal a 45° desta roseta.

Através desta roseta pode-se avaliar o estado de tensão neste ponto, calculando-se as tensões principais,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , a direção principal,  $\phi_1$  e ainda, a tensão de comparação de *Von Mises*,  $\sigma_{VM}$ .

Analisando-se a Figura 4.9, constata-se que a direção principal neste ponto variou entre 40° e 45°, comprovando-se que a análise da componente em questão pode ser realizada conforme apresentado anteriormente. Vale ressaltar que a presença do esforço axial de tração ou de compressão, não influenciou significativamente a direção deste ângulo.

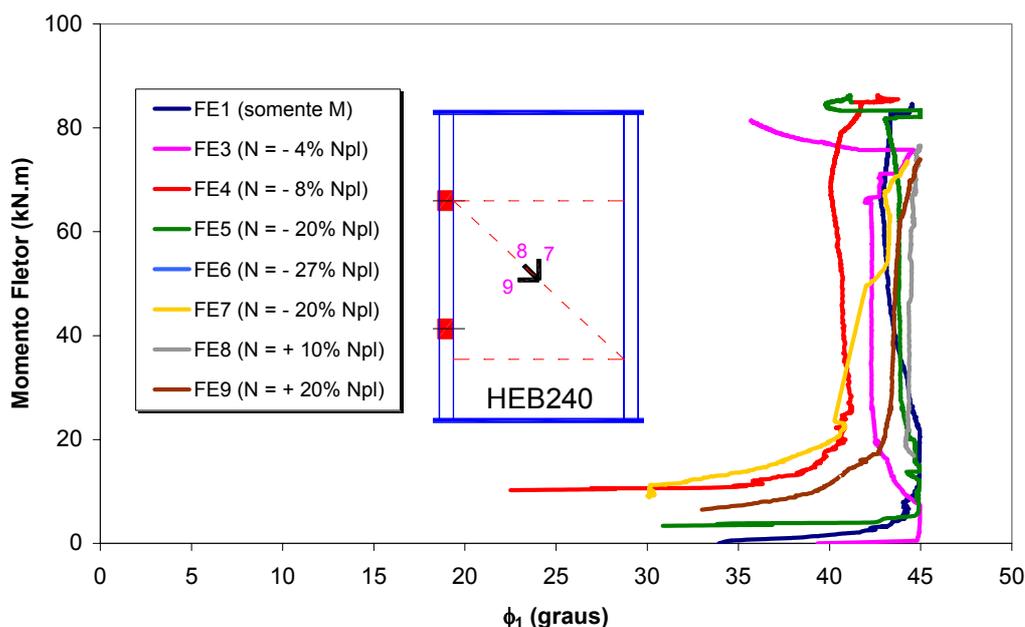


Figura 4.9 – Direção principal  $\phi_1$  (roseta B)

Todavia, as pequenas diferenças ocorridas, podem ter sido provocadas pela dificuldade de se posicionar esta roseta num ângulo exato de 45°. Para complementar a análise desta componente, apresentam-se as tensões principais na Figura 4.10 que comprovam a simetria das tensões principais provocada pelo estado de cisalhamento puro caracterizado pela direção principal  $\phi_1 = 45^\circ$ .

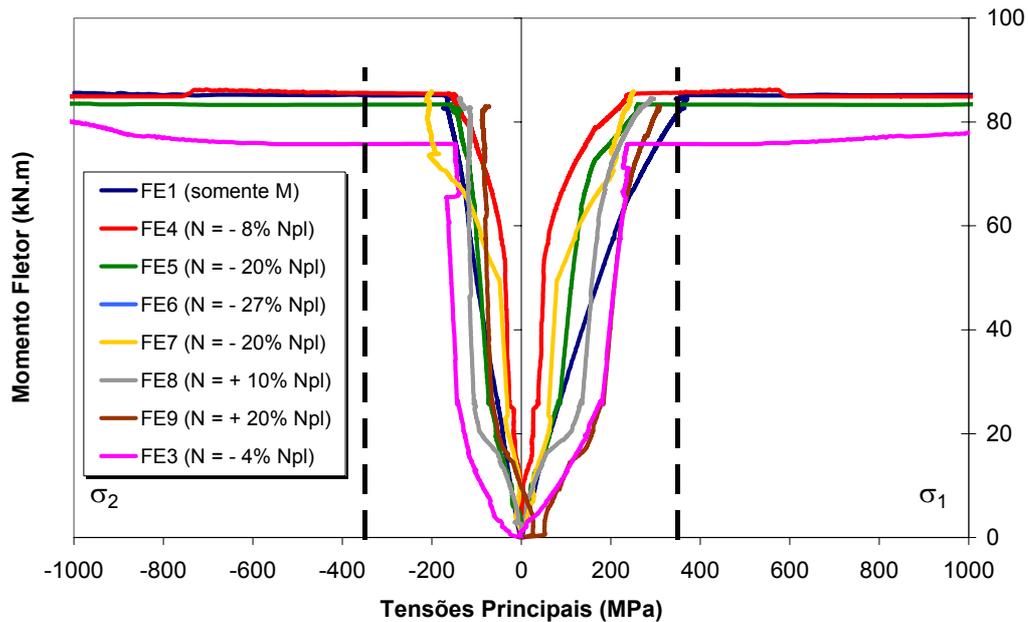


Figura 4.10 – Tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  (roseta B)

Finalmente, as tensões equivalentes de *Von Mises* são apresentadas na Figura 4.11 onde as linhas tracejadas representam o limite de validade deste cálculo, conforme comentado na introdução deste capítulo. Por este critério de ruína, também se percebe que a componente atingiu a tensão equivalente de *Von Mises* em todos ensaios.

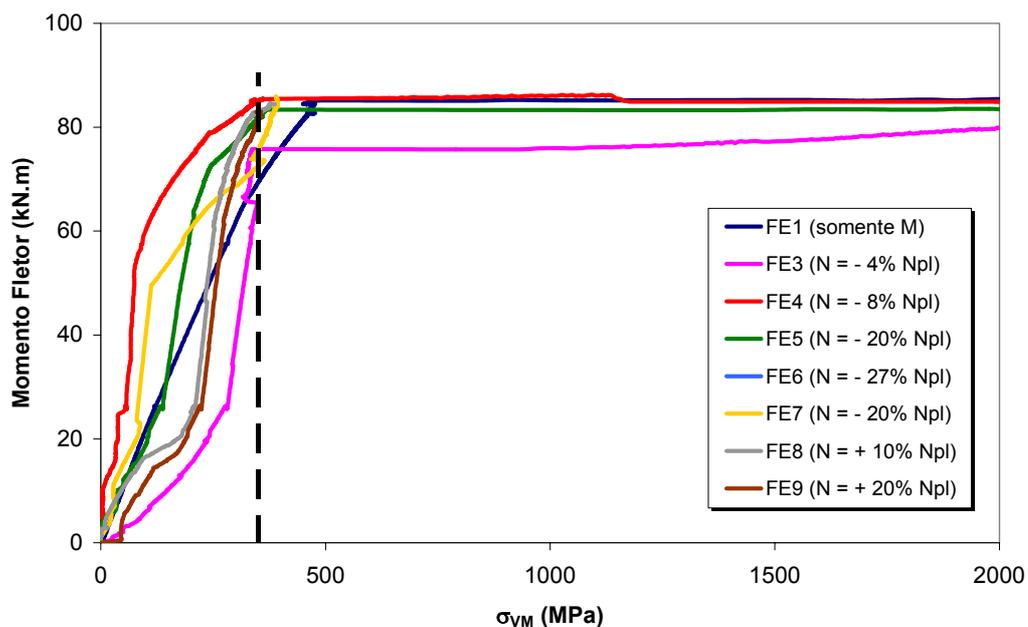


Figura 4.11 – Tensões de *Von Mises*  $\sigma_{VM}$  (roseta B)

### 4.3.3

#### Comportamento da alma da coluna à compressão (2)

Relativamente à região da alma da coluna submetida à compressão, utiliza-se o extensômetro número 11 e a roseta C correspondente aos canais 12, 13 e 14, respectivamente.

Comparando-se a Figura 4.12 e a Figura 4.13, pode-se perceber que as deformações ocorridas na zona comprimida do painel de alma da coluna são maiores na direção da mesa inferior da viga verificadas pelo extensômetro 11, comprovando-se o ângulo de dispersão da força de compressão transmitida ao painel de alma conforme apresentado na Figura 2.7 no capítulo 2.

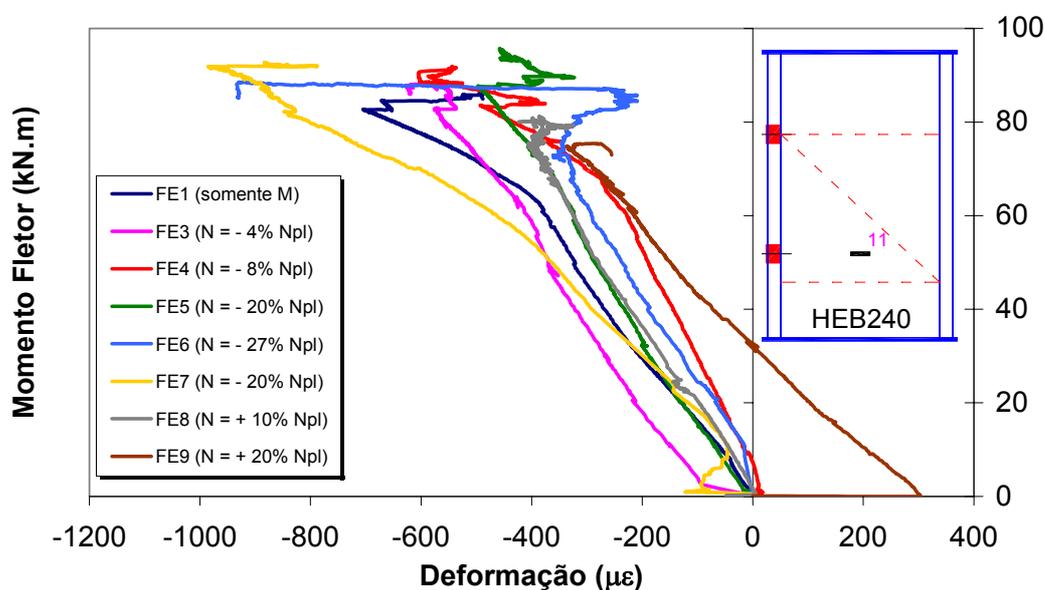


Figura 4.12 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (extensômetro 11)

As direções principais obtidas através da roseta C variaram basicamente entre  $20^\circ$  e  $30^\circ$  respectivamente, Figura 4.14. Entretanto, para os ensaios FE6 e FE7, o valor deste ângulo não se apresentou constante ao longo do ensaio.

Como era de se esperar, as tensões principais  $\sigma_2$  de compressão atingiram valores maiores, em valor absoluto, que as tensões principais  $\sigma_1$  de tração, Figura 4.15.

Através da observação da Figura 4.16 onde são apresentadas as curvas momento *versus* tensões de *Von Mises*, conclui-se que esta componente não atingiu o escoamento em nenhum dos ensaios. Este resultado era esperado tendo em vista que esta componente tem um valor de resistência bastante

superior (657,7 kN) quando comparada com os valores das demais componentes da região comprimida da ligação, ou seja, alma da coluna em cisalhamento (642,6 kN) e mesa da viga à compressão (542,2 kN) - componente crítica.

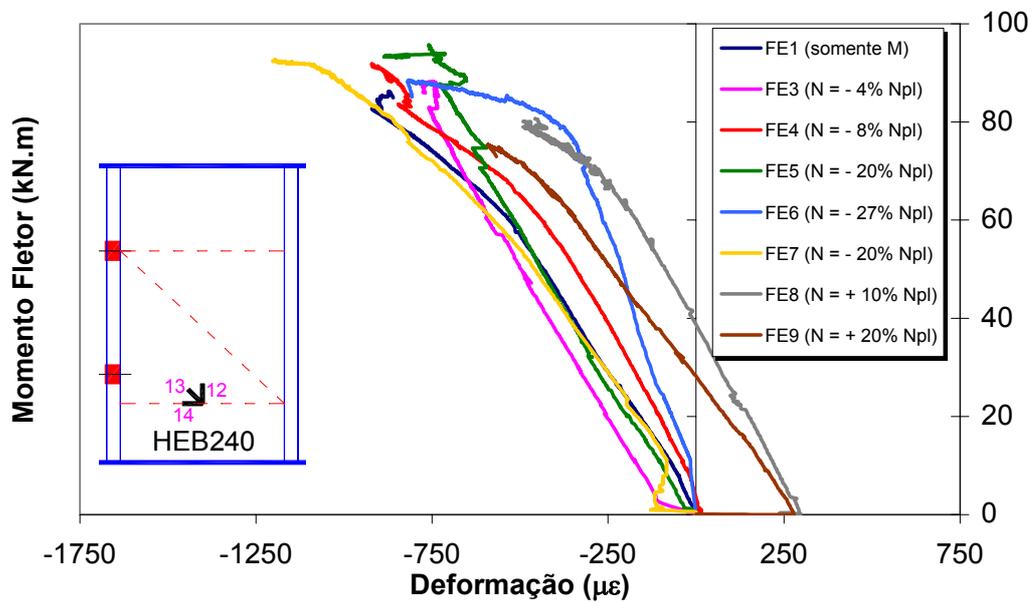


Figura 4.13 – Curvas M x  $\epsilon$  da alma da coluna à compressão (roseta C - canal 14)

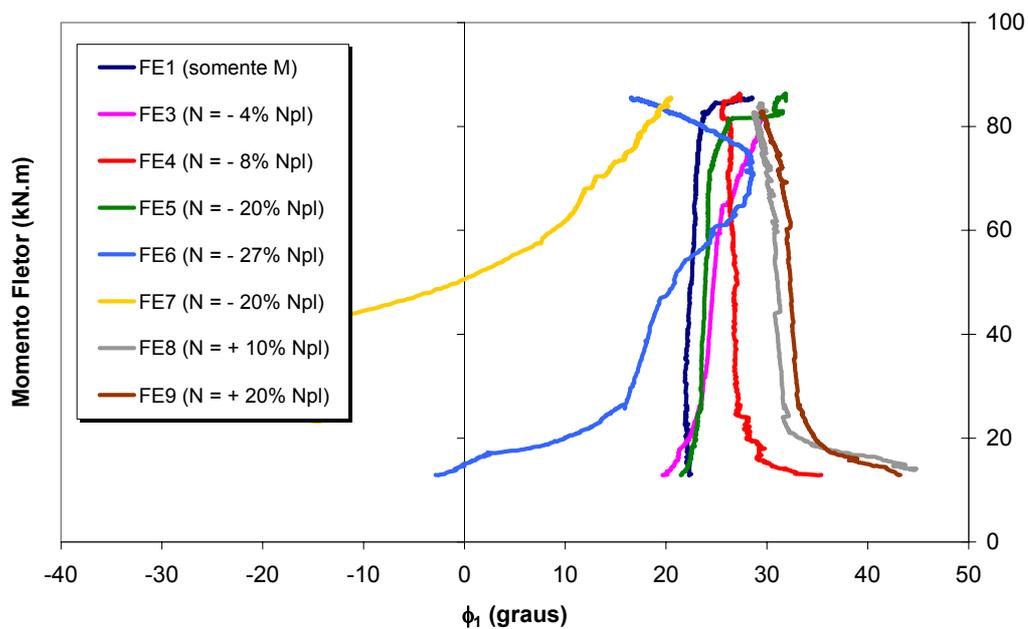


Figura 4.14 - Direção principal  $\phi_1$  (roseta C)

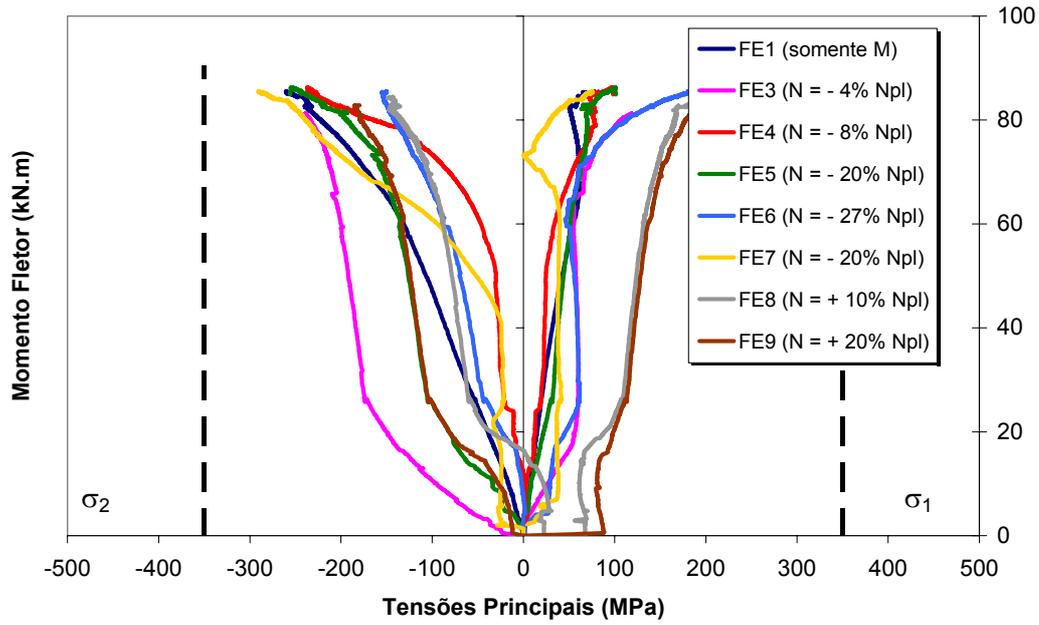


Figura 4.15 – Tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  (roseta C)

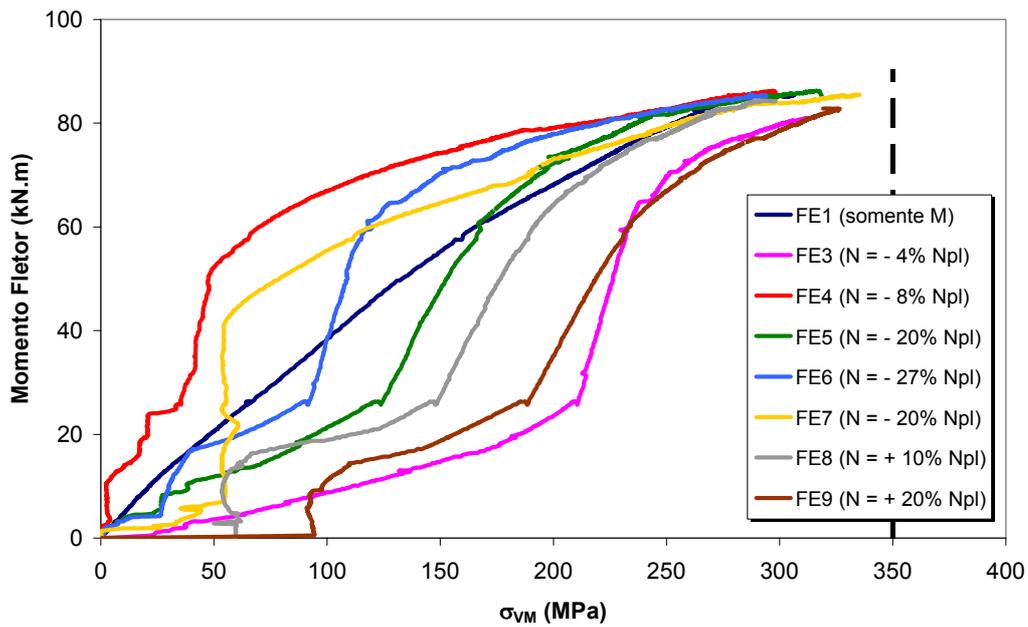


Figura 4.16 - Tensão de *Von Mises*  $\sigma_{VM}$  (roseta C)

#### 4.3.4

##### Comportamento da alma da coluna à tração (3)

Para a região da alma da coluna submetida à tração, utiliza-se a roseta A correspondente aos canais 3, 4 e 5 e o extensômetro número 6, respectivamente.

Ao contrário da zona comprimida da ligação, na zona tracionada, as deformações medidas pelo canal horizontal da roseta C e pelo extensômetro 6 são praticamente iguais conforme observado na comparação efetuada entre a Figura 4.17 e a Figura 4.18.

Com relação a direção principal obtida através da roseta C, Para os ensaios com esforço axial de compressão, foram obtidas direções negativas em torno de  $-20^\circ$ . Todavia, para os ensaios com esforço axial de tração, os valores obtidos indicaram uma direção principal positiva de aproximadamente  $15^\circ$  – ver Figura 4.19.

Observando-se a Figura 4.20 percebe-se que a tensão principal  $\sigma_1$  é de tração, como era de se esperar, mas para o ensaio FE6 onde aplicou-se o maior esforço axial de compressão, constatou-se uma progressão bastante rápida das deformações de tração. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores das tensões principais para um nível de momento fletor aplicado igual a 50kN.m.

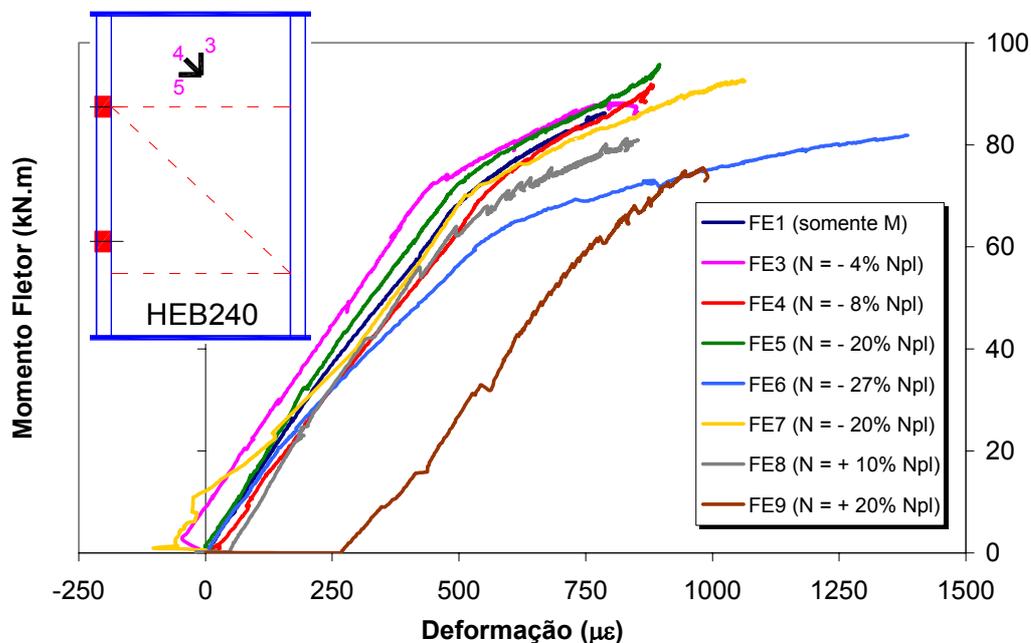


Figura 4.17 – Curvas M x  $\epsilon$  (roseta A - canal 5)

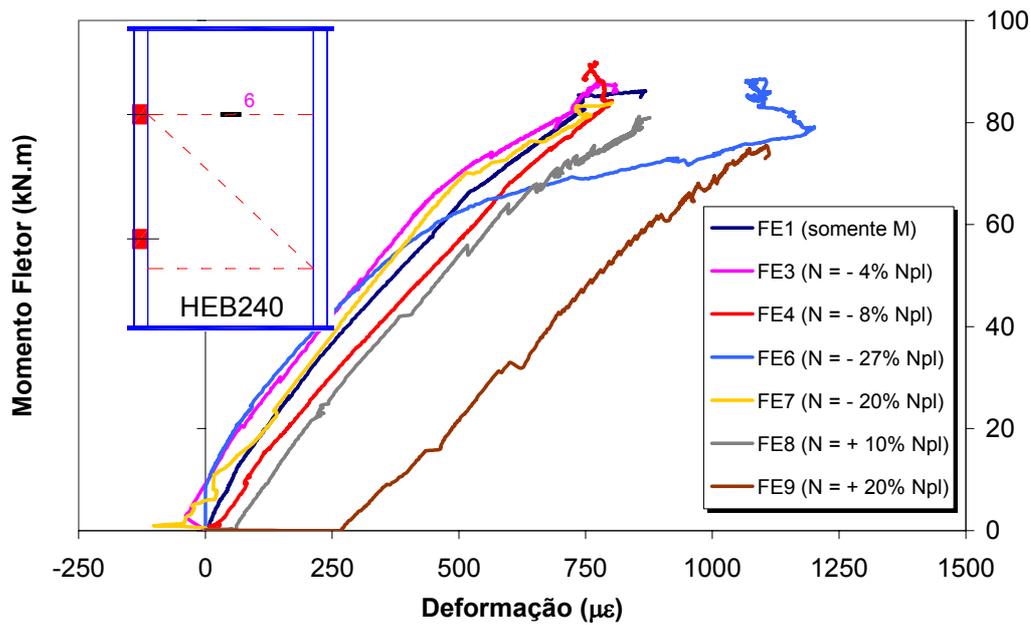


Figura 4.18 – Curvas M x  $\varepsilon$  (extensômetro 6)

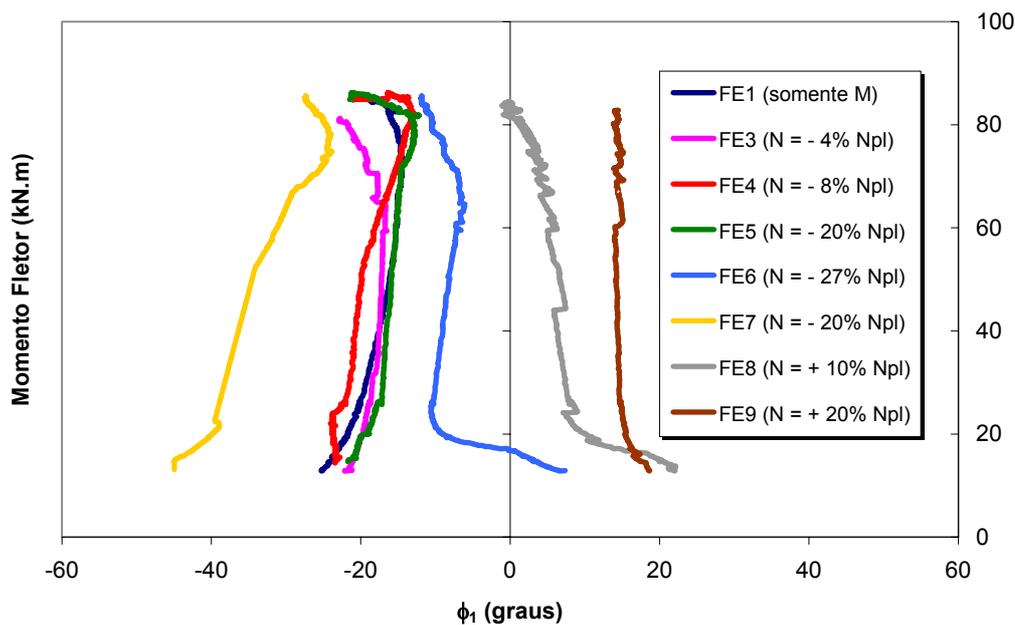


Figura 4.19 - Direção principal  $\phi_1$  (roseta A)

Finalmente, analisando-se a Figura 4.21 e comparando-se as tensões equivalentes de *Von Mises* obtidas para esta componente, percebe-se que somente para o ensaio FE6, esta componente atingiu o escoamento. Todavia, isto não deveria ter ocorrido tendo em vista que neste ensaio, aplicou-se o maior esforço axial de compressão, o que deveria aliviar esta componente.

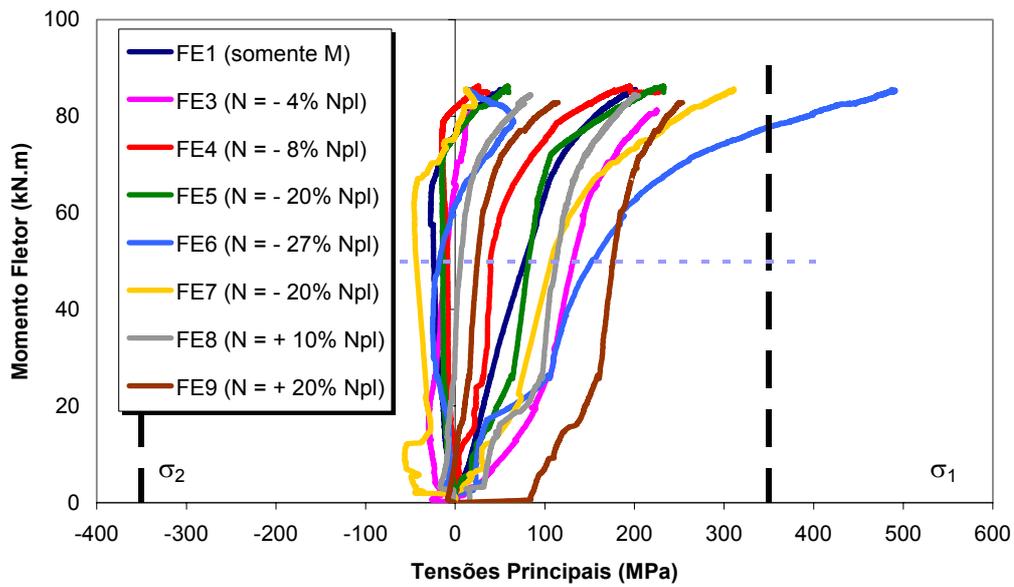


Figura 4.20 – Tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  (roseta A)

Tabela 4.3 – Tensões principais - roseta A para  $M = 50\text{kN.m}$  (em MPa)

Ensaio	FE1	FE3	FE4	FE5	FE6	FE7	FE8	FE9
$\sigma_1$ (MPa)	79,5	132,7	39,8	81,9	158,2	111,7	108,0	177,0
$\sigma_2$ (MPa)	-24,3	-8,2	-8,6	-13,8	-17,1	-45,2	6,4	25,2

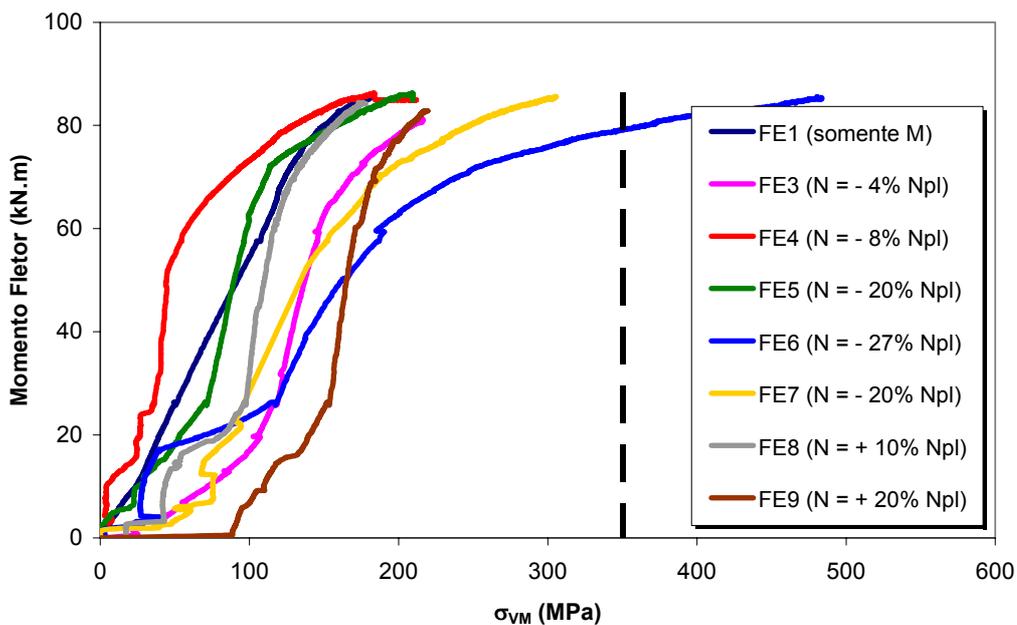


Figura 4.21 - Tensão de Von Mises  $\sigma_{VM}$  (roseta A)

#### 4.3.5

##### Comportamento da mesa da coluna à flexão (4)

O comportamento da componente mesa da coluna à flexão foi avaliado através do transdutor de deslocamento número 45 cuja base estava presa a uma estrutura de apoio independente da estrutura que estava a ser testada e do extensômetro 10 localizado logo abaixo da linha superior de parafusos – ver Figura 4.22(a) - não sendo suficiente para uma análise mais profunda desta componente, até porque, esta não era a mais relevante no dimensionamento das ligações estudadas.

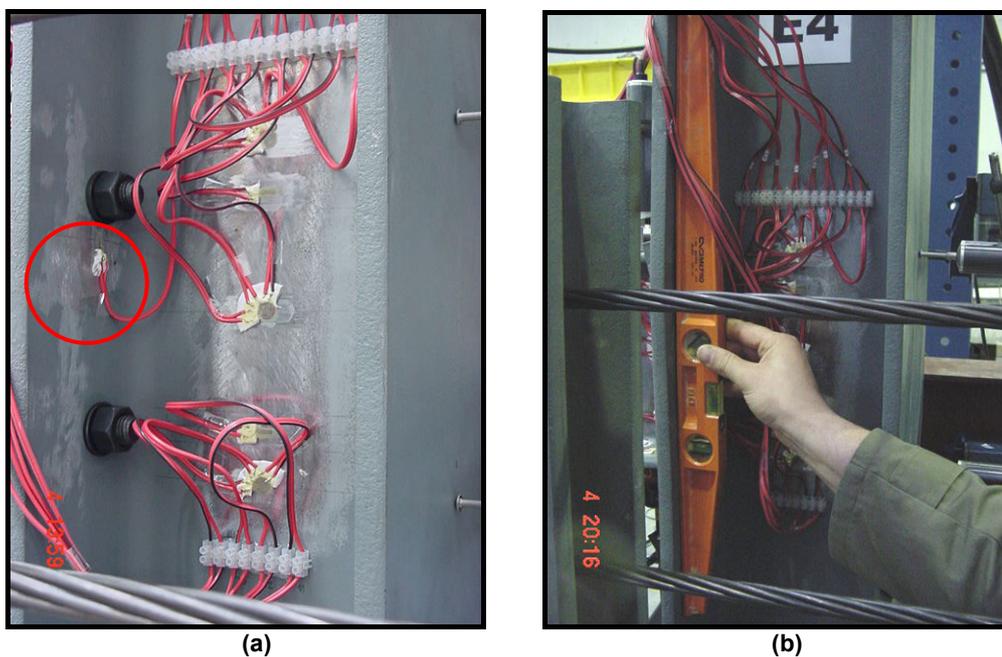


Figura 4.22 – Deformação da mesa da coluna submetida à flexão

Nas curvas momento versus deformação apresentadas na Figura 4.23 pode-se observar que, para todos os ensaios FE, a componente mesa da coluna à flexão apresentou deformações elevadas segundo o mecanismo de ruptura tipo 1 de um T-stub, ou seja, completo escoamento da mesa. Este tipo de mecanismo foi descrito anteriormente e a configuração deformada da mesa da coluna pode ser observada na Figura 4.22(b).

Novamente, nos ensaios onde se aplicou esforço axial de tração, percebe-se que esta componente atinge o escoamento para níveis inferiores de carregamento quando comparados com os ensaios com esforço axial de compressão.

Os deslocamentos medidos para esta componente são apresentados na Figura 4.24 onde nota-se que as curvas apresentaram o mesmo comportamento, independente do nível de esforço axial aplicado. Vale ressaltar que o transdutor utilizado no ensaio FE6 apresentou problemas de leitura ocasionando a perda dos dados.

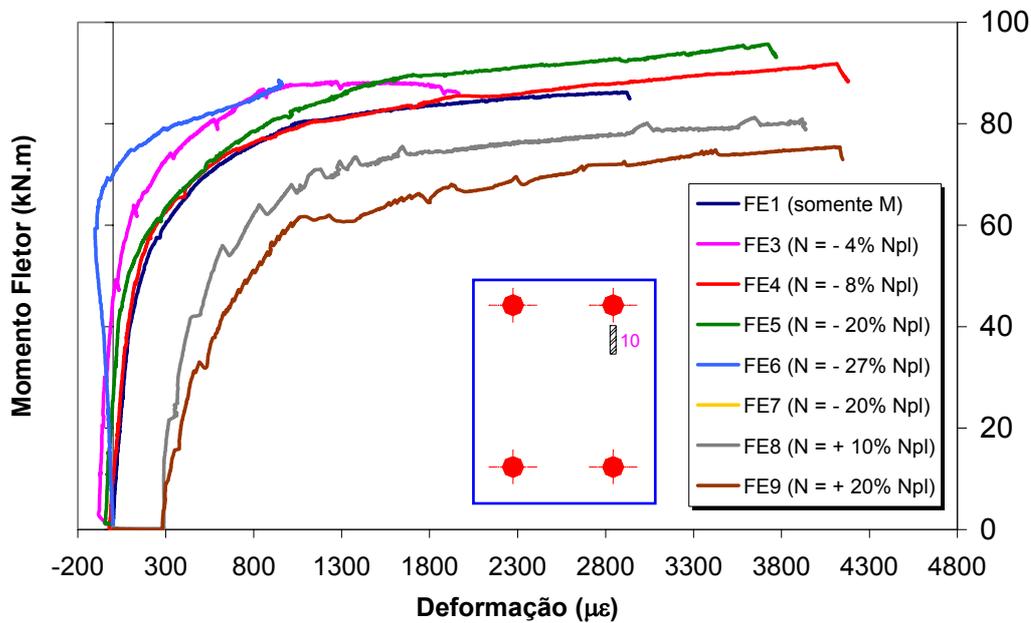


Figura 4.23 – Curvas  $M \times \epsilon$  (extensômetro 10)

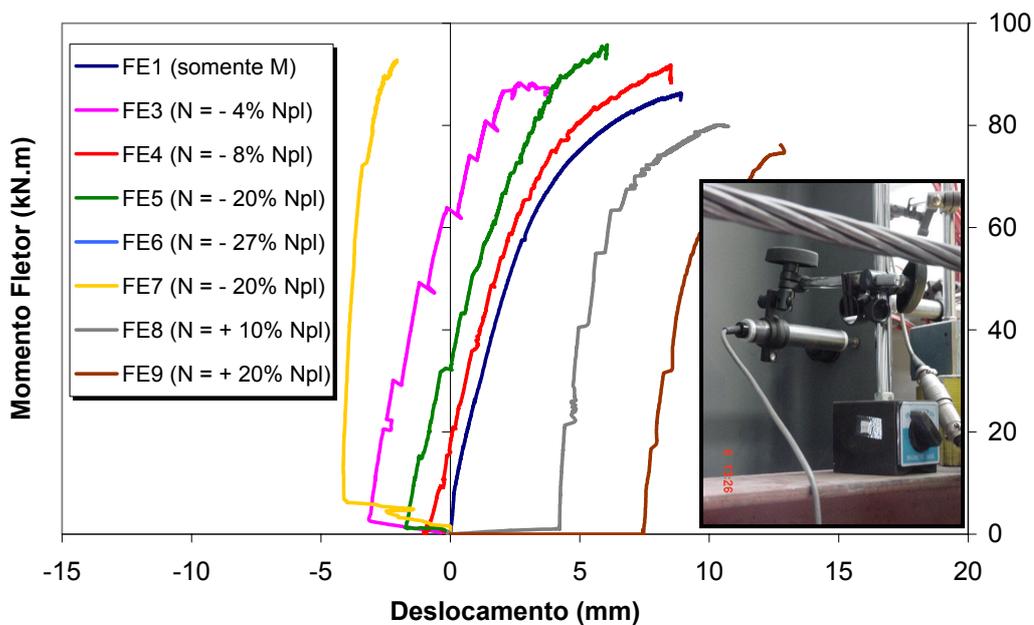
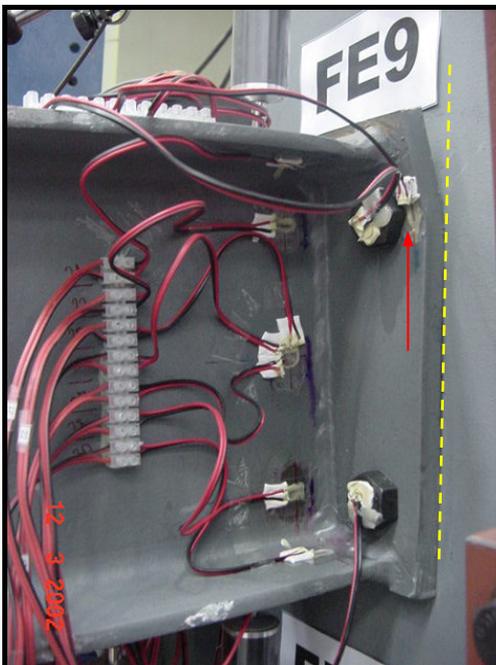
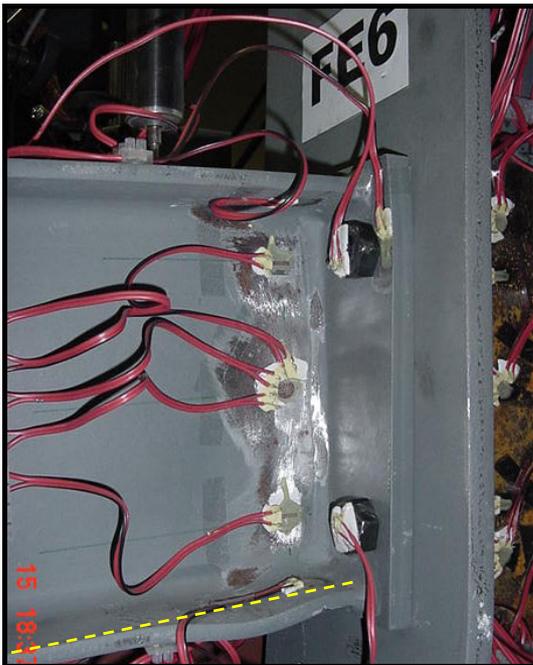


Figura 4.24 – Curvas  $M \times \delta$  (transdutor 45)

#### 4.3.6

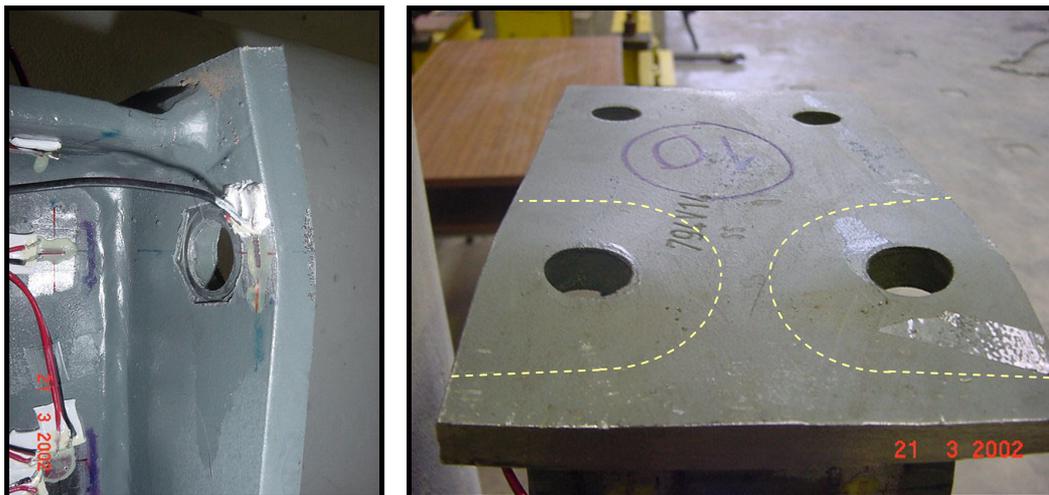
##### Comportamento da placa de extremidade à flexão (5)

Para os ensaios com placa de extremidade ajustada, a componente placa de extremidade à flexão foi avaliada através dos extensômetros 23 e 24 e do transdutor de deslocamentos 44.



(a) Ensaio FE6 ( $N = -27\% N_{pl}$ )

(b) Ensaio FE9 ( $N = +20\% N_{pl}$ )



(c) vista frontal – FE9

(d) “charneiras” plásticas

**Figura 4.25 – Deformações da placa de extremidade à flexão – Ensaio FE**

Avaliando-se as configurações deformadas dos ensaios FE6 e FE9, apresentadas na Figura 4.25, onde aplicou-se, respectivamente, o máximo esforço axial de compressão e o máximo esforço axial de tração, nota-se a diferença de comportamento desta componente. No ensaio FE6 percebe-se que a placa de extremidade à flexão foi menos solicitada, porém, a mesa da viga em compressão apresenta-se totalmente plastificada. E no ensaio FE9, acontece o contrário, completa plastificação da placa de extremidade e menor solicitação da mesa da viga em compressão. Também se pode observar a placa de extremidade do ensaio FE9 após a desmontagem do mesmo com a representação das “charneiras” plásticas desenvolvidas.

Na Figura 4.26 e Figura 4.27, respectivamente, nota-se novamente, como o esforço axial (tração/compressão) pode afetar o comportamento da componente crítica da ligação ensaiada. Nos ensaios com esforço axial de compressão, o escoamento somente é atingido em níveis mais elevados de carregamento. Por outro lado, nos ensaios onde aplicou-se esforço axial de tração, este escoamento foi atingido em níveis inferiores de carregamento.

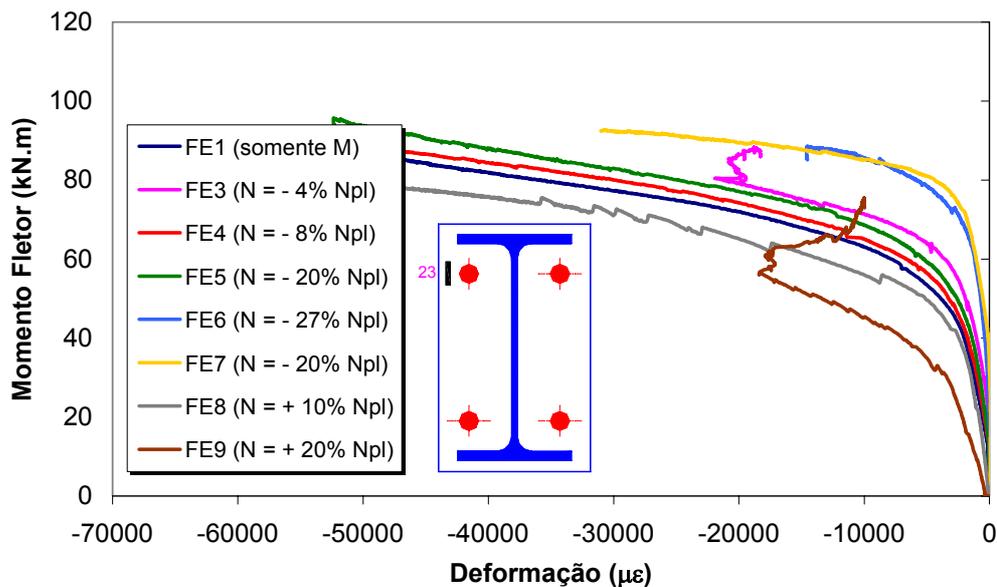


Figura 4.26 – Curvas M x  $\varepsilon$  (extensômetro 23)

De acordo com as recomendações de projeto do Eurocode 3, a resistência da componente placa de extremidade à flexão é igual a 289,8kN (valor obtido com a resistência à tração real do material). Nos gráficos apresentados na Figura 4.26 e Figura 4.27, esta componente atinge o escoamento no ensaio FE1, para um nível de momento de aproximadamente 60kN.m. Para este nível de momento, a força de tração nos parafusos superiores, calculadas através das deformações nos extensômetros colocados nestes parafusos<sup>2</sup>, é igual a 264,4kN mostrando uma boa concordância entre os resultados. No entanto, para o ensaio FE6, o escoamento da componente foi atingido para um nível superior de momento fletor, devido a presença do esforço axial de compressão.

<sup>2</sup> A análise da componente referente aos parafusos submetidos à tração será apresentada numa seção posterior deste capítulo.

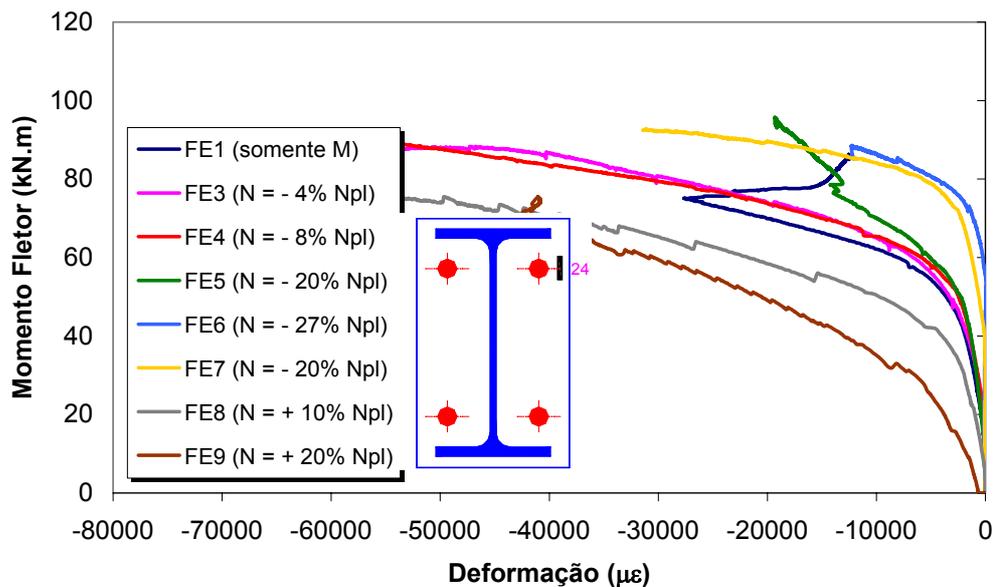


Figura 4.27 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (extensômetro 24)

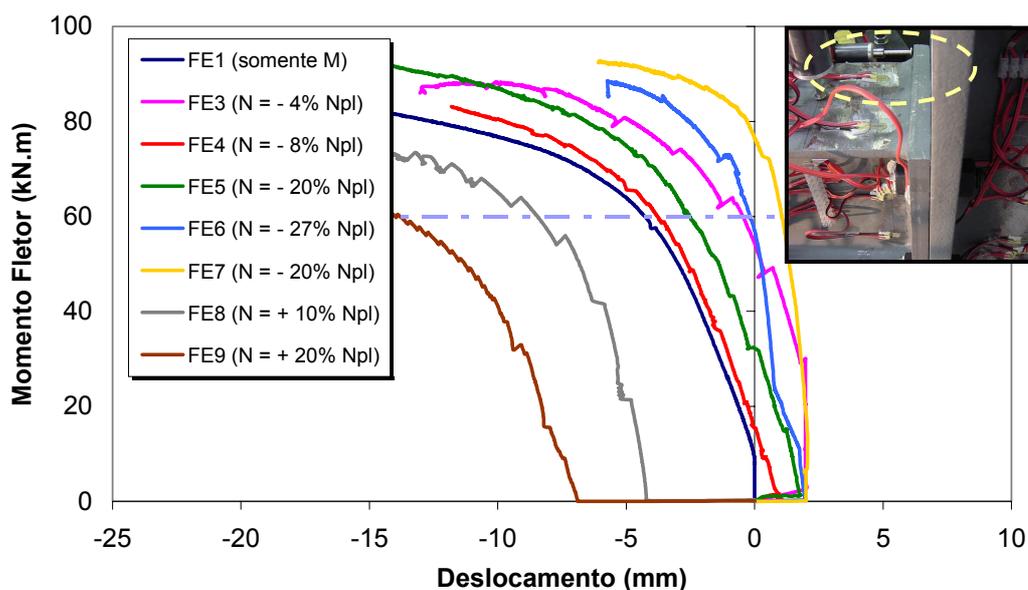


Figura 4.28 – Curvas  $M \times \delta$  (transdutor 44)

Na Figura 4.28 são apresentadas as curvas momento *versus* deslocamento obtidas através do transdutor de deslocamentos número 44 onde nota-se a evolução das curvas dos diversos ensaios. Na Tabela 4.4 são sumarizados os valores destes deslocamentos medidos no instante em que se aplicou o esforço axial e depois, para um nível de momento fletor aplicado igual a 60kN.m. Percebe-se novamente, como o esforço axial influencia o comportamento inicial da componente placa de extremidade à flexão.

Tabela 4.4 – Deslocamentos da placa de extremidade (em mm)

Ensaio	FE1	FE3	FE4	FE5	FE6	FE7	FE8	FE9
$\delta_{M=0 \text{ kN.m}}$ (mm)	-4,5	-0,5	-3,9	-2,74	-0,3	1,0	-8,6	-14,2
$\delta_{M=60 \text{ kN.m}}$ (mm)	0	2,0	1,0	1,7	1,8	2,0	-4,2	-7,0

#### 4.3.7

##### Comportamento da mesa da viga à compressão (7)

Na tentativa de se avaliar o comportamento da mesa da viga submetida à compressão, utilizar-se-á os extensômetros 29 a 32. Analisando-se as curvas apresentadas a seguir, percebe-se claramente que a mesa da viga em compressão também atinge o escoamento em todos os ensaios.

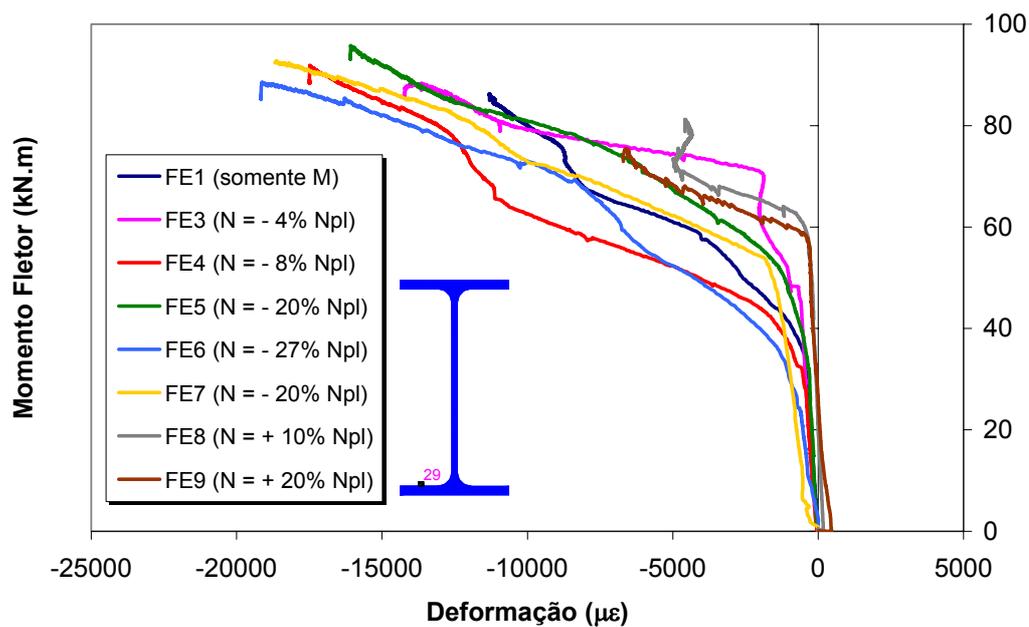


Figura 4.29 – Curvas M x ε (extensômetro 29)

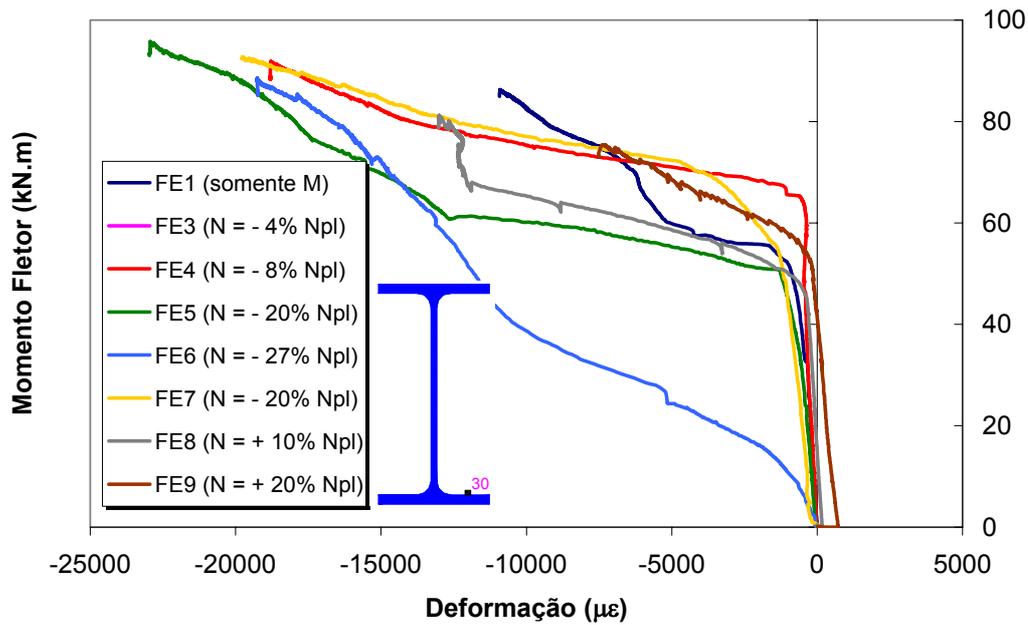


Figura 4.30 – Curvas M x  $\epsilon$  (extensômetro 30)

Todavia, as diferenças verificadas entre extensômetros posicionados simetricamente na mesa inferior da viga podem ter sido provocadas por imperfeições iniciais verificadas no controle dimensional das mesmas, ou ainda, por alguma excentricidade existente na aplicação do esforço axial ou do momento fletor.

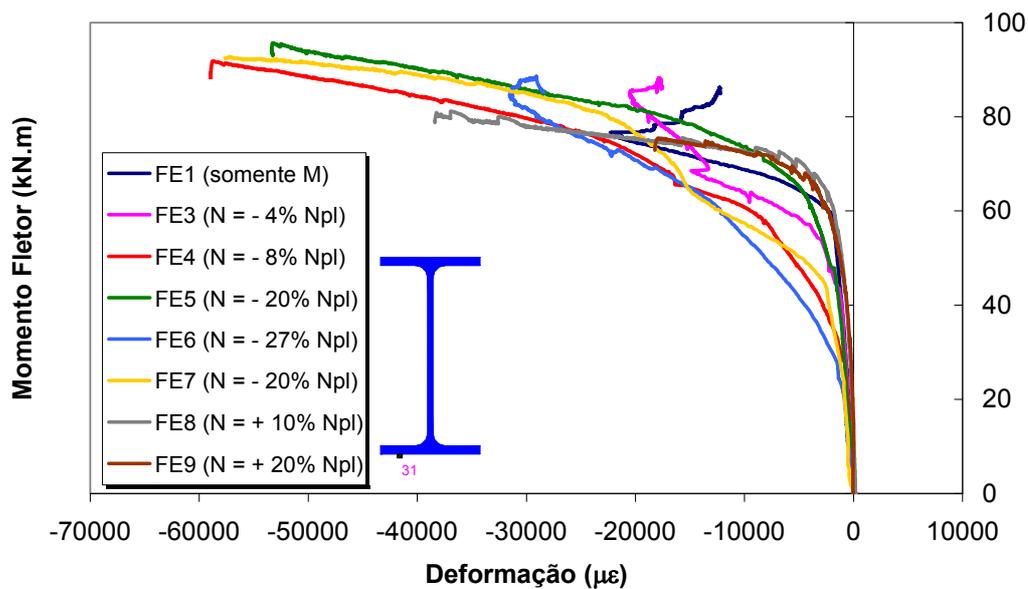


Figura 4.31 – Curvas M x  $\epsilon$  (extensômetro 31)

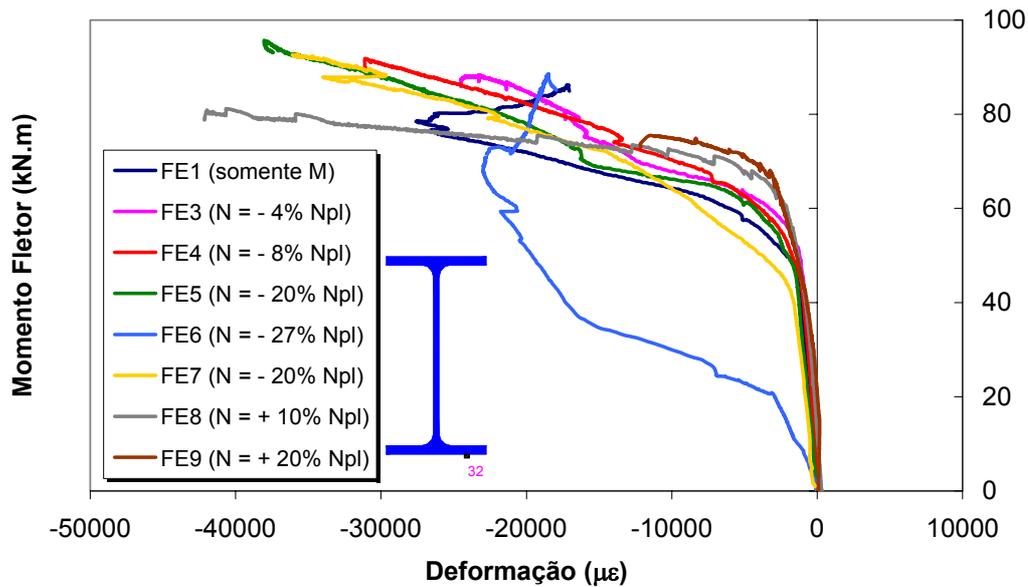


Figura 4.32 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (extensômetro 32)

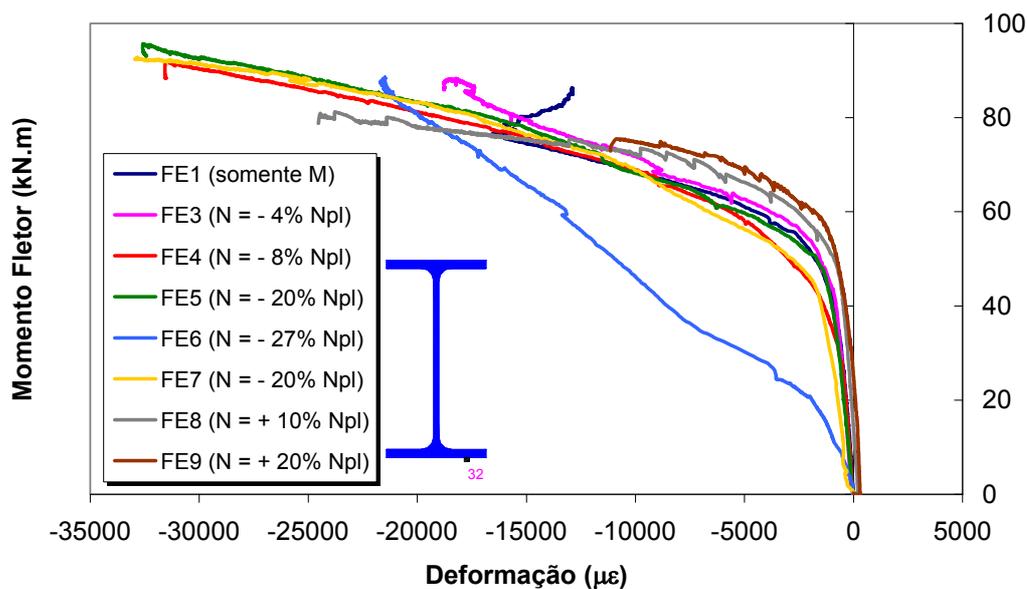
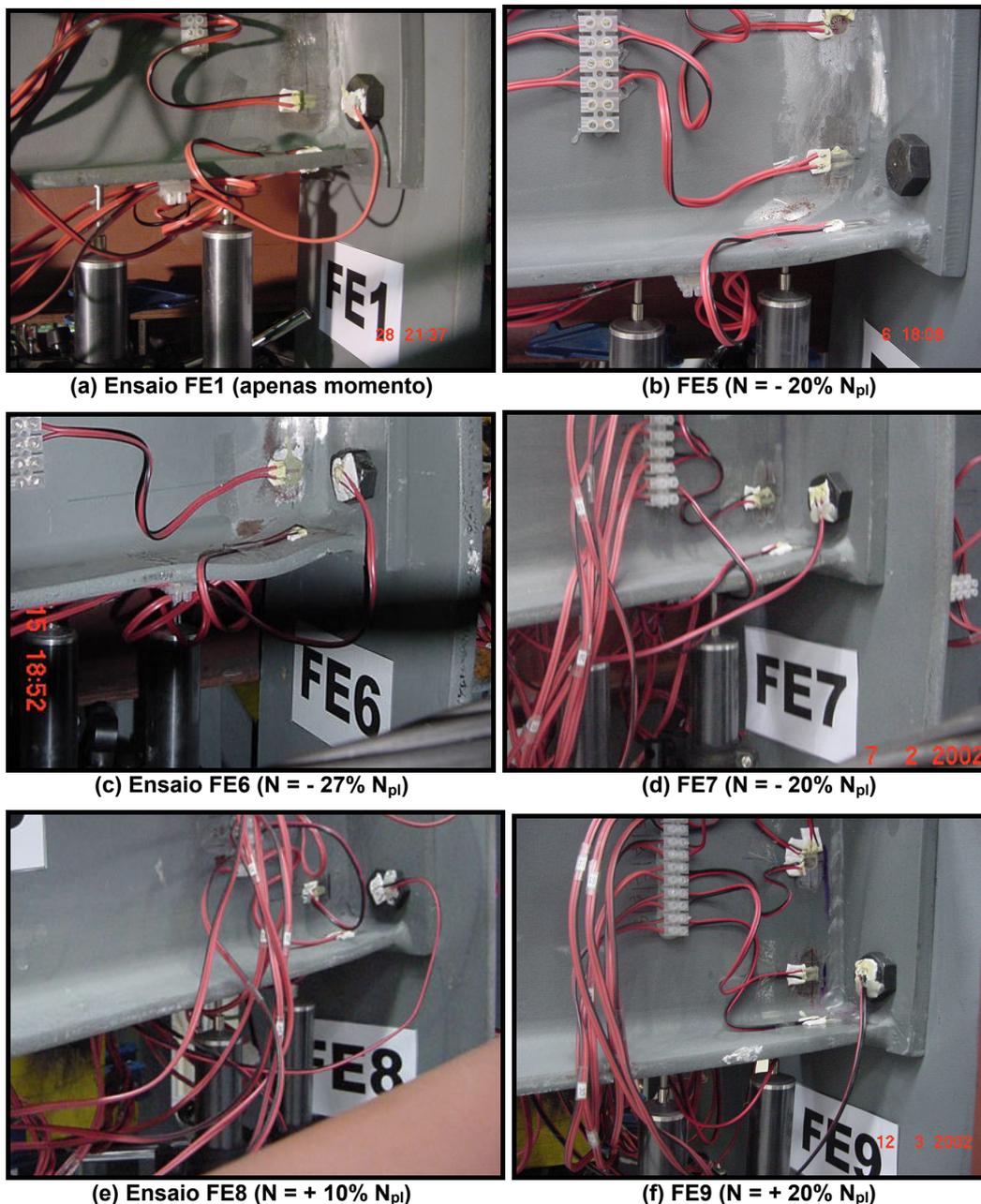


Figura 4.33 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (média dos extensômetros 29 a 32)

Na Figura 4.34 pode-se observar as deformações ocorridas na mesa da viga submetida à compressão para os ensaios com placa de extremidade ajustada.

De acordo com o Eurocode 3, a resistência da mesa da viga em compressão é igual a 542,2kN. Calculado-se a média das deformações - Figura 4.33 - medidas na mesa inferior da viga do ensaio FE1, obtém-se algo em torno

de  $2300\mu\epsilon$  equivalente a uma força de, aproximadamente, 570kN, maior do que os 542,2kN mencionados acima. Isto deve-se basicamente ao encruamento do aço ou a diferenças obtidas nos ensaios de tração de corpos-de-prova dos materiais.



**Figura 4.34 – Comparação de deformações – mesa da viga à compressão**

Mais uma vez, nota-se a influência do esforço axial na modificação dos limites de deformação ocorridos. No ensaio FE1, onde apenas aplicou-se momento fletor, esta componente atinge o escoamento para um nível de

carregamento superior quando comparado com os ensaios com esforço axial de compressão.

#### 4.3.8

##### Comportamento da alma da viga à tração (8)

A avaliação da componente alma da viga à tração será efetuada através dos extensômetros lineares 22 e 28, além da roseta E com os canais 25, 26 e 27, respectivamente.

Na Figura 4.35 apresentam-se as curvas obtidas com o extensômetro 22 posicionada na direção da linha superior de parafusos evidenciando o escoamento desta componente para todos os ensaios. Entretanto os valores obtidos para o ensaio FE8 mostram que ocorreu algum problema com este extensômetro devido os baixos valores encontrados na medição, principalmente, quando comparados com o ensaio FE9.

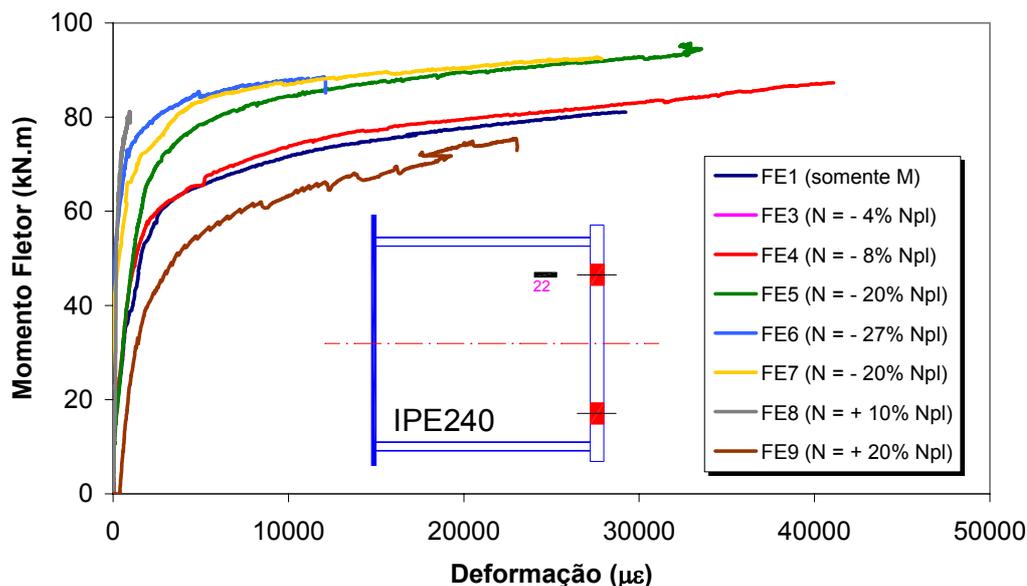


Figura 4.35 – Curvas  $M \times \epsilon$  (extensômetro 22)

Observando-se a Figura 4.36 e a Figura 4.37, respectivamente, conclui-se que a posição da linha neutra deve estar acima da linha de parafusos inferior para os ensaios com esforço axial de compressão e abaixo desta, para os ensaios com esforço axial de tração.

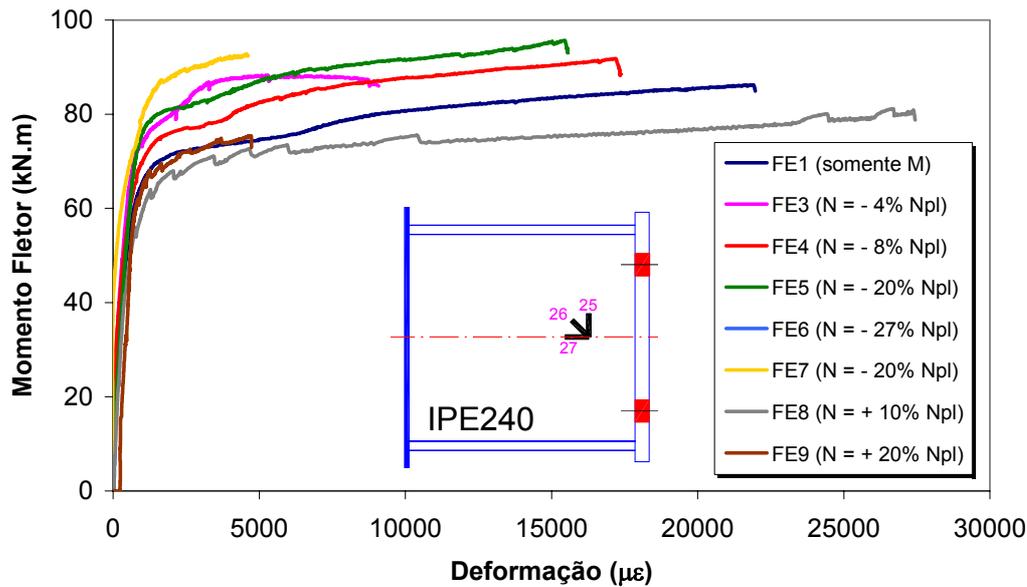


Figura 4.36 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (roseta E - canal 27)

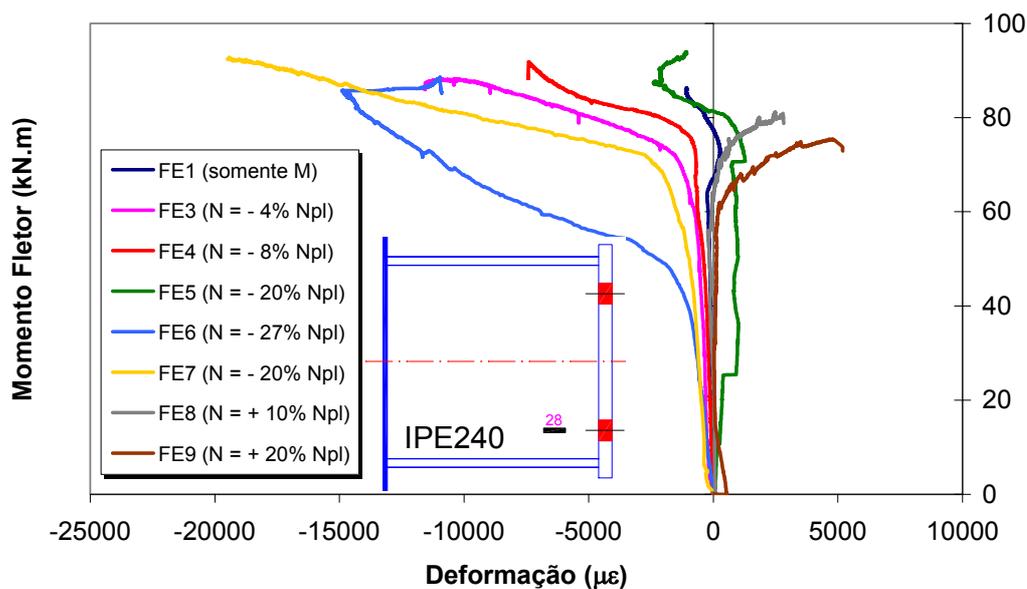


Figura 4.37 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (extensômetro 28)

A Figura 4.38 apresenta as deformações medidas através do canal 25 da roseta E que representam a transmissão do esforço cisalhante atuante na ligação ao longo da alma da viga, proveniente da carga aplicada pelo atuador hidráulico. Pode-se perceber que o esforço axial aplicado nos ensaios não influencia a resistência ao cisalhamento da ligação, tendo em vista que em todos

os ensaios, o escoamento começa a ocorrer para um mesmo nível de momento fletor aplicado, algo em torno de 75 kN.m.

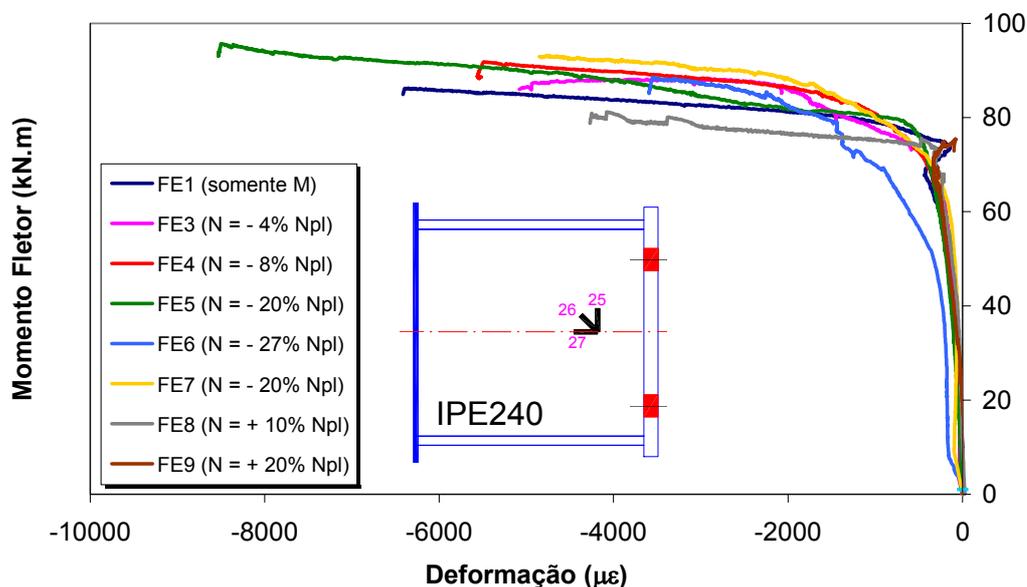


Figura 4.38 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (roseta E - canal 25)

#### 4.3.9

##### Comportamento dos parafusos à tração (10)

Conforme dito anteriormente, em todos os parafusos, aplicou-se uma protensão da ordem de 150N.m, correspondendo a uma extensão medida nos parafusos entre 500 e 800 $\mu\epsilon$ , respectivamente, equivalente a tensões que variam entre 100 e 170MPa calculadas através da Lei de Hooke.

A partir da medição das deformações medidas nestes parafusos, pode-se determinar, respectivamente, a força em cada parafuso e ainda, em cada linha de parafusos.

Estes dados, em princípio, permitem traçar as curvas momento versus rotação da ligação multiplicando-se as forças aplicadas nos parafusos por seus respectivos braços de alavanca, considerando-se que o centro de compressão está posicionado na linha média da mesa inferior da viga. Inicialmente, as curvas momento *versus* deformação foram traçadas, sem se considerar a protensão nos parafusos. Todavia, percebeu-se que esta protensão inicial influenciava a progressão da curva obtida, tornando-se necessário considerar as deformações provocadas por este efeito na análise.

Vale ressaltar que o efeito de alavanca não é pronunciado em ensaios com placa de extremidade ajustada tendo em vista que somente metade do “*T-stub*” é considerado conforme pode ser observado na Figura 4.39. Todavia, no próximo capítulo, onde se apresentam os resultados dos ensaios com placa de extremidade estendida, é mostrado que este efeito influencia consideravelmente a força aplicada nos parafusos submetidos à tração.

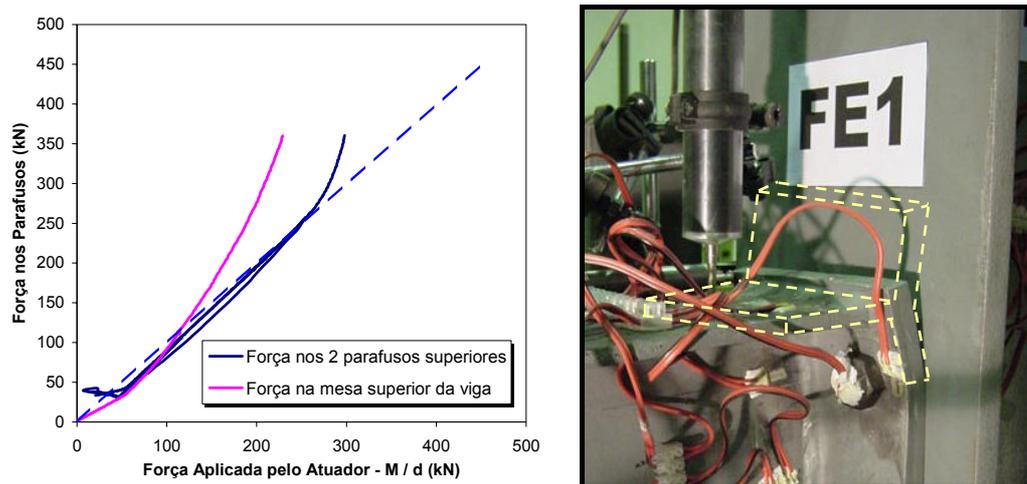


Figura 4.39 – Considerações sobre o efeito de alavanca

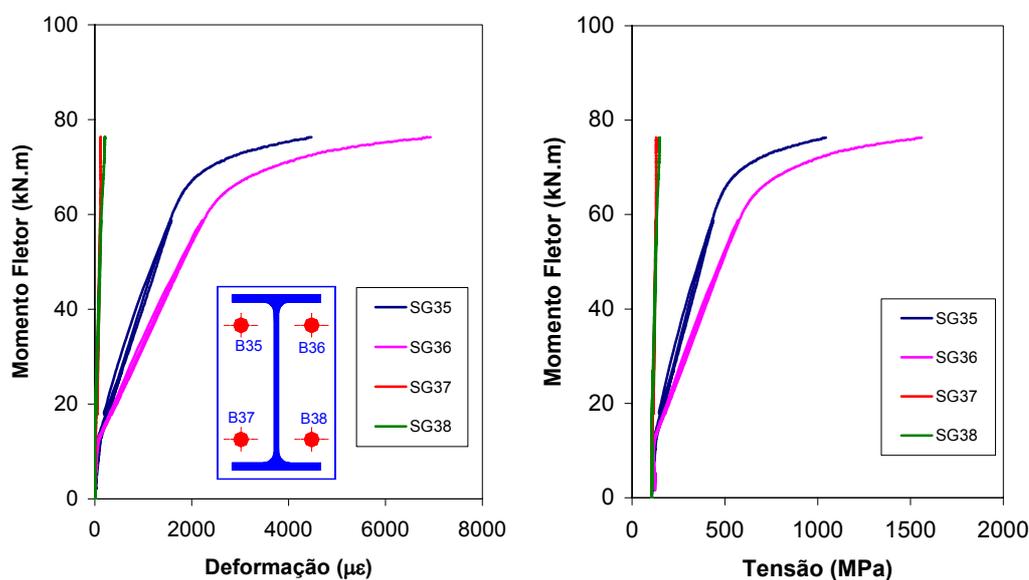


Figura 4.40 – Curvas  $M \times \varepsilon$  e  $M \times \sigma$  - Ensaio FE1

Para não alongar muito a discussão desta componente, apresentam-se as curvas obtidas nos ensaios FE1, FE3 e FE9, caracterizando respectivamente,

um ensaio apenas com momento fletor, um outro com esforço axial de compressão e finalmente, um com esforço axial de tração, ver Figura 4.40 a Figura 4.45.

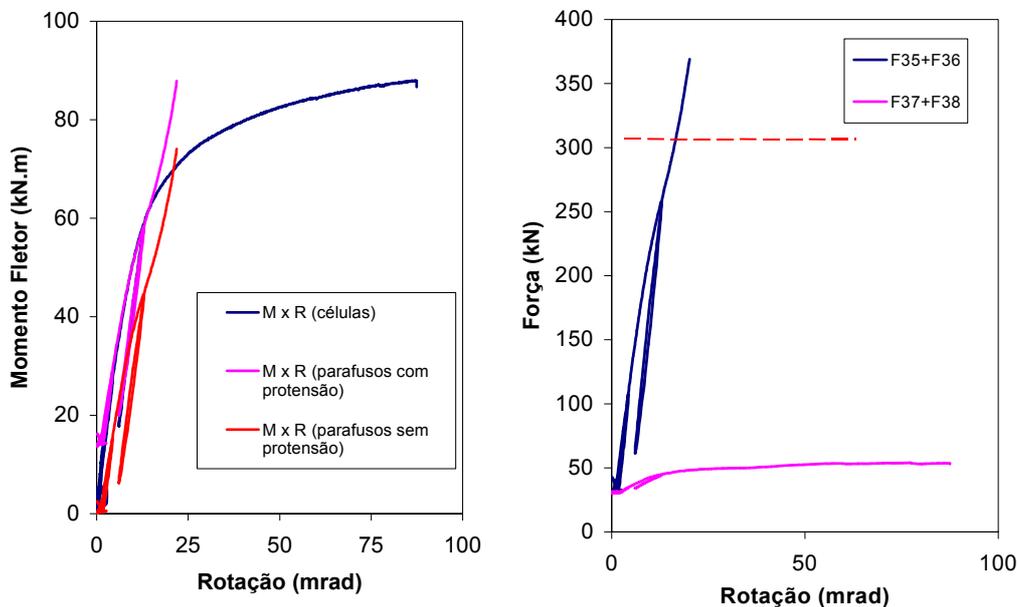


Figura 4.41 – Curvas  $M \times \phi$  e  $F \times \phi$  - Ensaio FE1

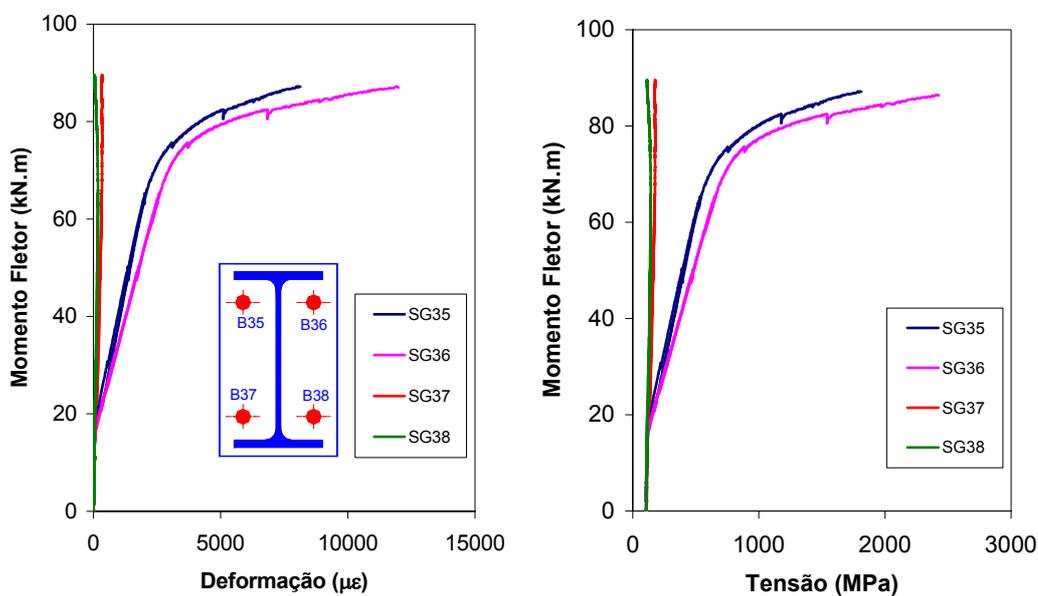


Figura 4.42 – Curvas  $M \times \epsilon$  e  $M \times \sigma$  - Ensaio FE3

Entretanto, apesar de se fazer a leitura da deformação no momento do aperto de cada parafuso, as condições de aperto reais no ensaio eram variáveis,

tendo em vista que imediatamente antes do início do ensaio, o ajuste de todas as peças e o aperto das células de carga provocaram variações na tensão aplicada nos parafusos.

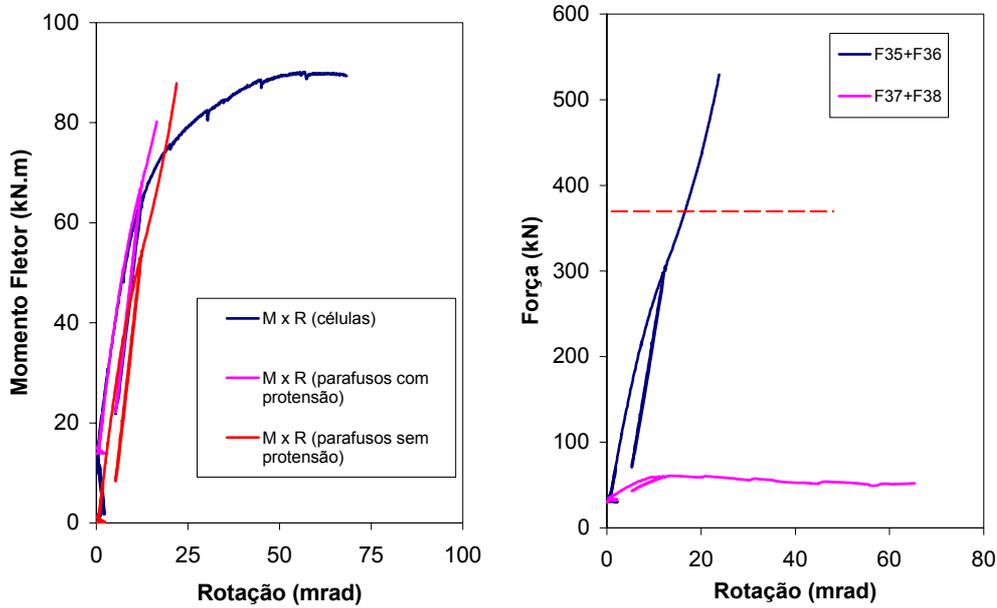


Figura 4.43 – Curvas  $M \times \phi$  e  $F \times \delta$  - Ensaio FE3

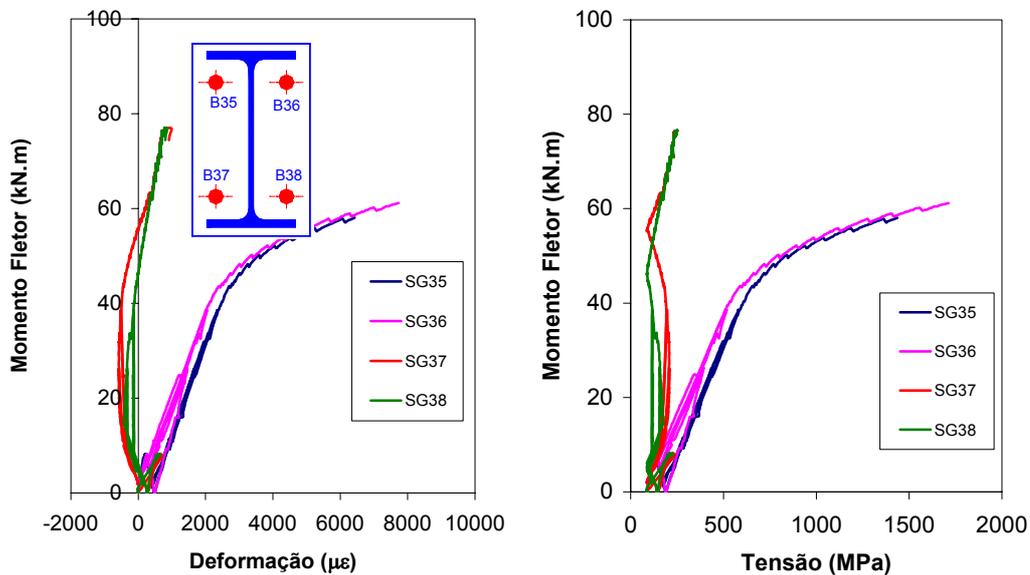


Figura 4.44 – Curvas  $M \times \epsilon$  e  $M \times \sigma$  - Ensaio FE9

Comparando-se as curvas momento *versus* deformação dos parafusos situados na linha superior da ligação para os três ensaios em questão, FE1, FE3

e FE9, respectivamente, nota-se, mais uma vez, a influência do esforço axial no comportamento das componentes presentes na ligação, ver Figura 4.46. Portanto, para o ensaio FE9, cujo esforço axial de tração correspondia a 20% da resistência plástica da viga, as deformações medidas são bastante superiores quando comparadas com os outros dois ensaios. Todavia, a curva momento *versus* rotação deste ensaio, obtida através dos extensômetros dos parafusos, apresentou-se um pouco diferente da obtida através das células de carga.

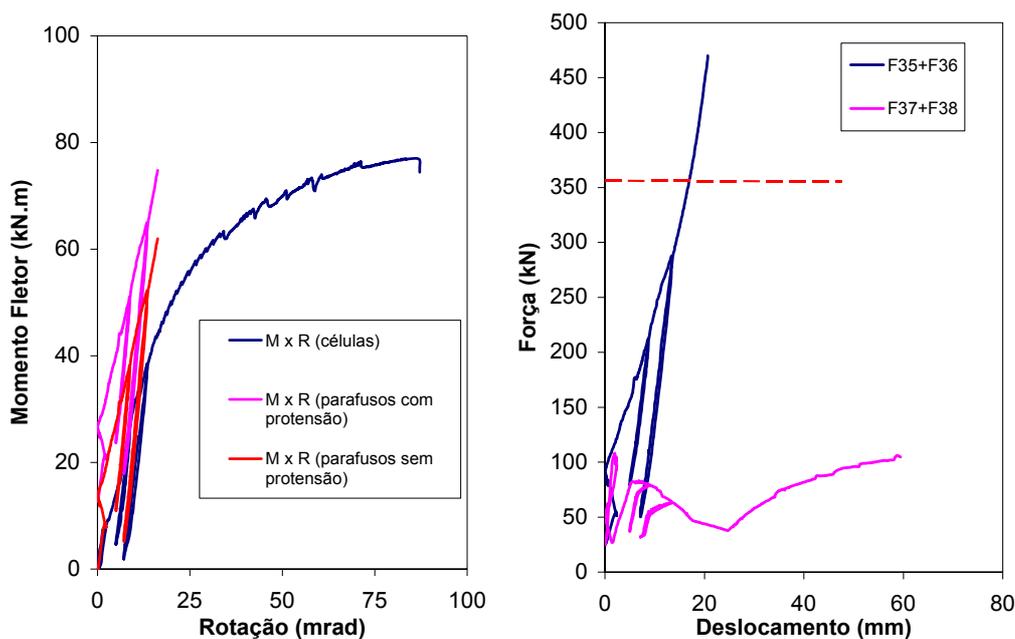


Figura 4.45 – Curvas  $M \times \phi$  e  $F \times \delta$  - Ensaio FE9

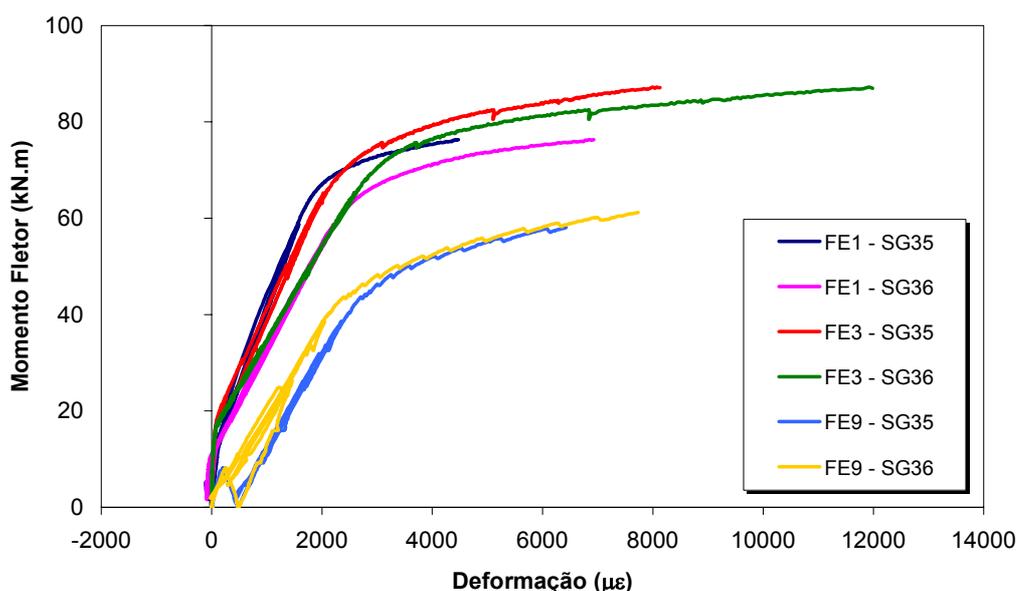


Figura 4.46 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (extensômetros 35 e 36 – ensaios FE1, FE3 e FE9)

### 4.3.10

#### Comportamento da mesa da viga à tração

Apesar desta componente não ser considerada no cálculo das propriedades mecânicas de uma ligação através do Eurocode 3, apresenta-se a seguir a sua análise para, mais uma vez, mostrar a influência do esforço axial no comportamento global da ligação.

Para esta análise, foram utilizados quatro extensômetros lineares posicionados simetricamente na mesa superior da viga. Todavia, os resultados obtidos para os canais 18 e 19 apresentaram incoerência e assim, somente apresentam-se os dados correspondente aos canais 20 e 21.

Observando-se a Figura 4.47 e a Figura 4.48 percebe-se que a componente da mesa da viga tracionada apresenta um ganho de resistência em alguns ensaios, FE1, FE4, FE8 e FE9, provavelmente devido ao encruamento do aço. Além disso, percebe-se o alívio da componente nos ensaios com esforço axial de compressão mais elevado, ou seja, nos ensaios FE5, FE6 e FE7.

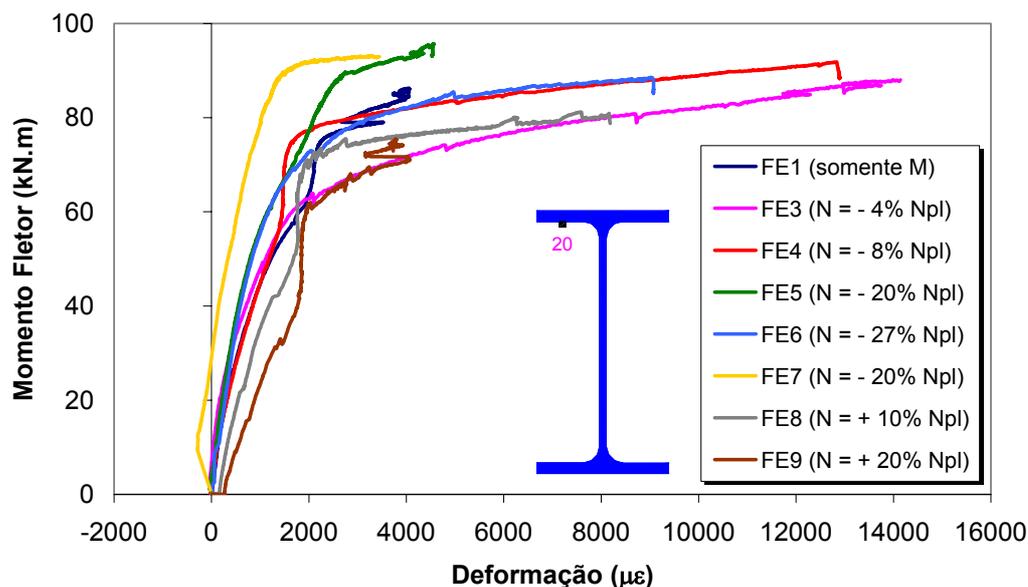


Figura 4.47 – Curvas  $M \times \epsilon$  (extensômetro 20)

A Figura 4.51 apresenta a média obtida pelas leituras das deformações medidas pelos extensômetros 20 e 21 e na Figura 4.49 as curvas obtidas através da média destes dois extensômetros.

Após a apresentação da análise das componentes mais relevantes para os ensaios com placa de extremidade ajustada, serão abordados mais alguns

comentários no que diz respeito a força aplicada em cada uma das componentes e comparadas com os valores calculados através do Eurocode 3 para avaliação do respectivo escoamento das mesmas.

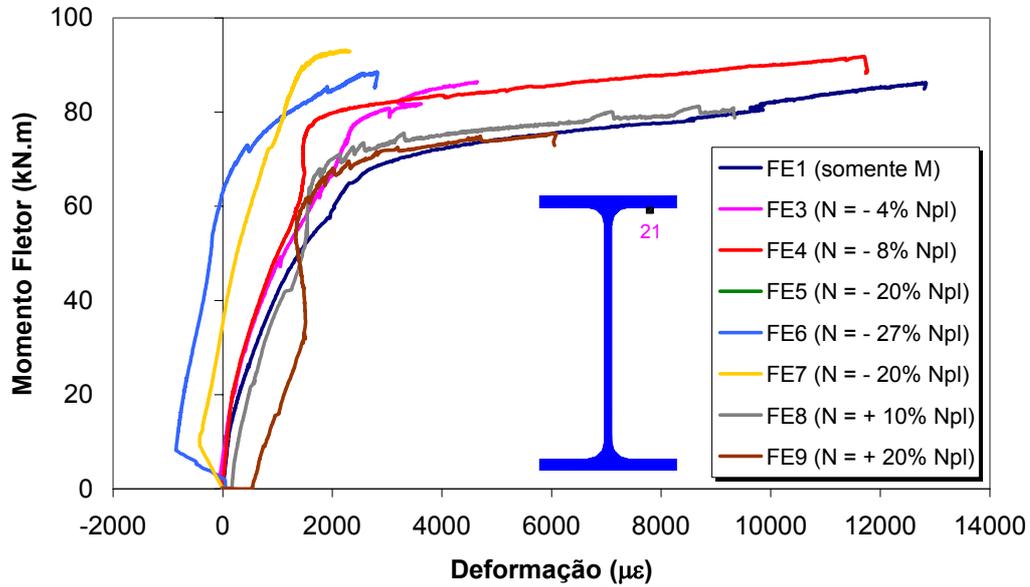


Figura 4.48 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (extensômetro 21)

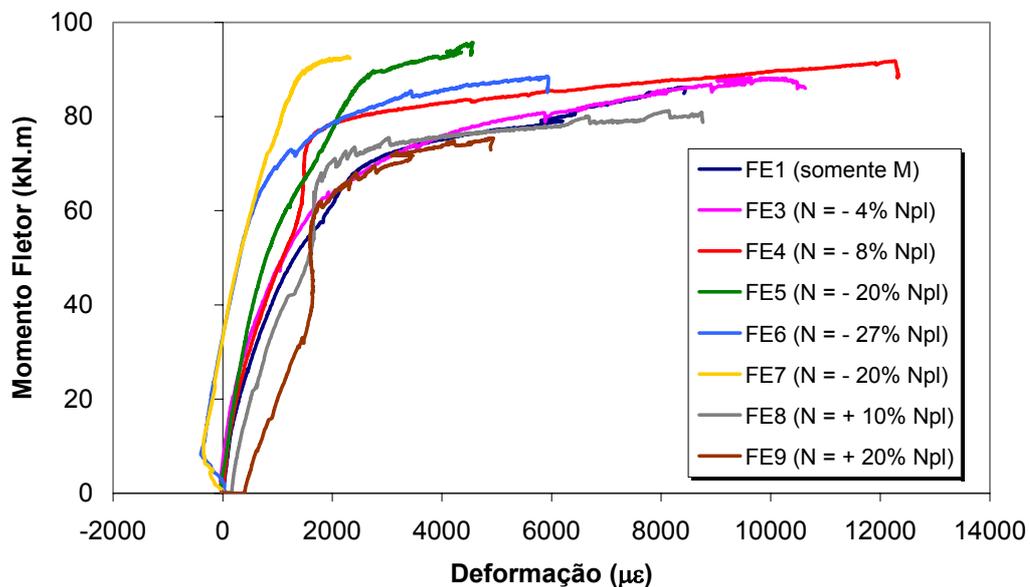


Figura 4.49 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (média dos extensômetros 20 e 21)

#### 4.3.11

##### Considerações Finais Sobre os Ensaios FE

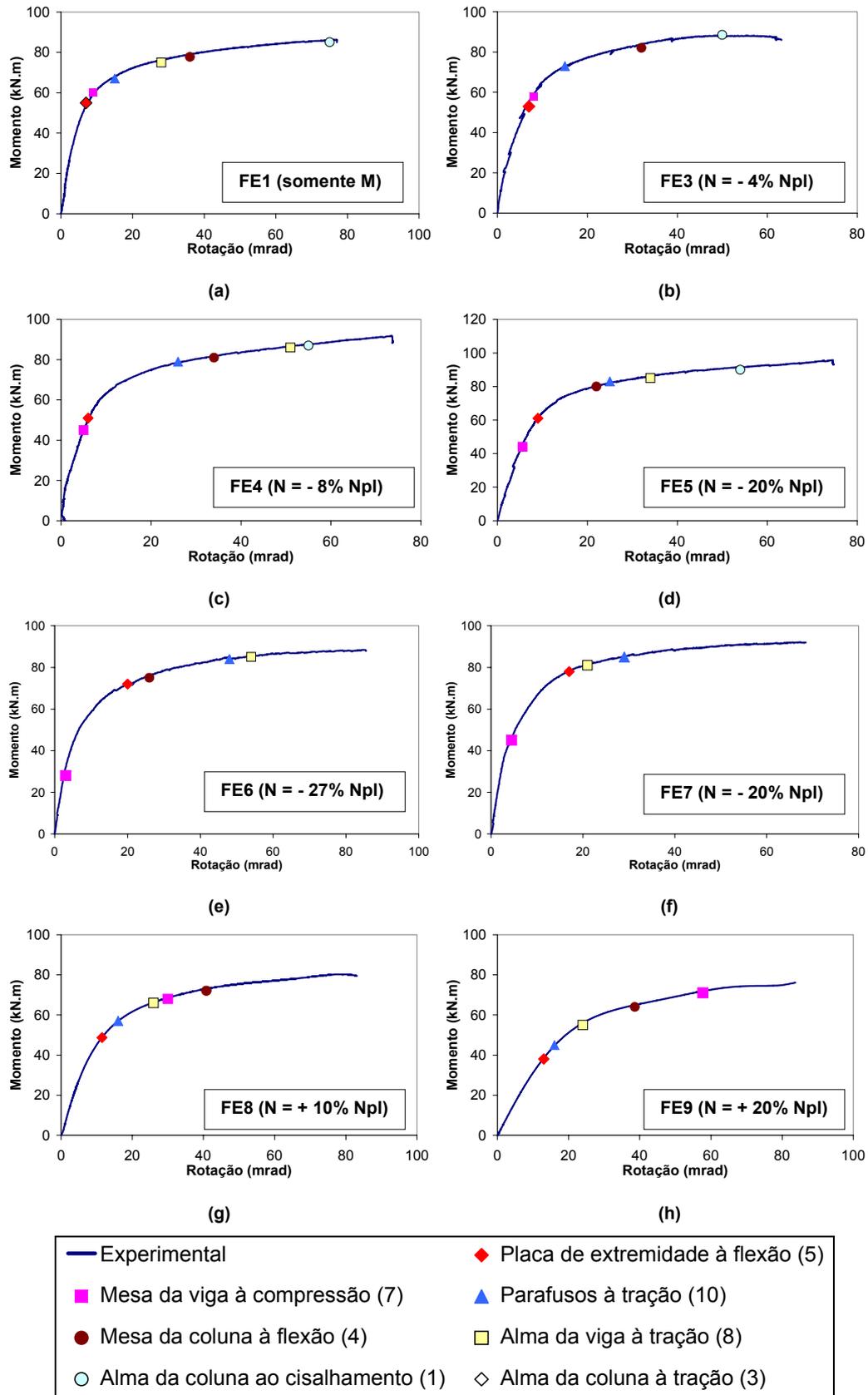
Após efetuar-se a análise individual de todas as componentes, pode-se então, analisar a seqüência de escoamento destas componentes para cada um dos ensaios com placa de extremidade ajustada, Figura 4.50. Porém, os resultados apresentados a seguir tem como objetivo, apenas ilustrar a ordem com que cada uma das componentes começa a atingir o escoamento, tendo em vista que, o ponto específico onde ocorre este fenômeno, é aproximado, conforme apresentado na Figura 4.51.

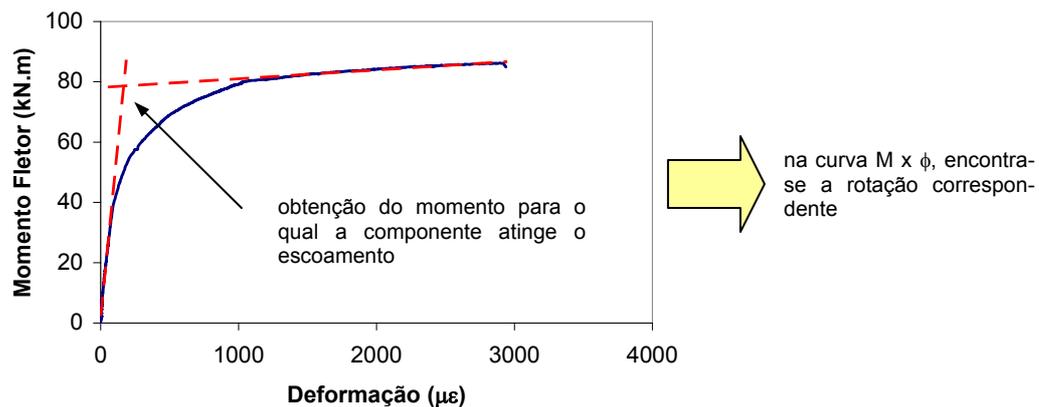
Ao analisar-se estas curvas, comprova-se que, de acordo com o nível de esforço axial aplicado, seja de compressão ou de tração, tem-se uma maior solicitação das componentes na zona comprimida ou tracionada. Por exemplo, para a componente placa de extremidade à flexão que é a componente crítica da zona em tração, o escoamento é atingido para um nível de momento aproximadamente igual a 55kN.m para o ensaio FE1 (somente momento fletor).

Para os ensaios onde foi aplicado esforço axial de compressão, FE3 a FE7, o escoamento desta componente é retardado conforme pode ser observado nas curvas (b) a (f). Entretanto, nos dois ensaios onde se aplicou esforço axial de tração, ou seja, os ensaios FE8 e FE9, esta componente atingiu o escoamento aos 49kN.m e 38kN.m, respectivamente.

Por outro lado, a componente referente à mesa da viga em compressão – componente crítica da zona em compressão - tem seu escoamento atingido em níveis inferiores de momento fletor quando comparados com o ensaio FE1. Neste ensaio, o escoamento foi atingido aos 60kN.m. Para o ensaio FE6 (maior nível de esforço axial de compressão) atingiu-se o escoamento aos 28kN.m e para o ensaio FE9 (maior nível de esforço axial de tração) aos 71kN.m.

As observações apresentadas até o presente momento servirão de base para a calibração das componentes caracterizadas pelos elementos de mola utilizados no modelo mecânico que será discutido em um capítulo a seguir desta tese.





**Figura 4.51 – Método para identificação do escoamento das componentes**

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos na análise dos ensaios com placa de extremidade ajustada – série FE. No próximo capítulo apresentar-se-ão os resultados obtidos na análise dos ensaios com placa de extremidade estendida – série EE.