

## 5

### Avaliação dos Resultados Experimentais – Ensaios de Ligações com Placa de Extremidade Estendida (EE)

#### 5.1

##### Introdução

Neste capítulo apresenta-se a análise dos resultados dos ensaios com placa de extremidade estendida – série EE. Para tal, será utilizada a mesma metodologia apresentada no capítulo quatro considerando-se as curvas momento *versus* rotação, momento *versus* deslocamento, momento *versus* deformações e, finalmente, momento *versus* tensões. Para detalhes das ligações, ver capítulo três, §3.2.

#### 5.2

##### Análise de Resultados

##### 5.2.1

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

As curvas momento *versus* rotação dos sete ensaios com placa de extremidade estendida são apresentadas na Figura 5.1 onde pode-se observar que, mesmo para um nível de esforço axial de compressão, equivalente a 15% da resistência plástica da viga, o momento resistente ainda é superior ao obtido no ensaio apenas com aplicação de momento fletor. Por outro lado, nos dois ensaios onde se aplicou esforço axial de tração, ensaios EE6 e EE7, nota-se claramente a perda de resistência ao momento fletor. Analisando-se a parte inicial da curva momento *versus* rotação destes ensaios, nota-se uma perda de rigidez, não comprovada pela análise da descarga efetuada e apresentada mais adiante [51].

Apresenta-se na Figura 5.2(a) uma vista global da estrutura deformada para o ensaio EE7 (+ 20%  $N_{pl}$ ) e na Figura 5.2 (b), um detalhe da ligação,

propriamente dita, correspondente ao mesmo ensaio onde pode-se perceber claramente que, devido ao nível de esforço axial de tração ser elevado, as componentes da zona tracionada sofrem deformações bastante significativas. Por outro lado, a região da ligação submetida a esforços de compressão, tem níveis mais baixos de deformações.

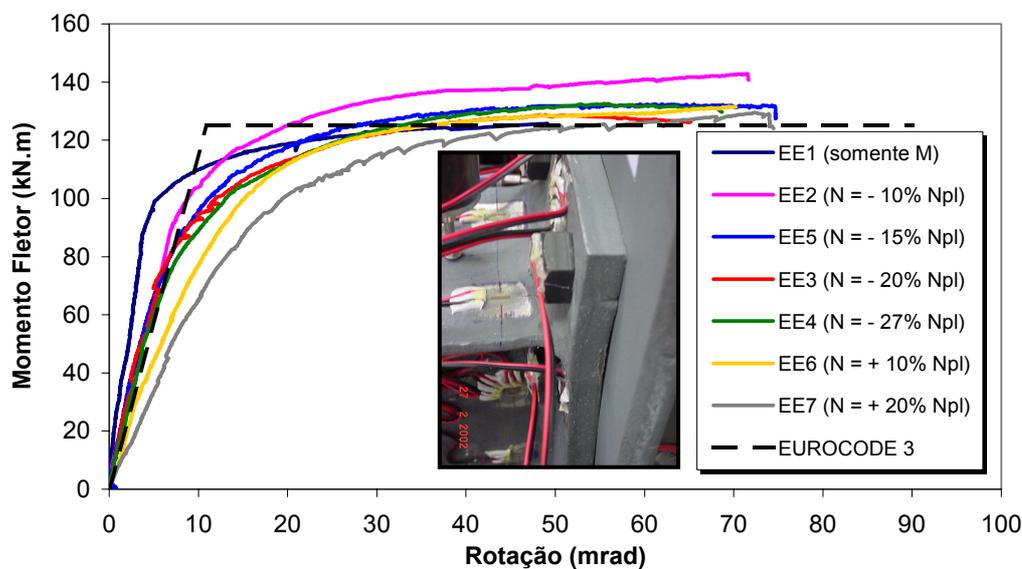
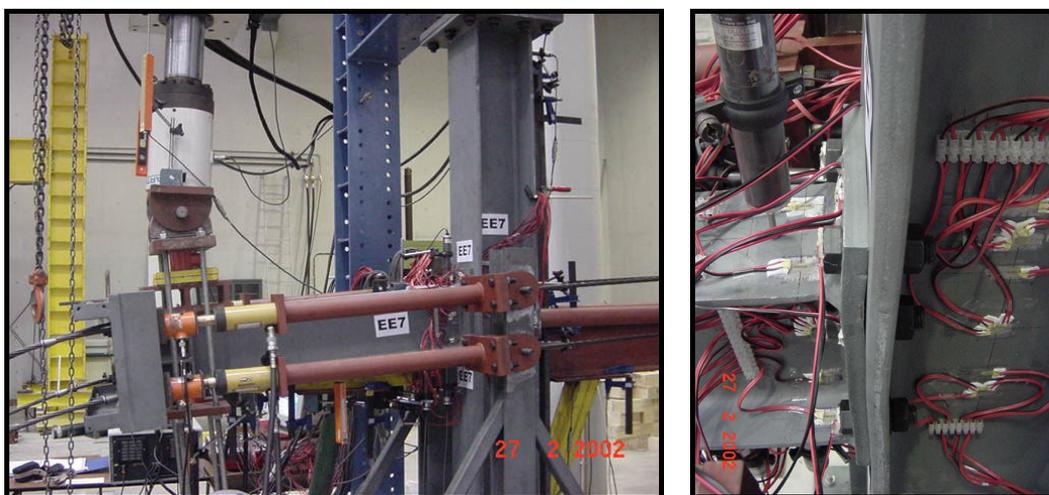


Figura 5.1 – Curvas momento versus rotação



(a) vista geral da estrutura do ensaio deformada

(b) detalhe da ligação deformada

Figura 5.2 – Deformações ocorridas nos ensaios FE

A Tabela 5.1 apresenta os valores obtidos para a resistência ao momento fletor e rigidez inicial da ligação para todos os ensaios da série EE. Os valores da rigidez inicial foram obtidos pela inclinação da curva momento *versus* rotação

na segunda descarga conforme pode ser observado na Figura 5.3 [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.

Os valores teóricos calculados de acordo com o Eurocode 3 utilizando-se as propriedades mecânicas reais dos materiais, tomando-se os coeficientes de segurança iguais a 1,0 e desconsiderando-se a presença do esforço axial, foram respectivamente de,  $M_{j,Rd} = 125,0\text{kN.m}$  e  $S_{j,ini} = 22849,8\text{kN.m/rad}$ .

**Tabela 5.1 – Valores experimentais para  $M_{j,Rd}$  e  $S_{j,ini}$**

Ensaio	N (kN)	$M_{j,Rd}$ (kN.m)	$M_{j,Rd} / M_{j,Rd EE1}$	$S_{j,ini}$ (kN.m/rad)
EE1 (apenas M)	-	118,7	1,00	26933
EE2 (- 10% $N_{pl}$ )	-135,94	125,4	1,06	14923
EE5 (- 15% $N_{pl}$ )	-193,3	118,1	0,99	12077
EE3 (- 20% $N_{pl}$ )	-259,2	113,2	0,95	11260
EE4 (- 27% $N_{pl}$ )	-363,5	111,9	0,94	12032
EE6 (+ 10% $N_{pl}$ )	127,2	111,5	0,94	10275
EE7 (+ 20% $N_{pl}$ )	257,9	101,0	0,85	10611

Analisando-se os valores obtidos, verifica-se que o valor de resistência ao momento fletor do ensaio EE1 é inferior ao previsto pelo Eurocode 3, algo em torno de 5%. Esta diferença pode ter sido provocada pela diminuição no braço de alavanca das forças conforme será comentado no capítulo seis quando da comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos através do modelo mecânico proposto. O ensaio que apresentou maior momento resistente foi o EE2 com um ganho de 6% em relação ao ensaio EE1. No ensaio EE4, apesar do esforço axial de compressão elevado, ainda obteve-se uma resistência ao momento superior ao ensaio EE1. Entretanto, a perda de resistência à flexão foi mais significativa no ensaio EE8 onde se aplicou um esforço axial de tração correspondente a 20% de  $N_{pl}$ . Esta perda foi da ordem de 15%.

A rigidez inicial dos ensaios variou significativamente, principalmente comparando-se o ensaio EE1 com os demais. Nota-se que a presença do esforço axial afeta diretamente a rigidez inicial das ligações devido a modificação da rotação do painel de alma da coluna submetido ao cisalhamento. Desta forma, torna-se necessário propor um modelo que considere o esforço axial no cálculo da rigidez inicial das ligações submetidas a momento fletor e esforço axial.

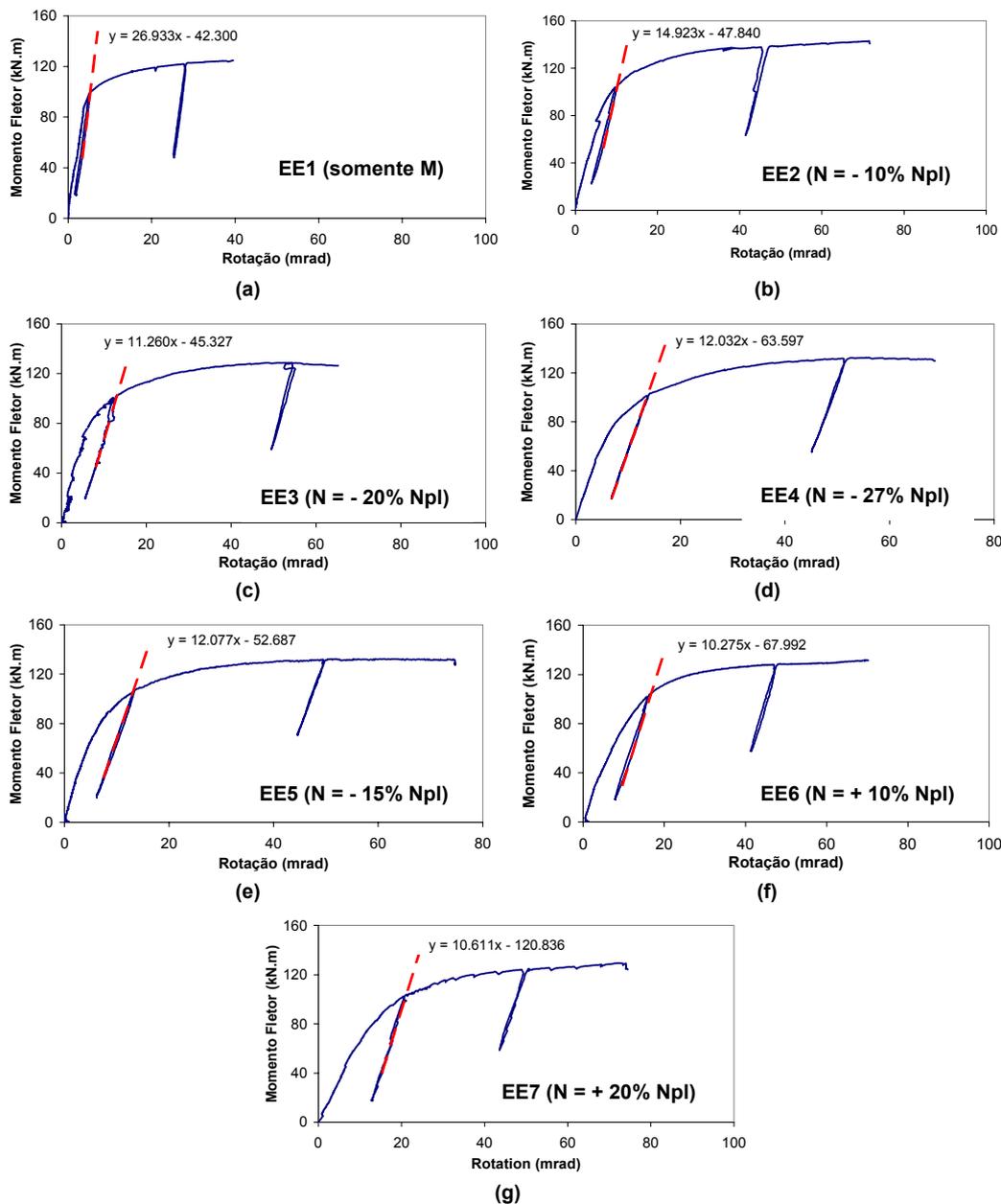


Figura 5.3 – Curvas momento *versus* rotação com respectivas descargas

Após a obtenção destes valores, torna-se possível traçar a curva de interação momento *versus* esforço axial apresentada na Figura 5.4. Nesta curva, percebe-se que o valor obtido através do Eurocode 3, considerando-se apenas momento fletor aplicado, é um pouco superior aos valores obtidos experimentalmente, para todos os ensaios. Maiores comentários a respeito destas diferenças serão apresentados no capítulo seis tendo sido provocadas, provavelmente, pelo maior braço de alavanca considerado no Eurocode 3.

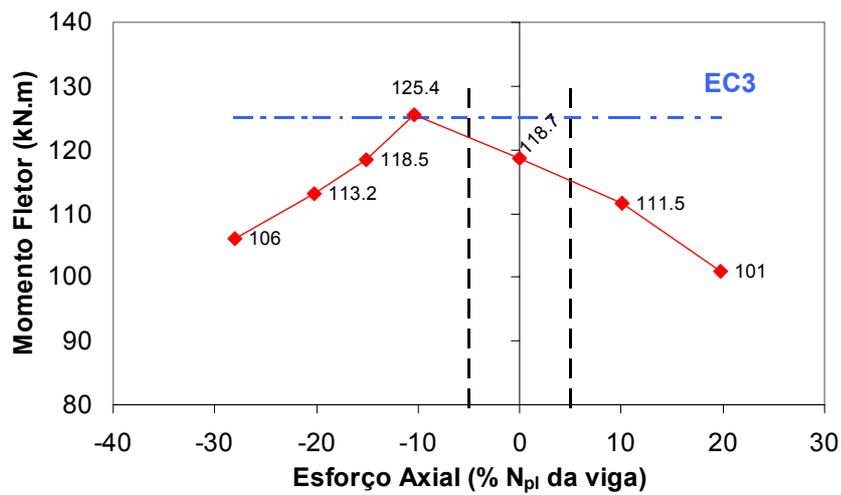


Figura 5.4 – Curva de interação M versus N

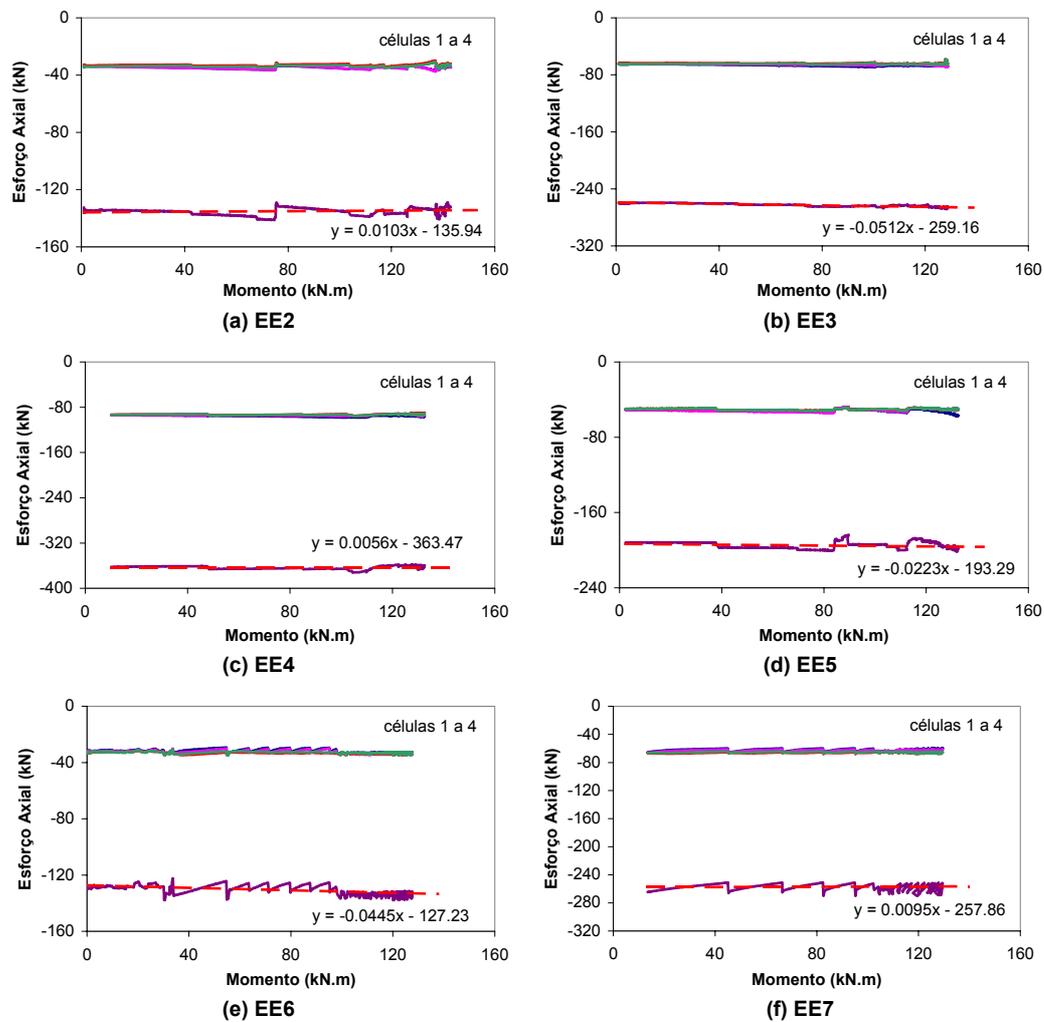


Figura 5.5 – Controle do esforço axial aplicado nos ensaios

Na Figura 5.5 são apresentadas as curvas momento *versus* esforço axial para todos os ensaios com placa de extremidade estendida juntamente com a identificação dos cabos. Vale ressaltar que, para os ensaios desta série, a compensação da força aplicada em cada um dos cabos de protensão foi feita de forma automática pelo sistema conectado a eletro-válvula conforme descrito no capítulo com a descrição dos ensaios experimentais realizados.

A seguir, utiliza-se a mesma metodologia do capítulo anterior para a apresentação da análise das componentes mais relevantes para os ensaios das ligações com placa de extremidade estendida.

## 5.2.2

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

Por se tratar de uma ligação de um nó externo de uma estrutura, grandes deformações são esperadas para a componente alma da coluna em cisalhamento. Conforme pode ser observado na Figura 5.6, esta componente atingiu o escoamento em todos ensaios. 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.

Para o ensaio EE1, o escoamento verifica-se para um momento fletor aplicado igual 98kN.m, sendo o nível mais baixo onde esta componente atingiu o escoamento. Todavia, o nível mais alto foi verificado no ensaio EE2 aos 134kN.m de momento fletor aplicado, justamente o que teve maior resistência à flexão. Isto ocorreu porque, o esforço axial aplicado neste ensaio alivia as componentes da zona tracionada sem afetar muito as componentes da zona comprimida fazendo com que o binário das forças provocadas pelo momento fletor ficasse maior do que nos demais ensaios, provocando uma maior solicitação desta componente.

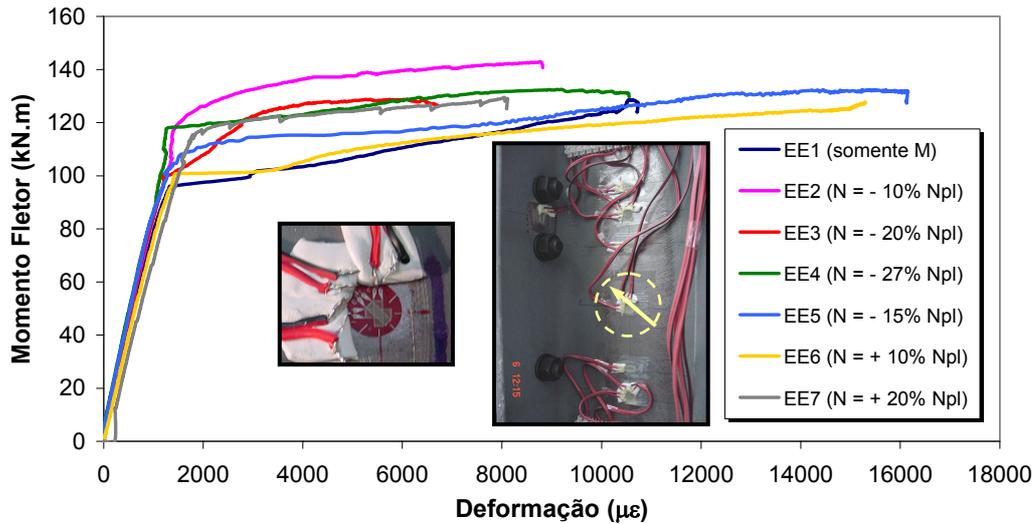


Figura 5.6 – Curvas M x  $\epsilon$  (roseta B – canal 8)

Analisando-se a Figura 5.7, constata-se que a direção principal neste ponto variou entre  $40^\circ$  e  $45^\circ$ , da mesma forma como foi verificado no capítulo anterior na análise dos ensaios com placa de extremidade ajustada. Todavia, o escoamento desta componente foi atingido em diferentes níveis de momento fletor aplicado mostrando que a presença do esforço axial de tração ou compressão, afeta o comportamento dessa componente.

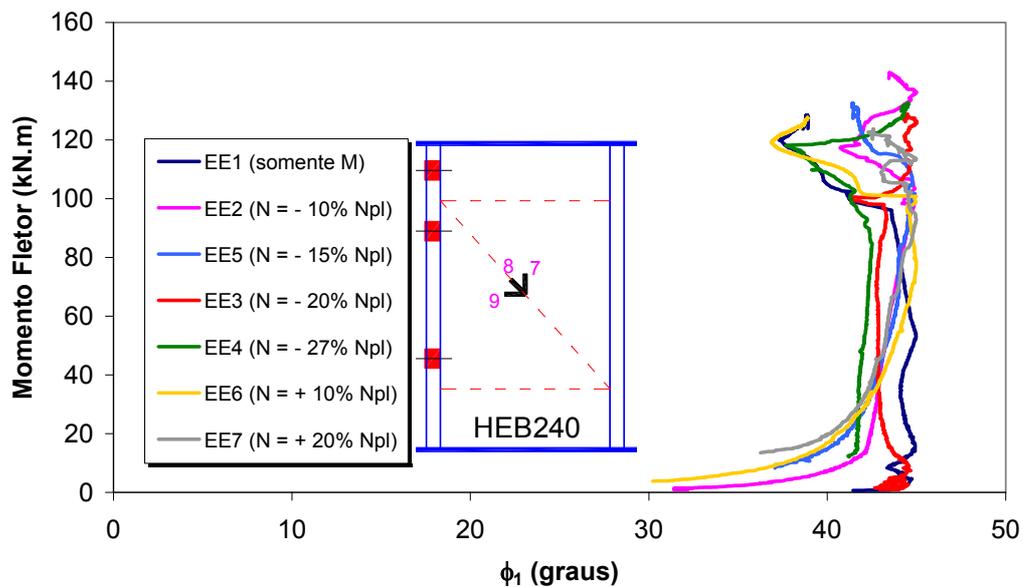


Figura 5.7 – Direção principal  $\phi_1$  (roseta B)

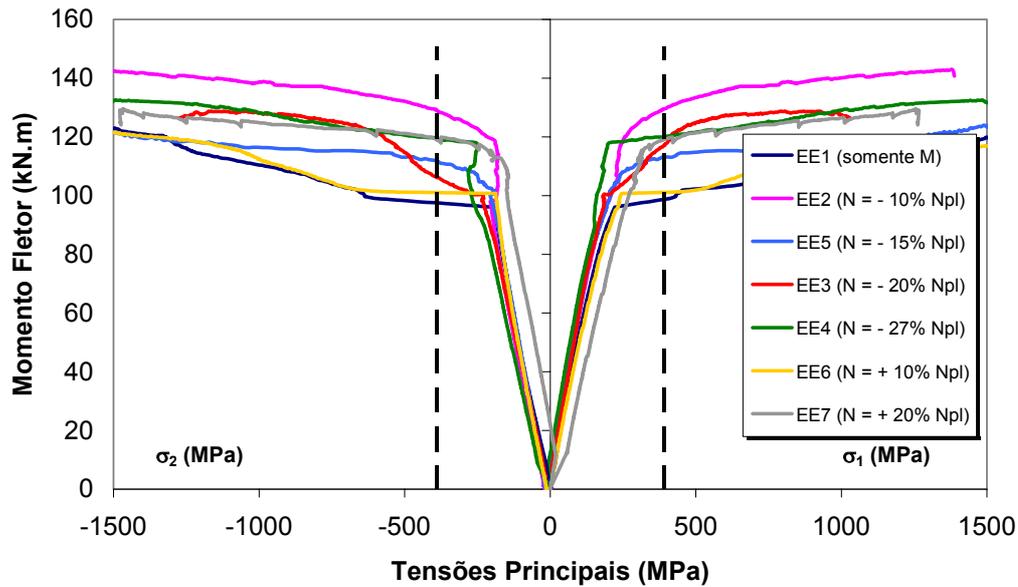


Figura 5.8 – Tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  (roseta B)

Conforme observado na análise desta componente nos ensaios da primeira série, também nota-se a simetria das tensões principais apresentadas na Figura 5.8. E através da Figura 5.9, onde são apresentadas as curvas momento *versus* tensões de *Von Mises*, também comprova-se o escoamento da componente em todos os ensaios da segunda série.

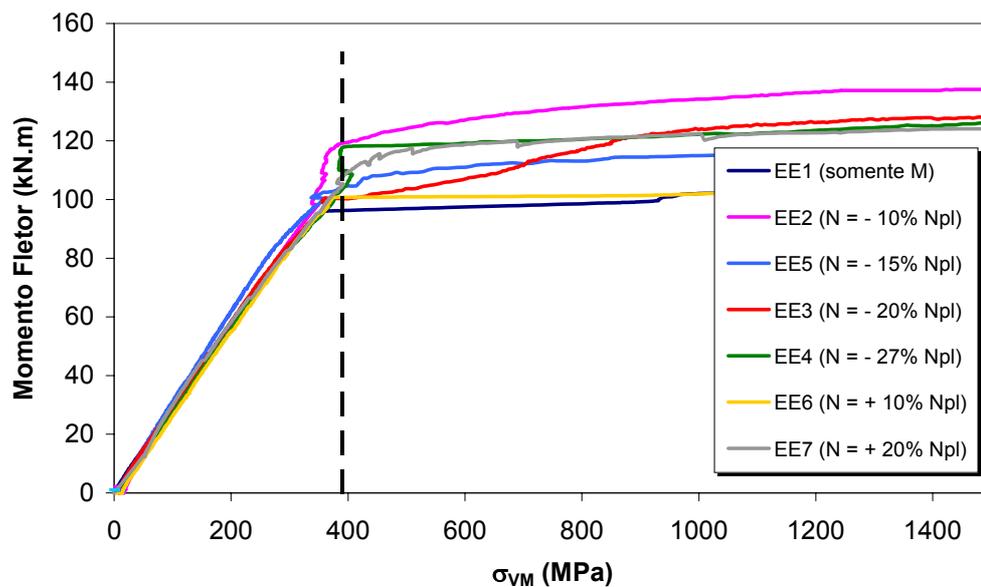


Figura 5.9 – Tensões de *Von Mises*  $\sigma_{VM}$  (roseta B)

### 5.2.3

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

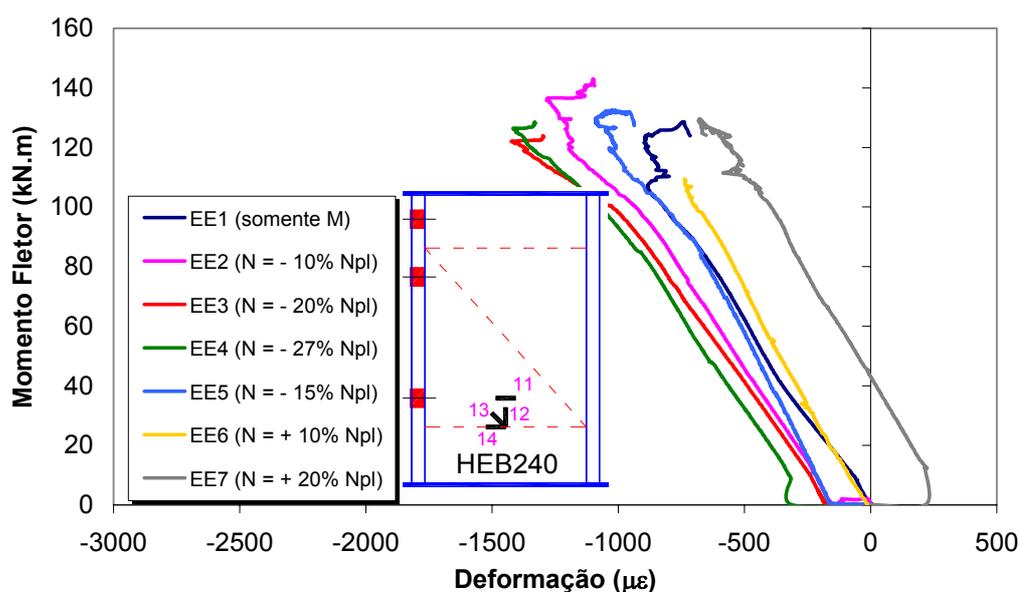
Para a análise da componente alma da coluna submetida à compressão, utiliza-se a roseta C correspondente aos canais 12, 13 e 14 além do extensômetro número 11, respectivamente.

Comparando-se a Figura 5.10 e a Figura 5.11, 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 14. A Tabela 5.2 apresenta uma comparação das deformações medidas através dos canais 11 e 14 para um nível de momento fletor aplicado da ordem de 100 kN.m.

**Tabela 5.2 – Comparação de deformações – canais 11 e 14 (em  $\mu\epsilon$ )**

Ensaio	EE1	EE2	EE3	EE4	EE5	EE6	EE7
$\epsilon_{11}$ ( $\mu\epsilon$ )	-819	-933	-1060	-1068	-819	-691	-401
$\epsilon_{14}$ ( $\mu\epsilon$ )	-1018	-1087	-1143	-1145	-957	-868	-630

Observando-se a Figura 5.12, nota-se que as tensões principais  $\sigma_2$  de compressão atingiram valores maiores, em valor absoluto, que as tensões principais  $\sigma_1$  de tração.



**Figura 5.10 – Curvas M x  $\epsilon$  (extensômetro 11)**

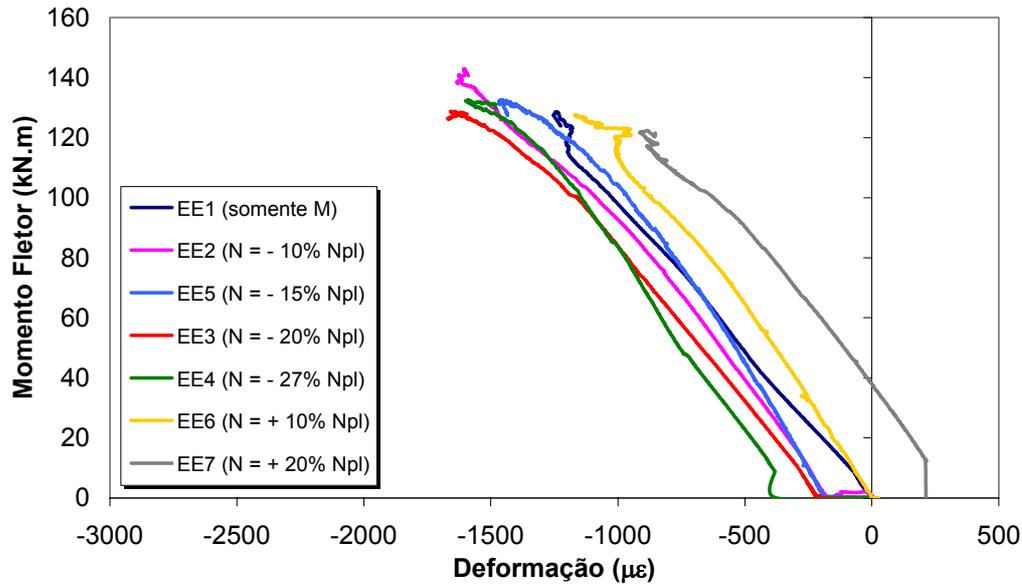


Figura 5.11 – Curvas  $M \times \epsilon$  da alma da coluna à compressão (roseta C - canal 14)

Através da observação da Figura 5.13 onde são apresentadas as curvas momento *versus* tensões de *Von Mises*, conclui-se que esta componente atingiu a tensão equivalente ao limite de escoamento em todos os ensaios. Diferentemente dos ensaios com placa de extremidade ajustada, isto ocorreu porque a força a ser transmitida na região comprimida da ligação era maior devido a presença de mais uma linha de parafusos nas ligações desta série.

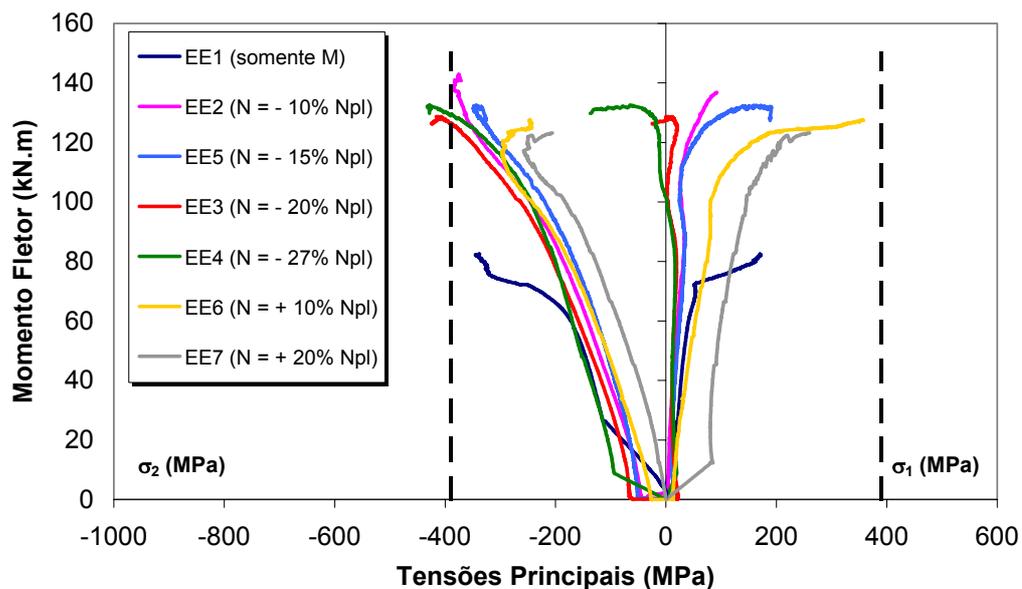


Figura 5.12 – Tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  (roseta C)

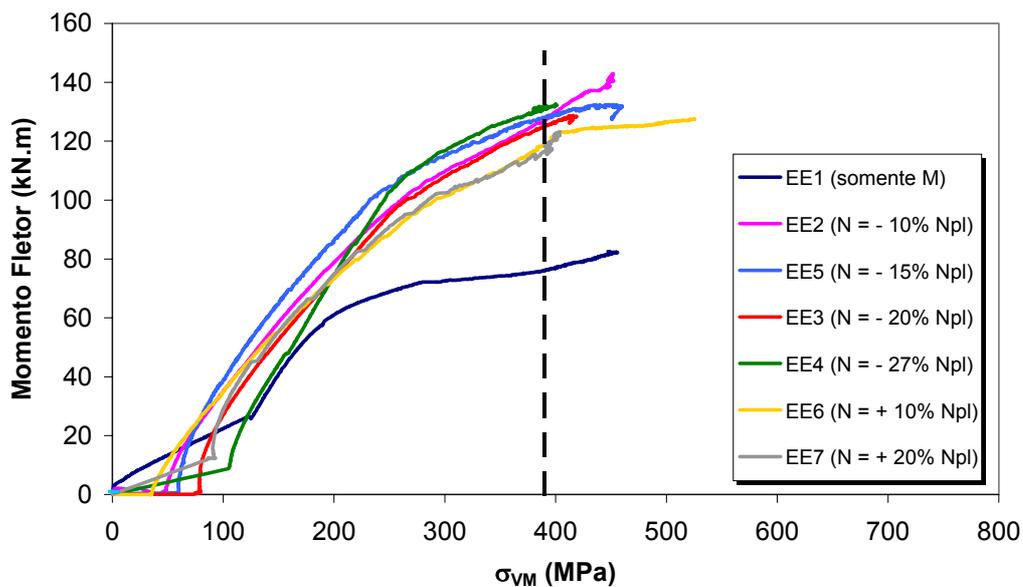


Figura 5.13 - Tensão de Von Mises  $\sigma_{VM}$  (roseta C)

#### 5.2.4

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

Para a região da alma da coluna submetida à tração, utilizam-se os extensômetros lineares - canais 2 e 6 - além da roseta A correspondente aos canais 3, 4 e 5, respectivamente.

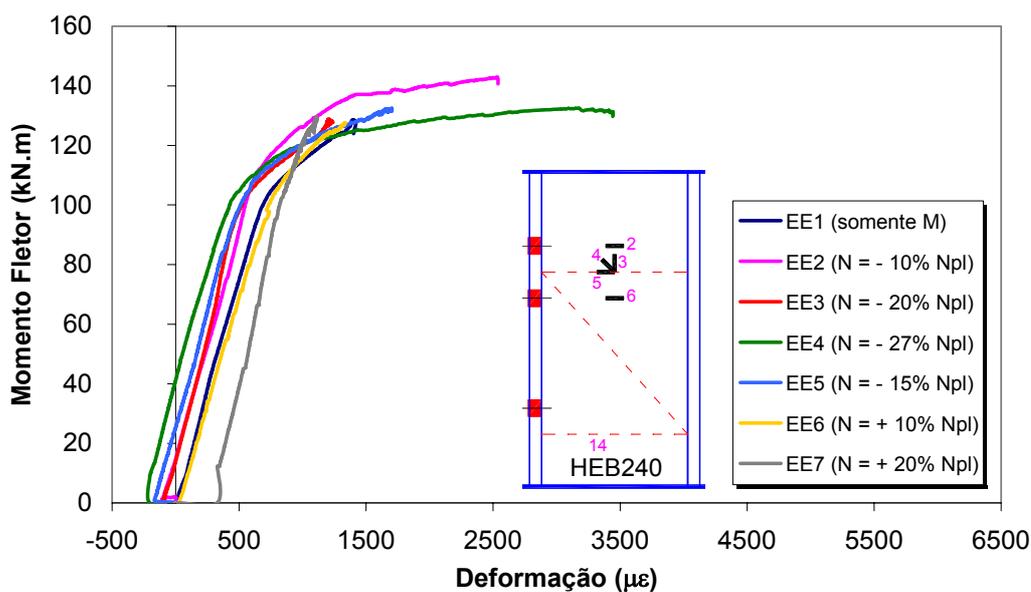


Figura 5.14 – Curvas M x  $\epsilon$  (roseta A - canal 2)

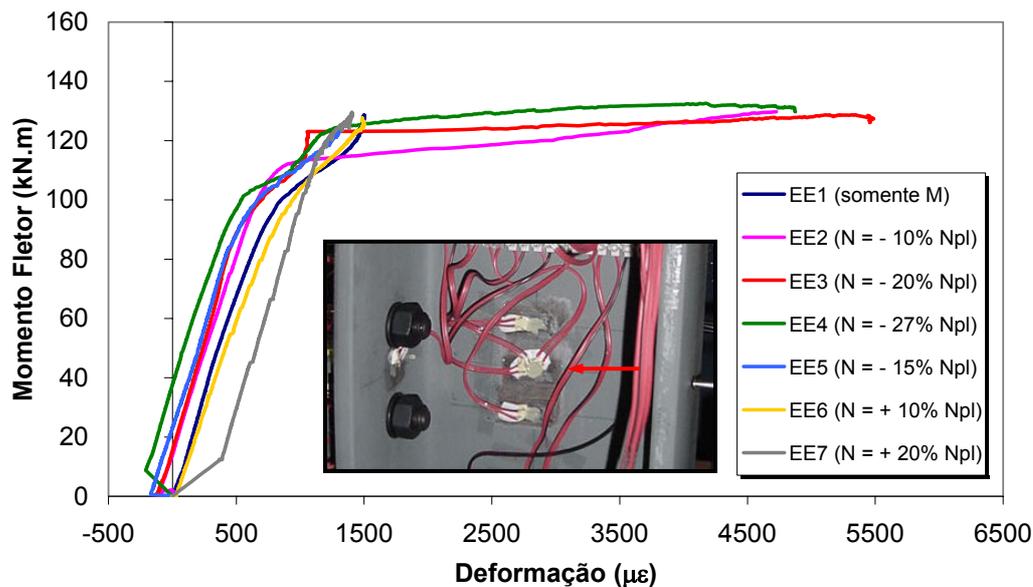


Figura 5.15 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (roseta A - canal 5)

Ao contrário da zona comprimida da ligação, na zona tracionada, as deformações medidas pelo extensômetro 2, pelo canal horizontal da roseta C e pelo extensômetro 6 são praticamente iguais conforme observado na comparação efetuada da Figura 5.14 a Figura 5.16. Com relação a direção principal obtida através da roseta C, os valores não apresentam a mesma tendência para cada um dos ensaios desta série conforme pode ser observado na Figura 5.17.

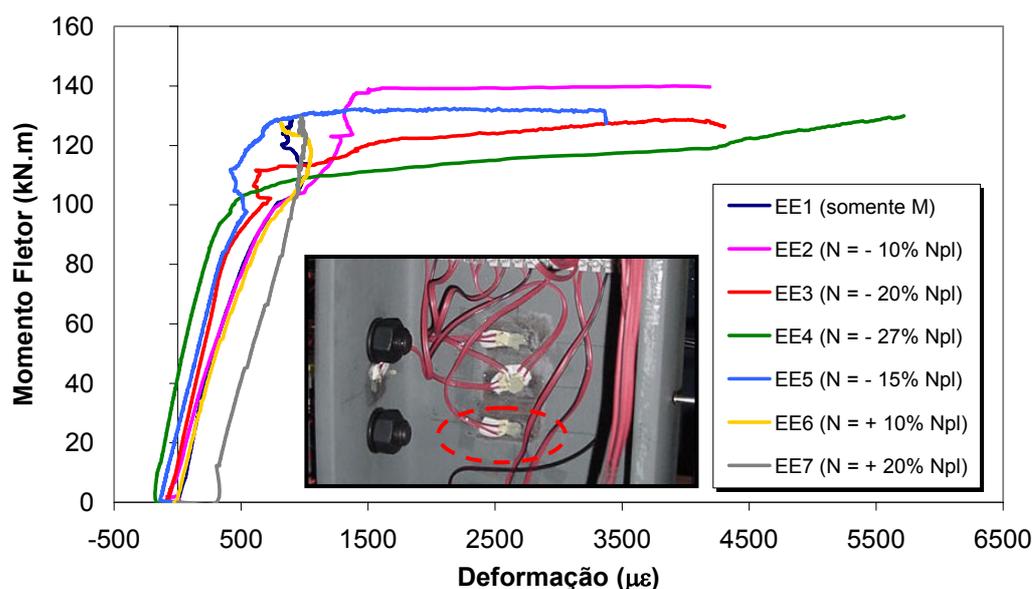


Figura 5.16 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (extensômetro 6)

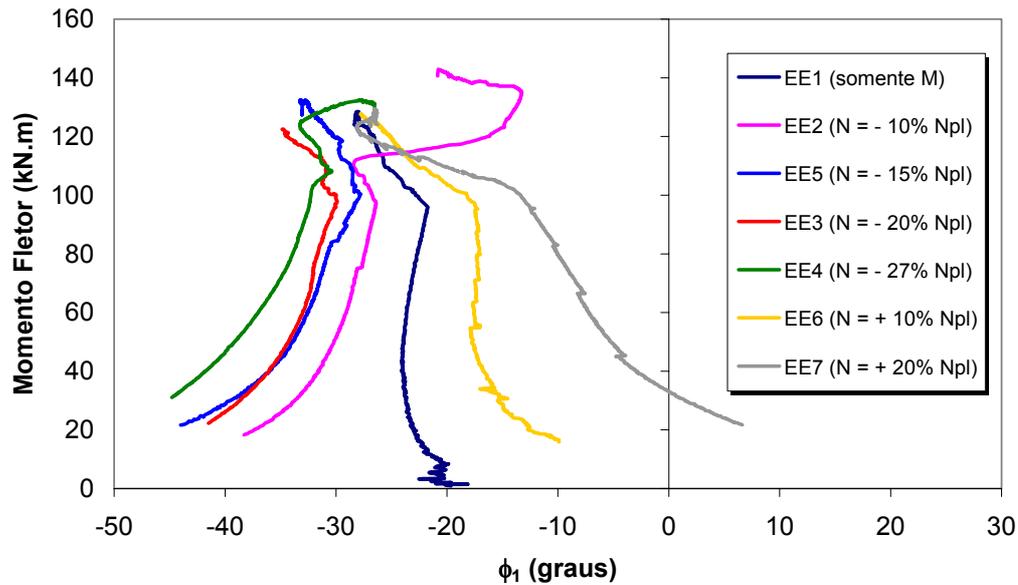


Figura 5.17 - Direção principal  $\phi_1$  (roseta A)

Observando-se a Figura 5.18 percebe-se que a tensão principal  $\sigma_1$  é de tração, como era de se esperar. Entretanto, no ensaio EE7, onde aplicou-se o maior esforço axial de tração, foram obtidos valores positivos também para a tensão principal  $\sigma_2$ .

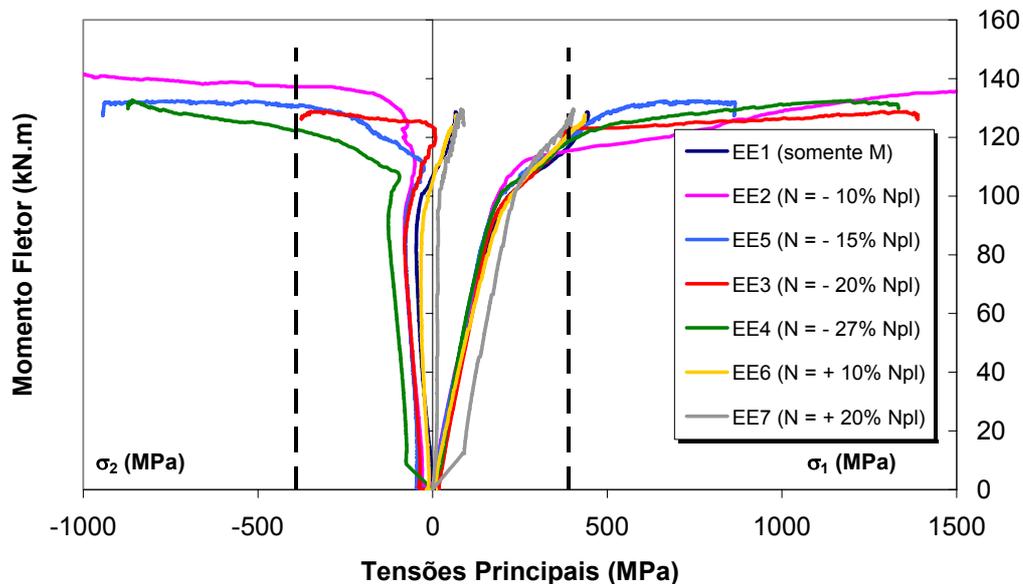


Figura 5.18 – Tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  (roseta A)

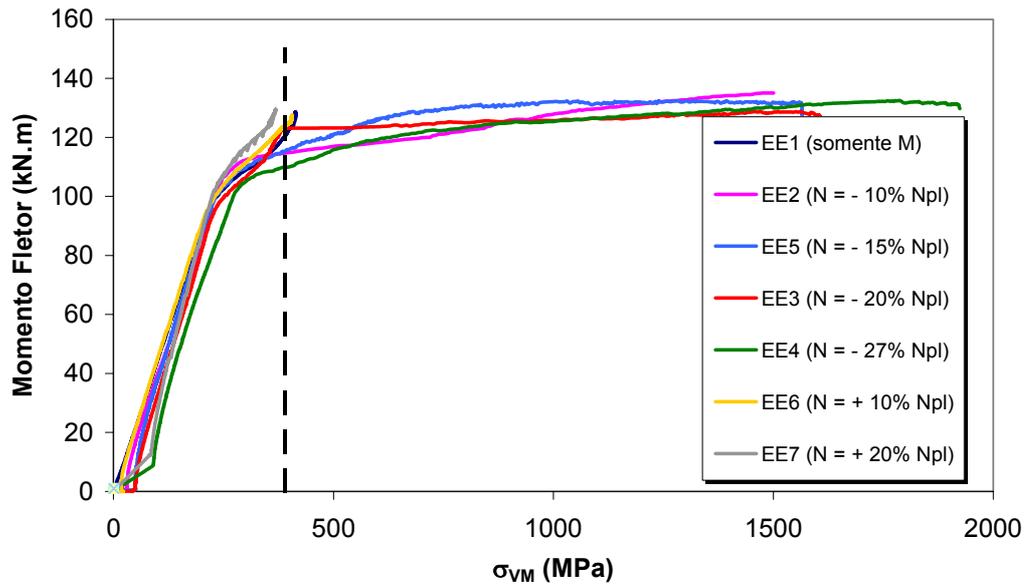


Figura 5.19 - Tensão de Von Mises  $\sigma_{VM}$  (roseta A)

Finalmente, analisando-se a Figura 5.19 e comparando-se as tensões de Von Mises obtidas para esta componente, percebe-se que somente para os ensaios com esforço axial de compressão, esta componente atingiu o escoamento.

### 5.2.5

#### 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 e do extensômetro 10 localizado entre as duas linhas superiores de parafusos conforme apresentado na Figura 5.20(a) onde também pode-se observar a configuração deformada da mesa da coluna. Já a Figura 5.20(b) apresenta um detalhe da mesa da coluna antes do início das deformações plásticas.

Nas curvas momento *versus* deformação apresentadas na Figura 5.21 pode-se observar que, para os ensaios onde aplicou-se esforço axial de tração, a componente mesa da coluna à flexão apresentou deformações de tração, acontecendo o inverso nos ensaios com esforço axial de compressão. Diferentemente dos ensaios com placa de extremidade ajustada, nesta série, devido a presença de duas linhas de parafusos com dois parafusos cada, a

componente placa de extremidade à flexão atinge claramente o escoamento somente no ensaio EE7 devido ao elevado esforço axial de tração aplicado.

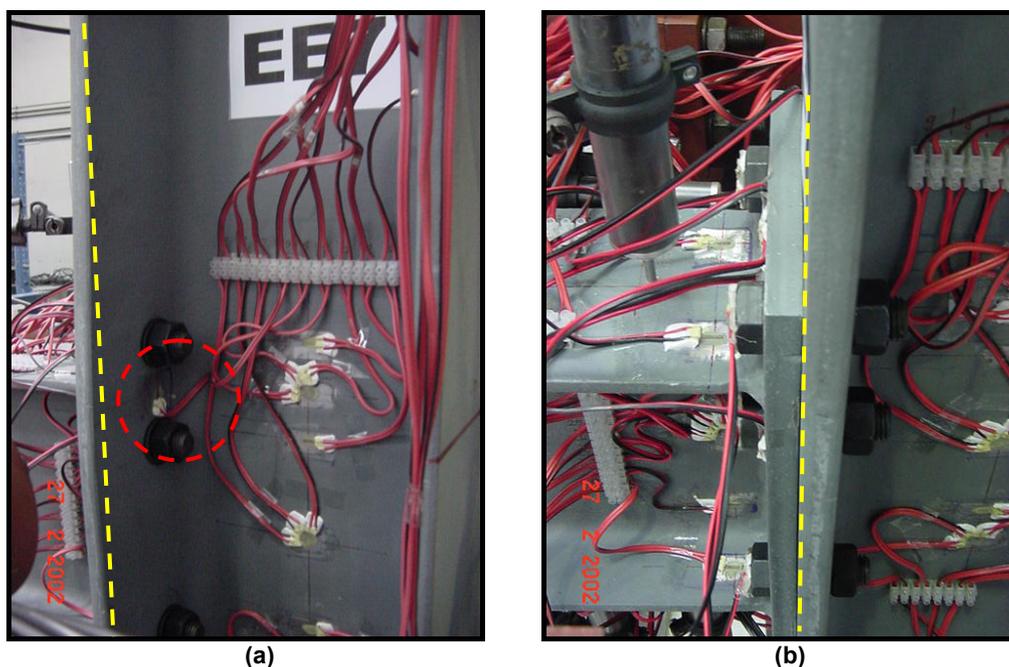


Figura 5.20 – Deformação da mesa da coluna submetida à flexão

Os deslocamentos medidos para esta componente são apresentados na Figura 5.22 onde nota-se que as curvas apresentaram o mesmo comportamento, tendo apenas a perda da linearidade da curva para diferentes níveis de momento fletor aplicado. Nota-se que nos dois ensaios com esforço axial de tração, EE6 e EE7, esta perda de linearidade ocorre aos 80kN.m e 100kN.m, respectivamente.

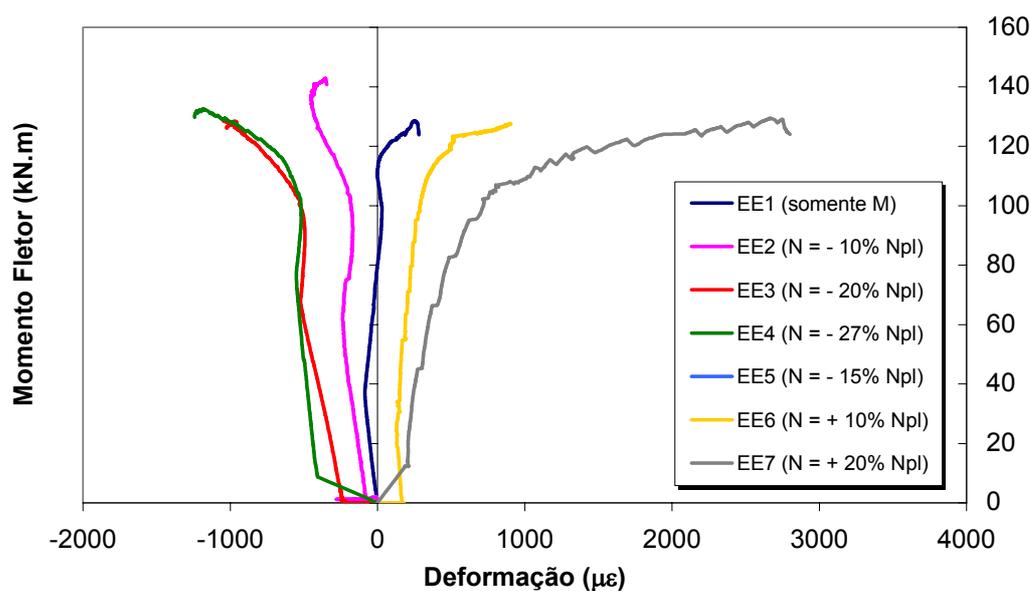


Figura 5.21 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (extensômetro 10)

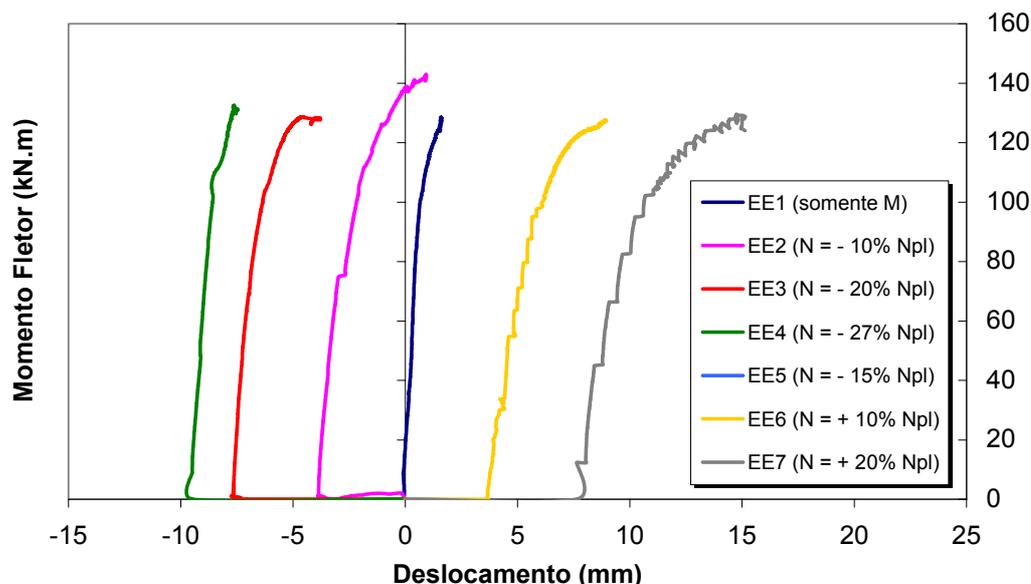


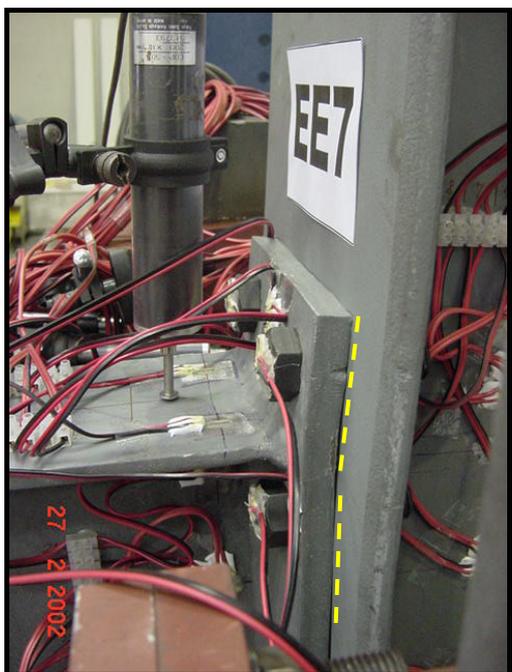
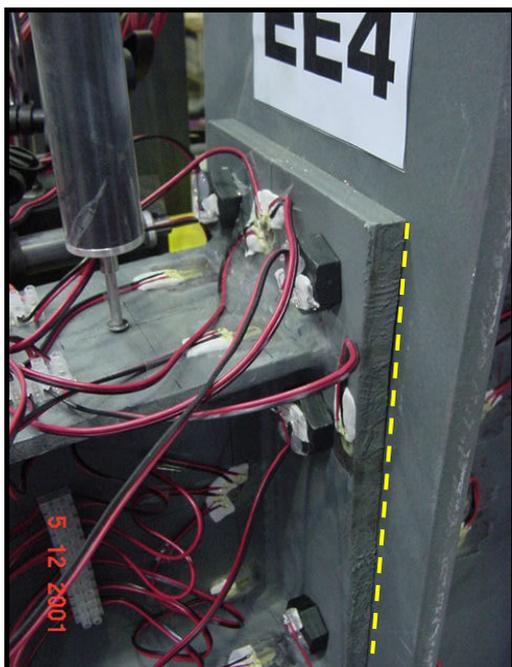
Figura 5.22 – Curvas M x  $\delta$  (transdutor 45)

### 5.2.6

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

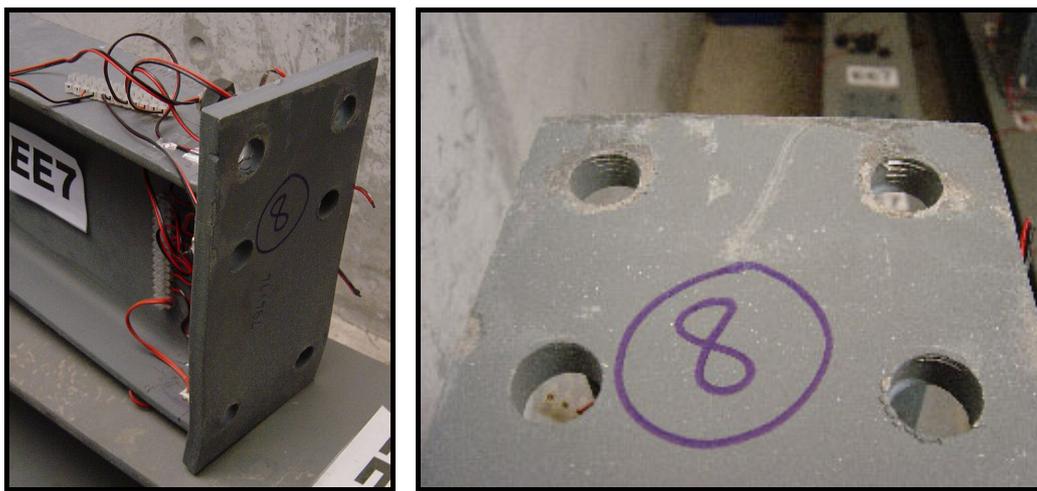
Para os ensaios com placa de extremidade ajustada, a componente placa de extremidade à flexão foi avaliada através dos extensômetros lineares 23 e 24, da roseta D correspondente aos canais 15, 16 e 17 além do transdutor de deslocamentos 44.

Avaliando-se as configurações deformadas dos ensaios EE4 e EE7, apresentadas na Figura 5.23, onde aplicou-se, respectivamente, o máximo esforço axial de compressão e o máximo esforço axial de tração, percebe-se a diferença entre as deformações ocorridas para esta componente. No ensaio EE4 nota-se que a placa de extremidade à flexão praticamente não sofreu deformações. Por outro lado, no ensaio EE7 observa-se que, devido ao esforço axial de tração, a placa de extremidade apresentou deformações plásticas que também podem ser observadas nas fotos obtidas após a desmontagem do ensaio. Todavia, as “charneiras” plásticas desenvolvidas não foram facilmente observadas.



(a) Ensaio EE4 ( $N = -27\% N_{pl}$ )

(b) Ensaio EE7 ( $N = +20\% N_{pl}$ )

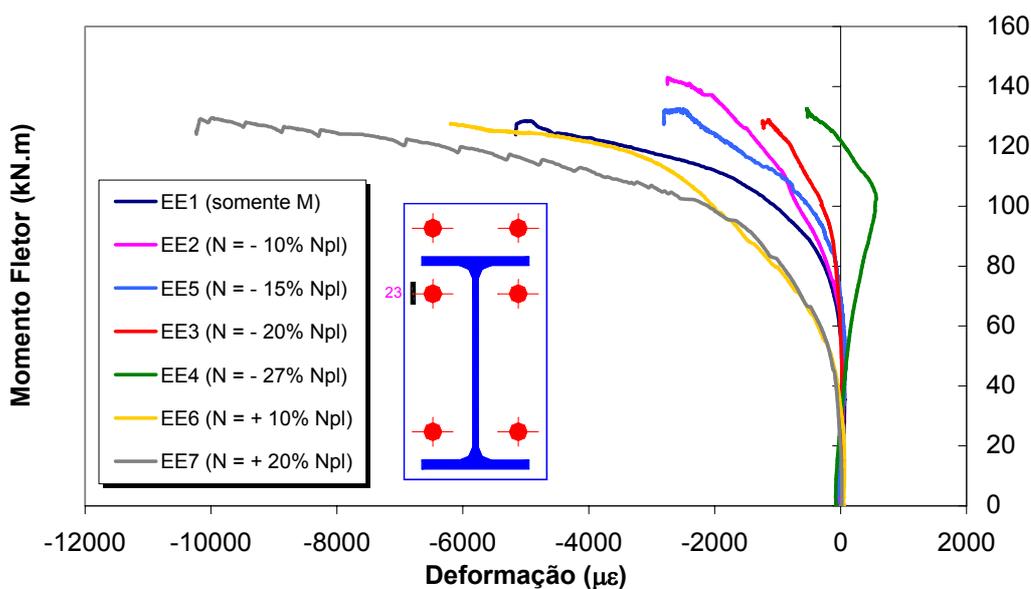


(c) vista global – EE7

(d) detalhe da zona tracionada

**Figura 5.23 – Deformações da placa de extremidade à flexão – Ensaios EE**

Através da análise da Figura 5.24 e da Figura 5.25 onde são apresentadas as curvas obtidas com os extensômetros número 23 e 24, respectivamente, observa-se novamente, como o esforço axial de tração ou de compressão, pode afetar o comportamento da componente crítica da ligação ensaiada. Nos ensaios com esforço axial de compressão, o escoamento é menos visível quando comparado com os ensaios onde se aplicou esforço axial de tração. Nestes ensaios, o escoamento foi atingido em níveis inferiores de carregamento quando comparados com o ensaio EE1 onde se aplicou somente momento fletor.



**Figura 5.24 – Curvas  $M \times \varepsilon$  (extensômetro 23)**

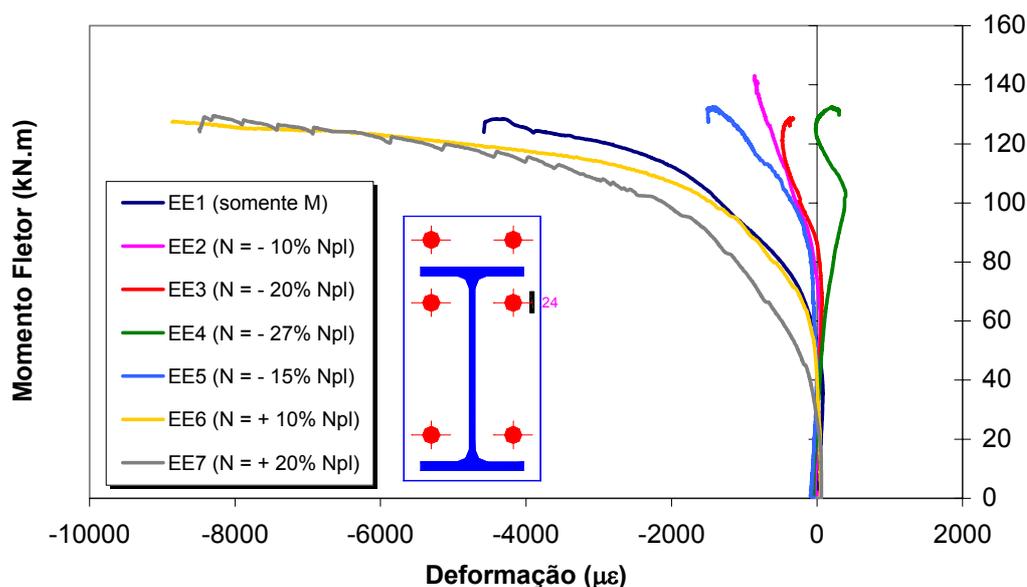
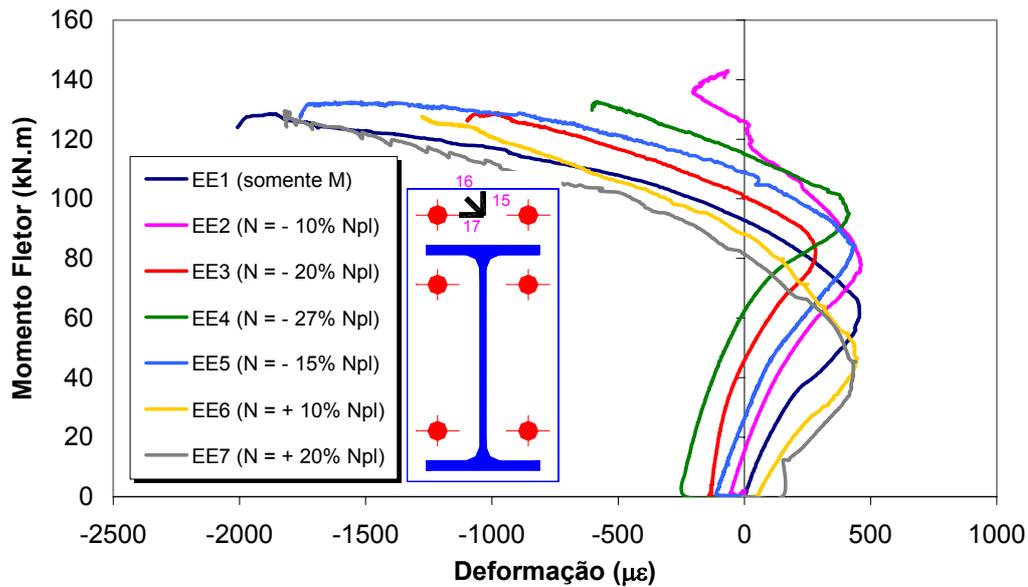


Figura 5.25 – Curvas  $M \times \epsilon$  (extensômetro 24)

Dentro da mesma filosofia realizada na análise desta componente apresentada no capítulo anterior, a resistência desta componente é igual a 289,8kN para a primeira linha de parafusos e 339,3kN para a segunda linha de parafusos (valores obtidos com a resistência à tração real do material). Nos gráficos apresentados na Figura 5.26 e Figura 5.27, esta componente atinge o escoamento no ensaio EE1, para um nível de momento fletor aplicado de aproximadamente 65kN.m. Para este nível de momento, a força de tração nos parafusos da linha superior, calculada através das deformações nos extensômetros colocados nestes parafusos<sup>3</sup>, canais 33 e 34, é igual a 181,0kN. Já para os parafusos da segunda linha à tração, canais 35 e 36, a força obtida é igual a 214,4kN. Na análise desta componente, a diferenciação entre o ponto de escoamento da mesma na direção da primeira e segunda linhas de parafusos torna-se difícil devido ao posicionamento dos extensômetros.

Apresenta-se na Figura 5.26 as curvas momento *versus* deformação obtidas através do canal perpendicular da roseta D. Nestas, percebe-se claramente o ponto que caracteriza o escoamento da componente para cada um dos ensaios e a mudança de sentido da curva provocada pelo efeito de *Poisson*.

<sup>3</sup> A análise da componente referente aos parafusos submetidos à tração será apresentada no §5.2.9 deste capítulo.



**Figura 5.26 – Curvas M x  $\epsilon$  (roseta D - canal 15)**

Na Figura 5.27 estão presentes as curvas obtidas através do canal horizontal da mesma roseta. A seguir, apresenta-se a análise das tensões principais obtidas através da roseta mencionada anteriormente.

Na Figura 5.28 apresentam-se as tensões principais  $\sigma_1$  obtidas através da roseta D, lembrando-se mais uma vez que o canal 15 corresponde a leitura a  $0^\circ$ , o 16 a  $45^\circ$  e o 17 a  $90^\circ$ , respectivamente. Comparando-se estas tensões com as tensões  $\sigma_2$ , apresentadas na Figura 5.29, nota-se que as tensões na direção 2 são bem menores do que as da direção 1, indicando que as deformações nesta região da placa de extremidade são basicamente, na direção vertical. Isto se confirma na Figura 5.31 que apresenta a evolução da direção principal  $\phi_1$  ao longo do ensaio EE1 onde aplicou-se somente momentos fletor.

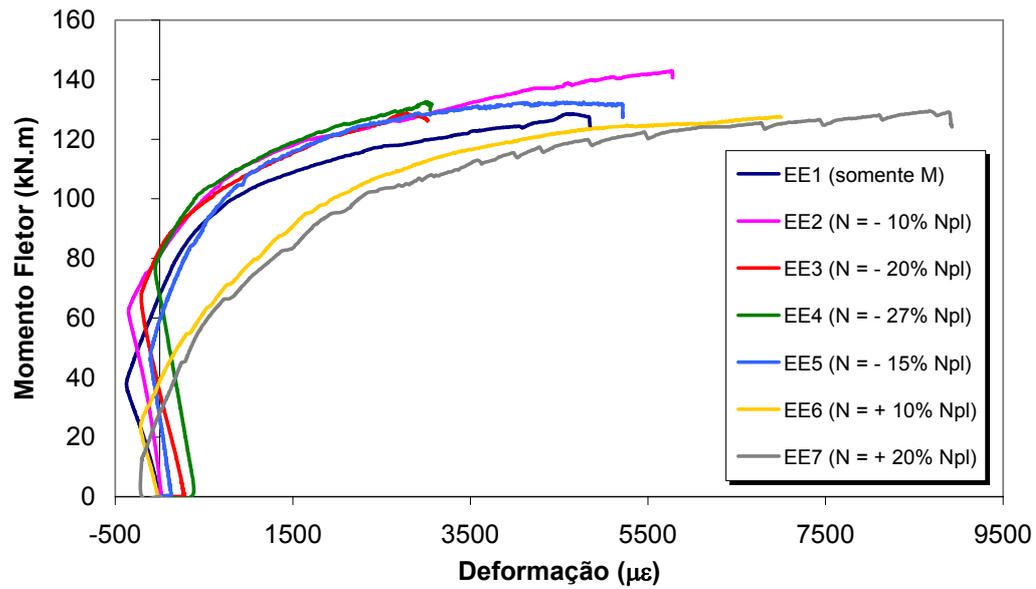


Figura 5.27 – Curvas M x  $\epsilon$  (roseta D - canal 17)

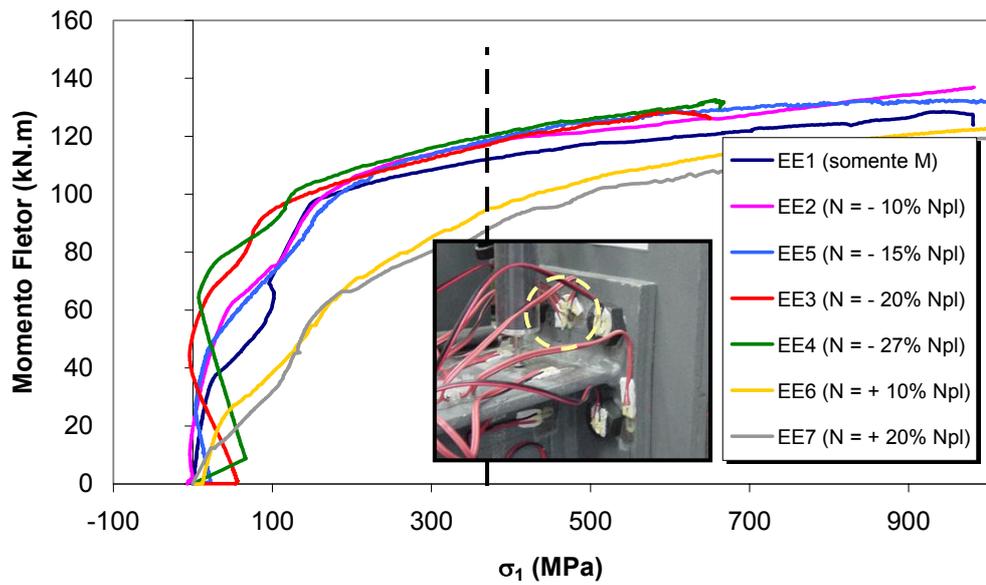


Figura 5.28 – Tensões principais  $\sigma_1$  (roseta D)

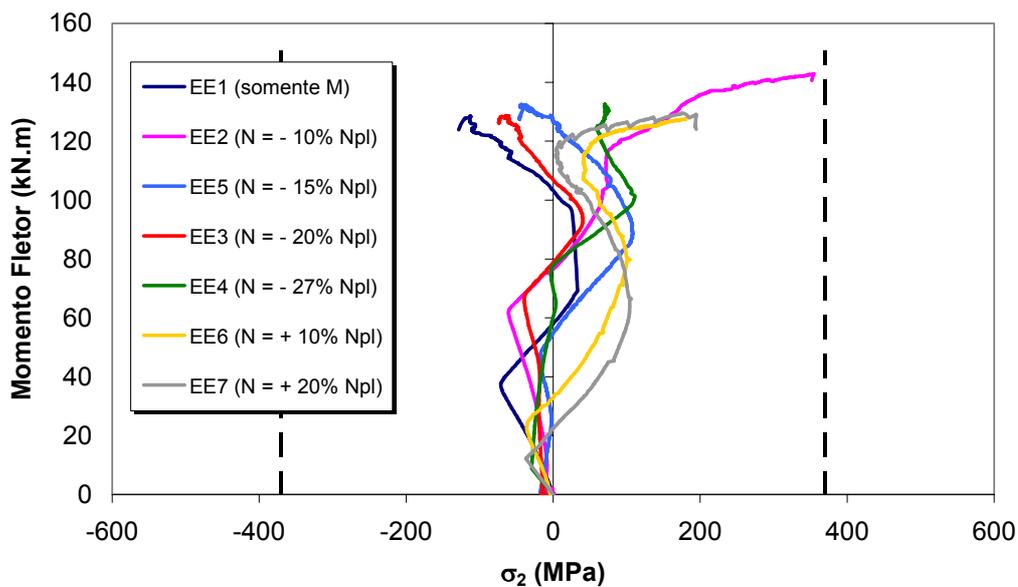


Figura 5.29 – Tensões principais  $\sigma_2$  (roseta A)

Ao se avaliar as curvas apresentadas na Figura 5.31 correspondentes as tensões de *Von Mises*, obtidas para a componente em questão, conclui-se que por este critério de ruptura, em todos os ensaios, o escoamento da componente foi verificado.

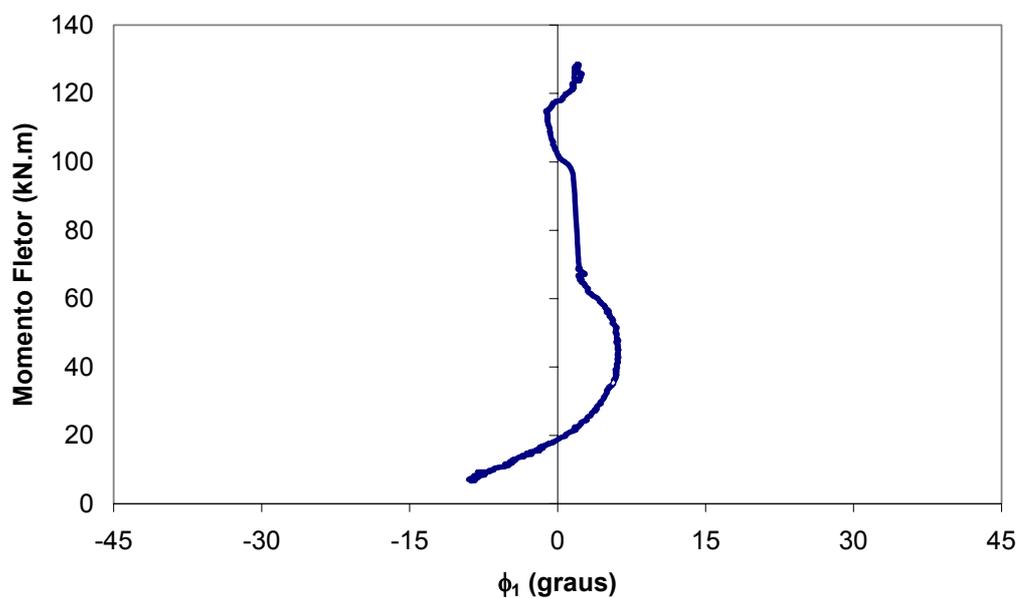


Figura 5.30 - Direção principal  $\phi_1$  (roseta A) – Ensaio EE1

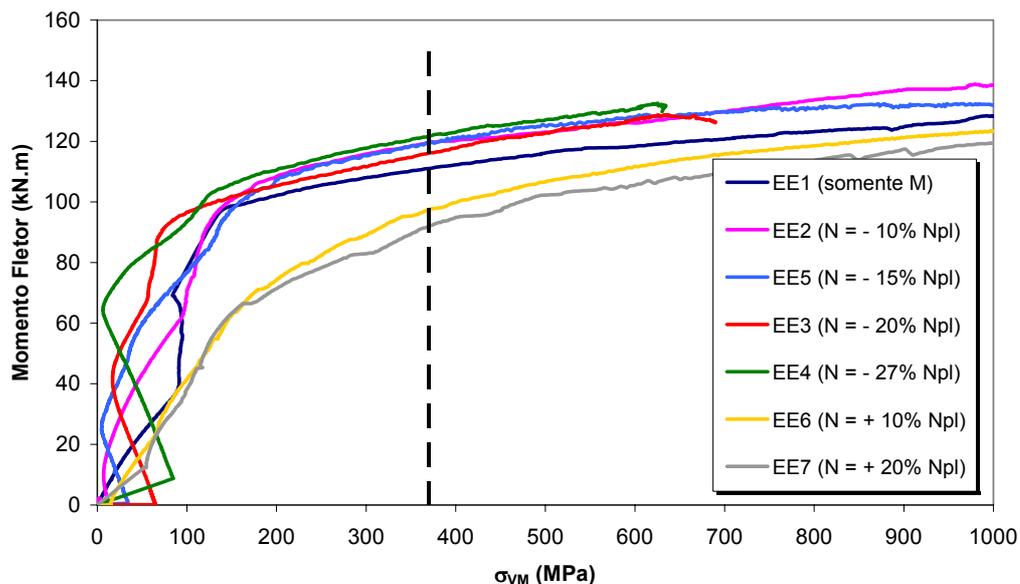


Figura 5.31 - Tensão de Von Mises  $\sigma_{VM}$  (roseta A)

Na Figura 5.32 são apresentadas as curvas momento *versus* deslocamento obtidas através do transdutor de deslocamentos número 44 onde nota-se um comportamento semelhante em todos os ensaios, variando apenas o deslocamento inicial provocado pelo esforço axial aplicado antes do início da aplicação do momento fletor. A Tabela 5.3 apresenta os deslocamentos medidos correspondentes a um momento fletor igual a 100kN.m.

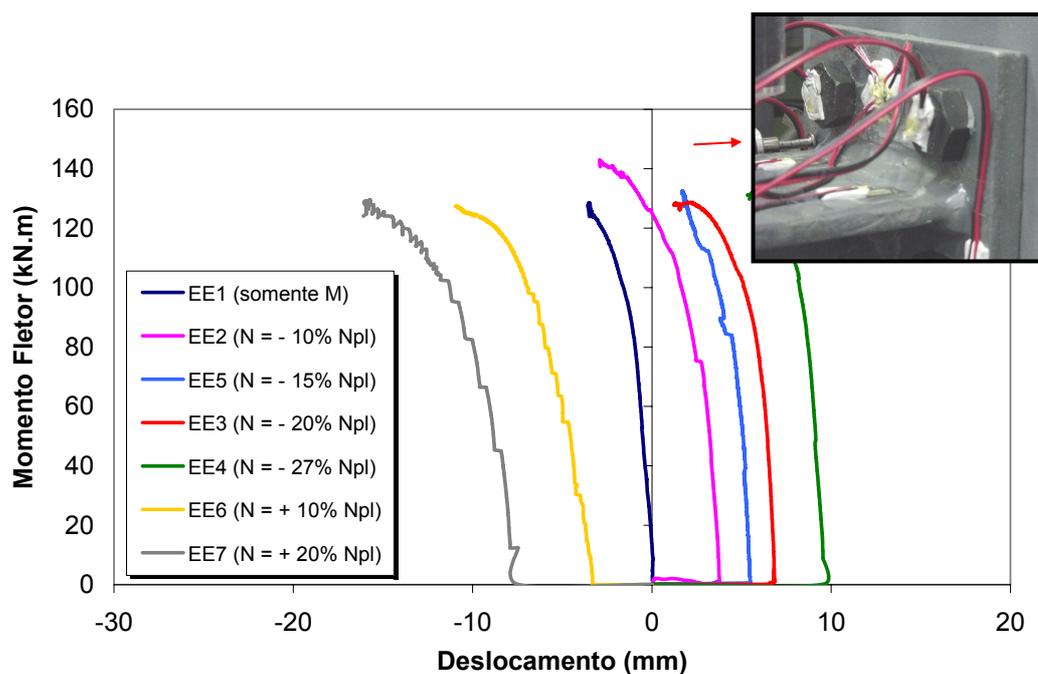


Figura 5.32 – Curvas M x  $\delta$  (transdutor 44)

Tabela 5.3 – Comparação de deslocamentos – canal 44 (em mm)

Ensaio	EE1	EE2	EE5	EE3	EE4	EE6	EE7
$\delta_{M=0kN}$ (mm)	0	3,8	5,5	6,8	9,5	-3,3	-7,5
$\delta_{M=100 kN}$ (mm)	-0,9	2,3	4,5	5,8	8,7	-6,0	-9,9

### 5.2.7

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

Seguindo a mesma metodologia apresentada até o momento, o comportamento da mesa da viga submetida à compressão para os ensaios da série EE será avaliado através dos extensômetros 29 a 32. Analisando-se curvas apresentadas a seguir, percebe-se claramente que a mesa da viga em compressão também atinge o escoamento em todos os ensaios. Todavia, para os ensaios com esforço axial de compressão, constatou-se este escoamento em níveis inferiores de carregamento quando comparados com os ensaios onde se aplicou esforço axial de tração.

De acordo com o Eurocode 3, a resistência da mesa da viga em compressão é igual a 542,2kN. Calculando-se a média das deformações medidas na mesa inferior da viga do ensaio EE1 – ver Figura 5.37, obtém-se algo em torno de  $2100\mu\epsilon$  equivalente a uma força de, aproximadamente, 520kN, menor do que os 542,2kN mencionados acima. Isto pode ter sido causado por diferenças encontradas na tensão de escoamento do material obtidas nos ensaios de tração realizados.

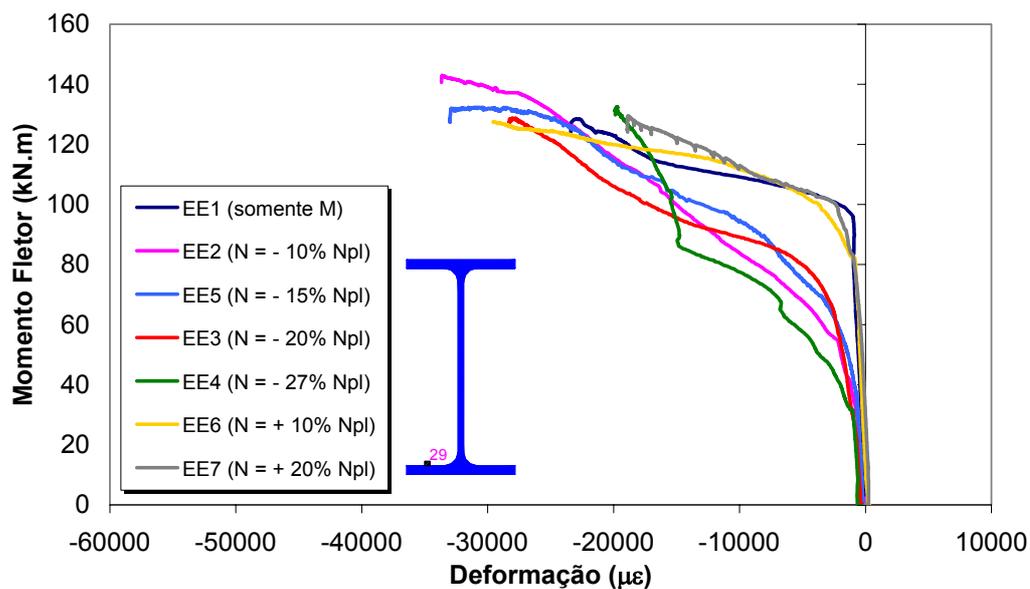


Figura 5.33 – Curvas  $M \times \epsilon$  (extensômetro 29)

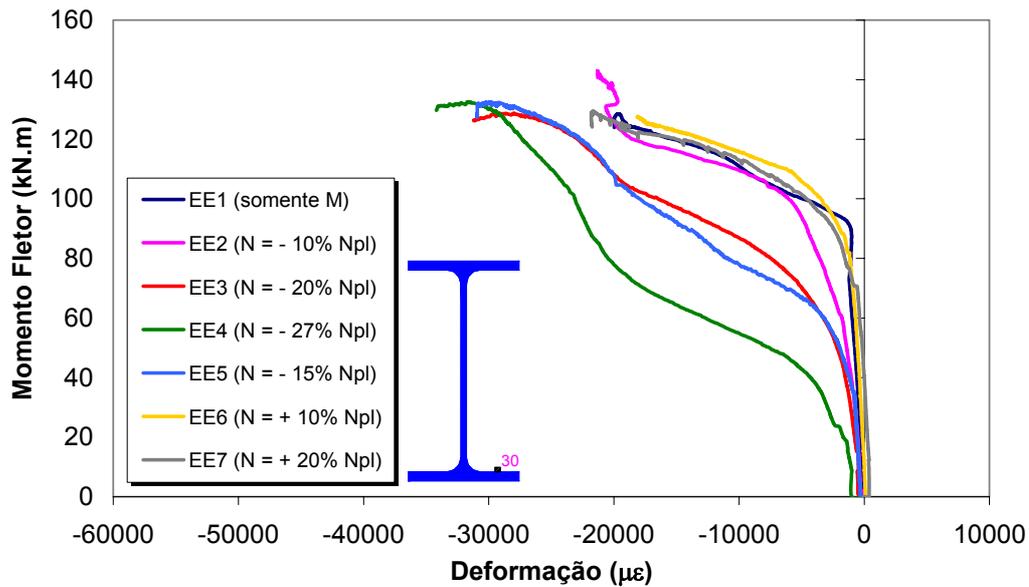


Figura 5.34 – Curvas M x  $\epsilon$  (extensômetro 30)

Nas curvas mencionadas, pode-se observar também o momento em que ocorre a flambagem local da mesa inferior da viga para os ensaios com esforço axial de compressão representada pela mudança da direção da curva momento *versus* deformação.

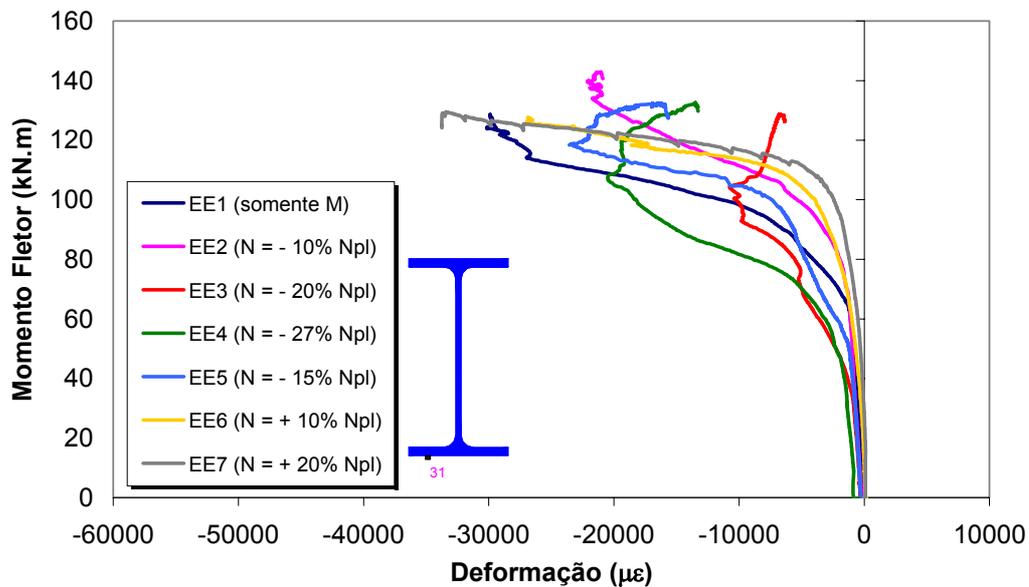


Figura 5.35 – Curvas M x  $\epsilon$  (extensômetro 31)

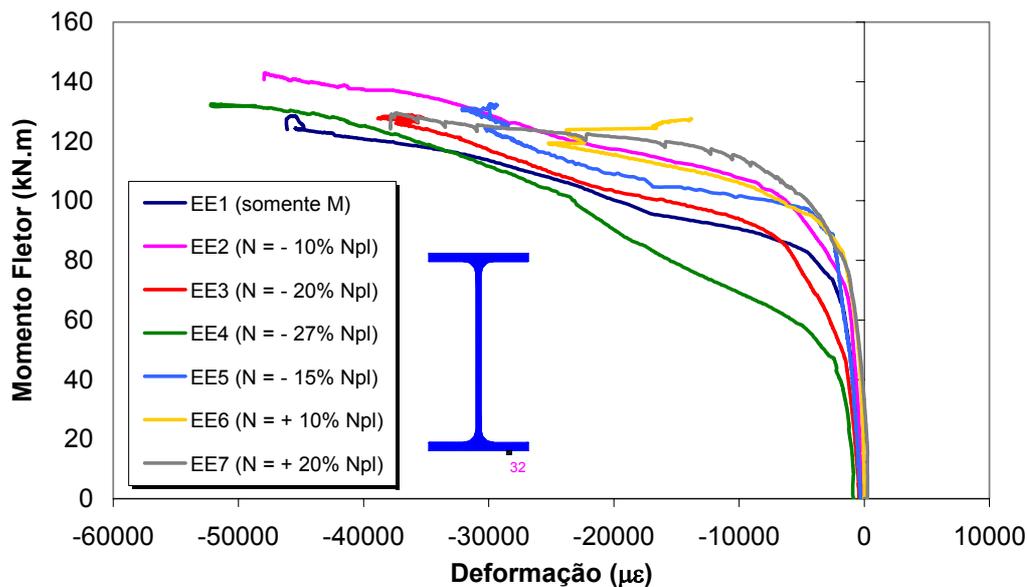


Figura 5.36 – Curvas M x  $\epsilon$  (extensômetro 32)

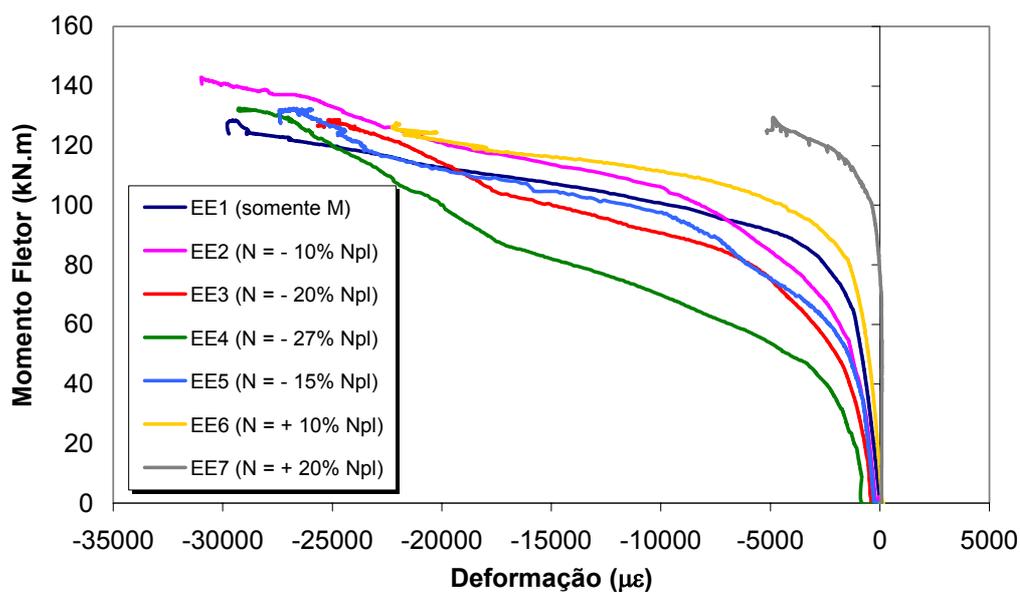
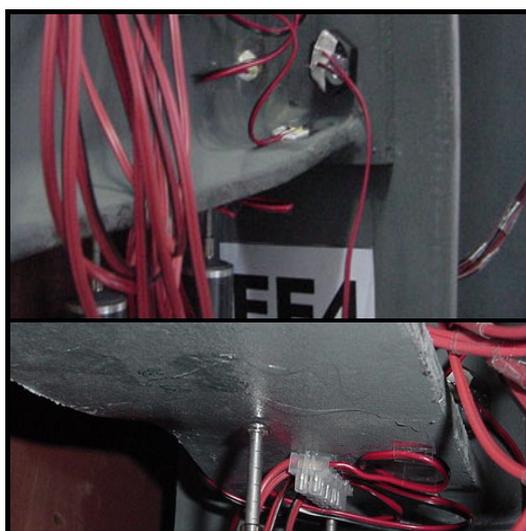
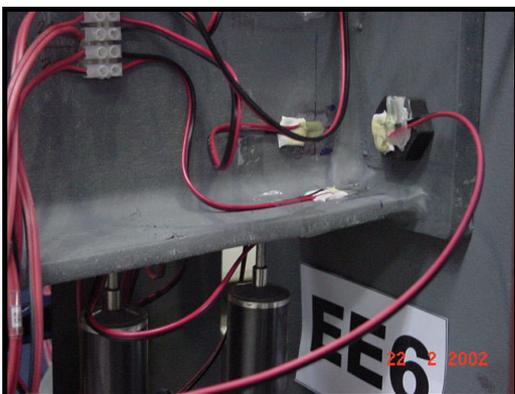
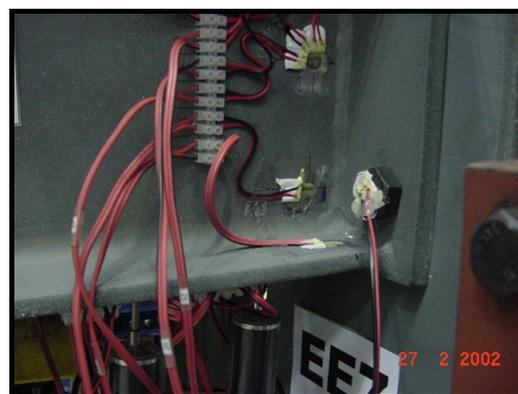


Figura 5.37 – Curvas M x  $\epsilon$  (média extensômetros 29 a 32)

Na Figura 5.38 pode-se comparar as deformações ocorridas na mesa inferior da viga observando-se a flambagem local da mesma para alguns dos ensaios. Observa-se novamente que, o esforço axial de tração aplicado nos ensaios EE6 e EE7, respectivamente, reduz significativamente as deformações ocorridas na mesa inferior da viga.

(a) Ensaio EE2 ( $N = -10\% N_{pl}$ )(b) Ensaio EE3 ( $N = -20\% N_{pl}$ )(c) Ensaio EE4 ( $N = -27\% N_{pl}$ )(d) Ensaio EE5 ( $N = -15\% N_{pl}$ )(e) EE6 ( $N = +10\% N_{pl}$ )(g) Ensaio EE7 ( $N = +20\% N_{pl}$ )

**Figura 5.38 – Comparação de deformações – mesa da viga à compressão**

A Figura 5.39 ilustra a instabilidade ocorrida na alma da viga dos ensaios EE3 e EE4 provocada pela flambagem local da mesa inferior da viga dos mesmos devido ao elevado esforço axial de compressão igual a  $-20\%$  e  $-27\%$ , respectivamente.

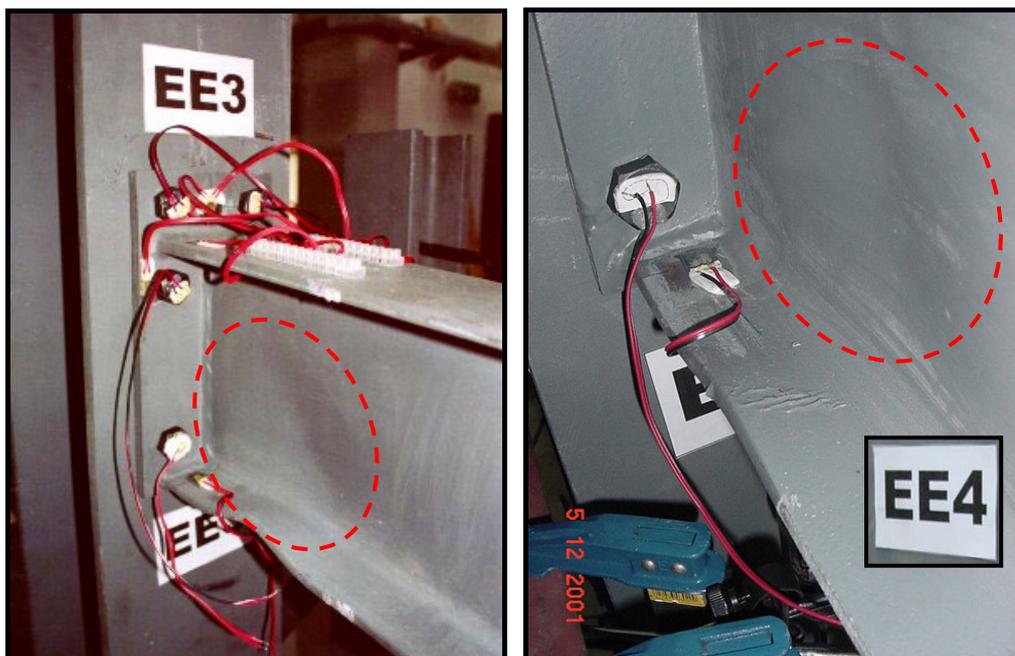


Figura 5.39 – Instabilidade ocorrida na alma da viga – Ensaios EE3 e EE4

### 5.2.8

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

Para se avaliar esta componente, utilizam-se os extensômetros lineares 22 e 28, além da roseta E dos canais 25, 26 e 27, respectivamente.

Na Figura 5.40 apresentam-se as curvas, obtidas com o extensômetro 22 posicionado na direção da segunda linha de parafusos, que evidenciam o escoamento desta componente para todos os ensaios. Vale ressaltar que as deformações ocorridas nos ensaios com esforço axial de compressão foram bastante inferiores quando comparadas com as obtidas nos ensaios com esforço de tração, principalmente o ensaio EE7.

Através da observação da Figura 5.41, nota-se a transmissão do esforço de cisalhamento ao longo da alma proveniente da carga aplicada através do atuador hidráulico.

Observando-se as curvas provenientes do canal 27 da roseta E, percebe-se que na direção da linha média da viga, as deformações são de compressão para os ensaios com maior esforço axial de compressão aplicado, EE3 e EE4. Para os outros dois ensaios, EE2 e EE3, a partir de um determinado ponto, as deformações de compressão mudam de sinal, passando a ser de tração. Isto ocorreu porque a partir do ponto mencionado, o esforço de tração proveniente do momento fletor aplicado, supera a parcela de esforço axial de compressão

atuante nesta região. Por outro lado, como era de se esperar, para os ensaios com esforço axial de tração ou somente momento fletor, EE6, EE7 e EE1, as deformações observadas, neste ponto, foram sempre de tração.

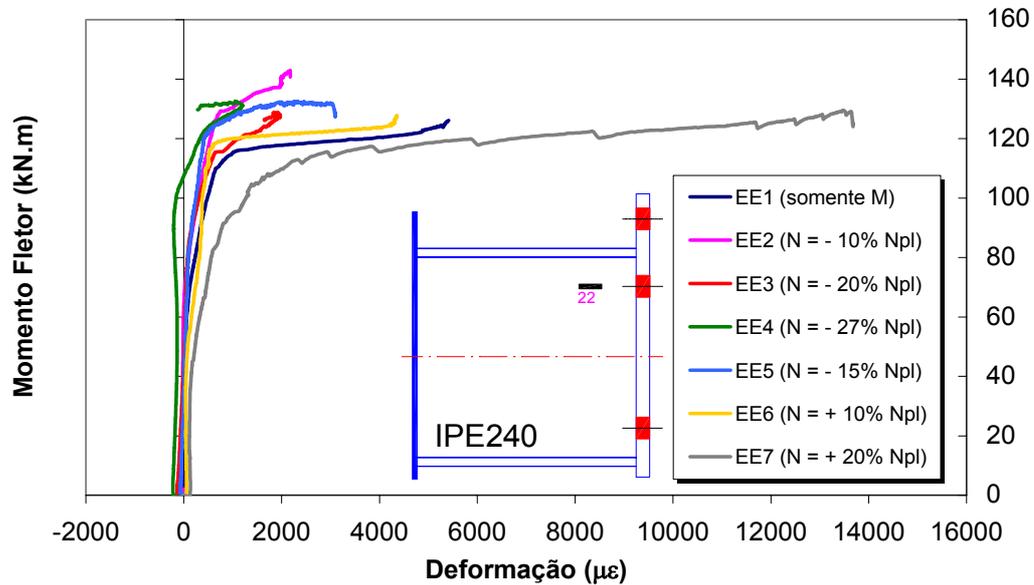


Figura 5.40 – Curvas  $M \times \epsilon$  (extensômetro 22)

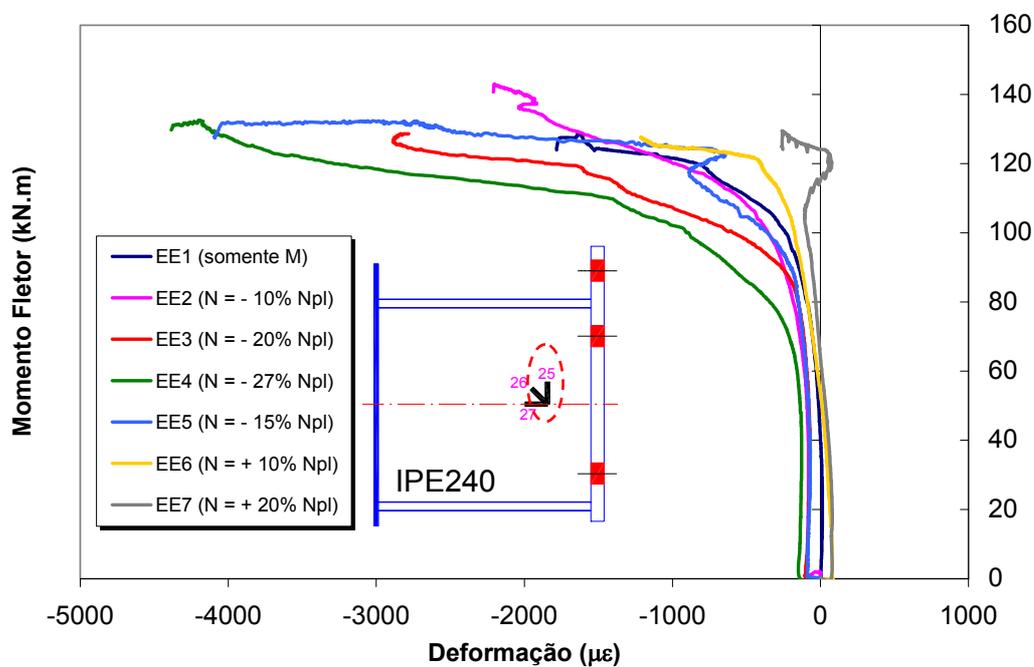


Figura 5.41 – Curvas  $M \times \epsilon$  (roseta E - canal 25)

Observando-se a Figura 5.42 e a Figura 5.43, 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 e somente com momento fletor aplicado.

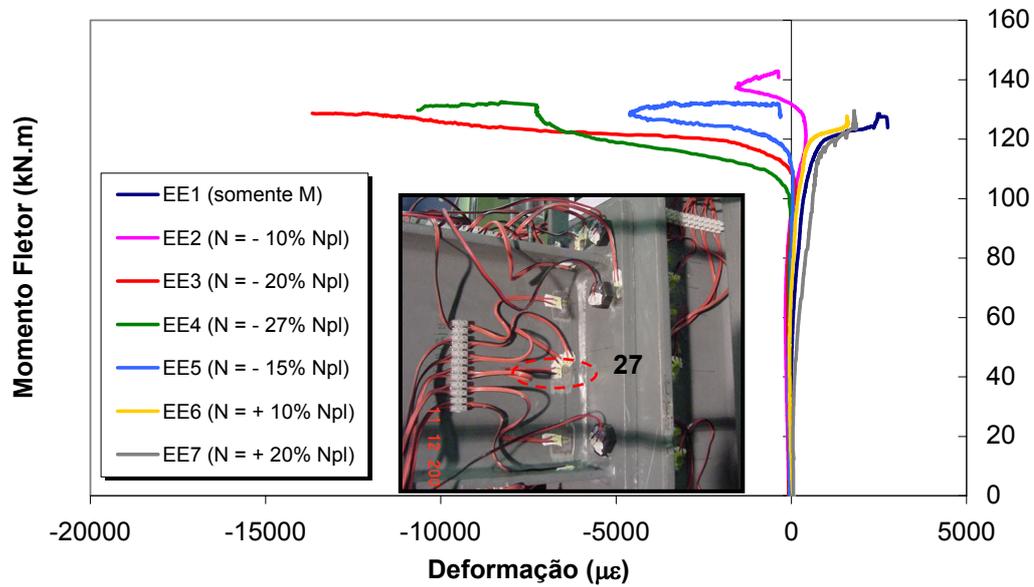


Figura 5.42 – Curvas  $M \times \epsilon$  (roseta E - canal 27)

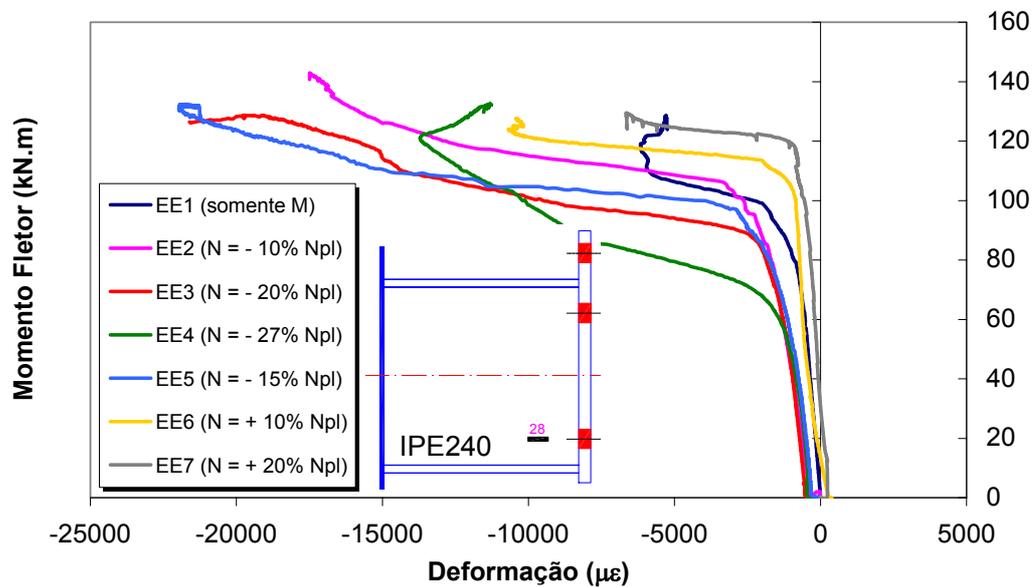


Figura 5.43 – Curvas  $M \times \epsilon$  (extensômetro 28)

### 5.2.9

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

Seguindo-se a mesma metodologia apresentada no capítulo anterior, apresenta-se a seguir, as curvas momento *versus* deformação sem consideração da protensão nos parafusos, momento *versus* tensão considerando-se essa protensão, momento *versus* rotação e finalmente, força *versus* rotação, para os ensaios EE1, EE4 e EE7, correspondendo respectivamente a um ensaio somente com momento fletor, um com o máximo esforço axial de compressão aplicado e um terceiro, com o máximo esforço axial de tração.

Para o ensaio EE1, percebe-se que as deformações medidas durante o ensaio, para os parafusos da linha inferior, foram sempre de compressão mas não suficientes para vencer a protensão aplicada aos mesmos conforme verifica-se nas curvas momento *versus* tensão apresentadas na Figura 5.44.

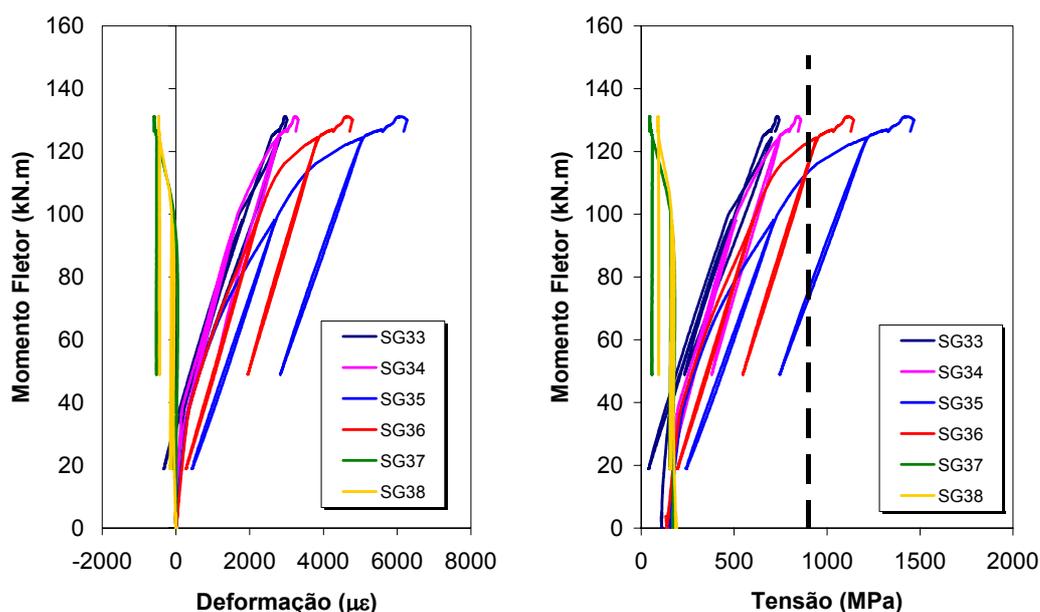


Figura 5.44 – Curvas  $M \times \varepsilon$  e  $M \times \sigma$  - Ensaio EE1

Para o cálculo do momento fletor aplicado através da força medida em cada um dos parafusos, considera-se que o centro de compressão da ligação esteja posicionado na direção da linha média da mesa inferior da viga. As diferenças encontradas nas curvas apresentadas na Figura 5.45 são provocadas pelo efeito de alavanca existente na região da ligação submetida à tração.

Observando-se a Figura 5.46, percebe-se claramente este efeito, onde apresenta-se uma comparação entre a força aplicada através do atuador hidráulico e a força medida com o auxílio dos extensômetros colocados nos parafusos e na mesa superior da viga.

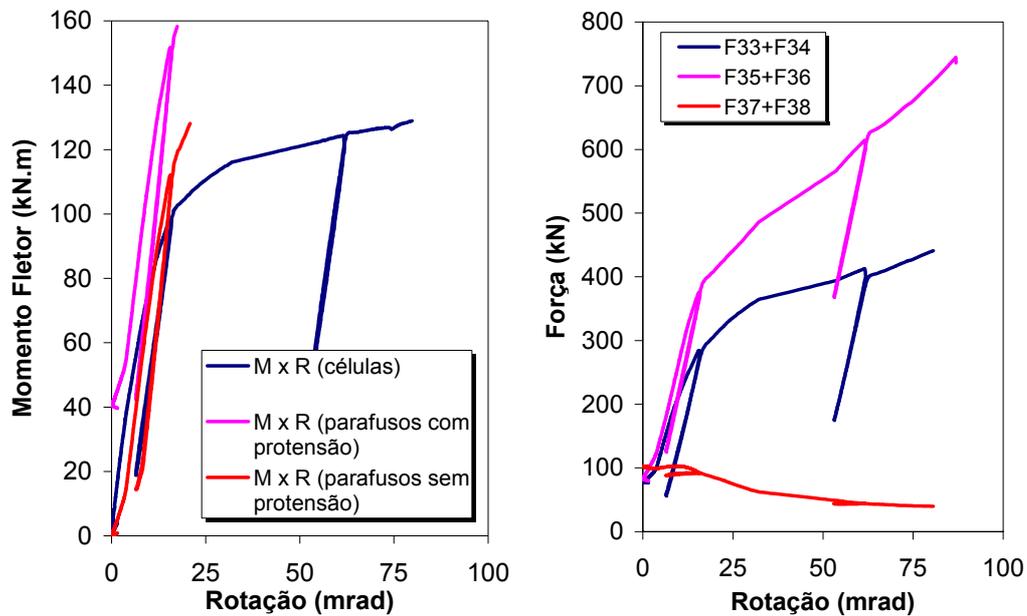


Figura 5.45 – Curvas  $M \times \phi$  e  $F \times \phi$  - Ensaio EE1

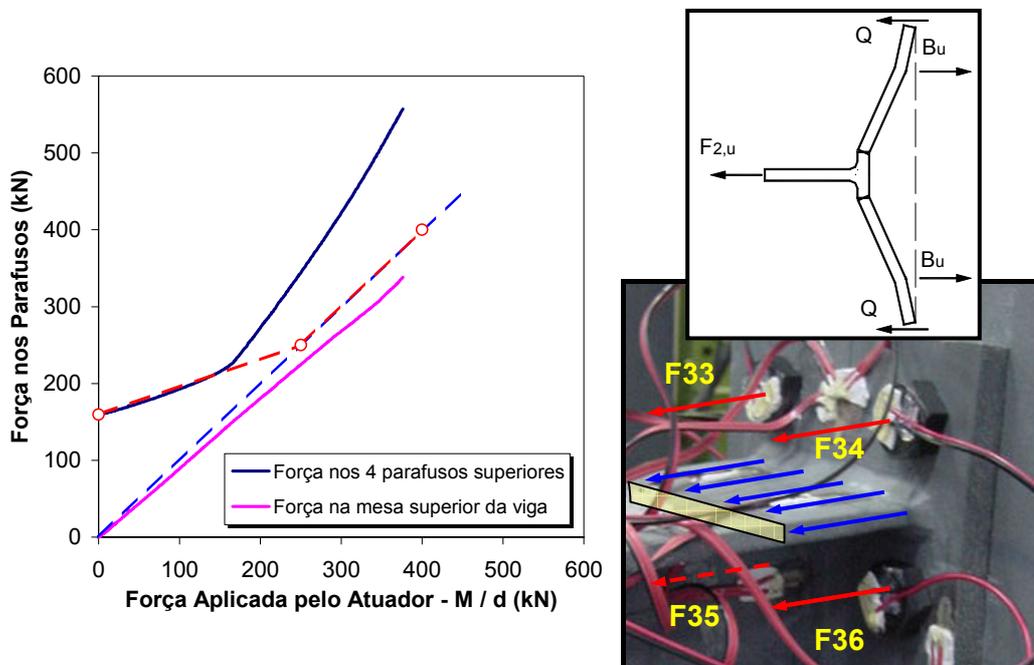
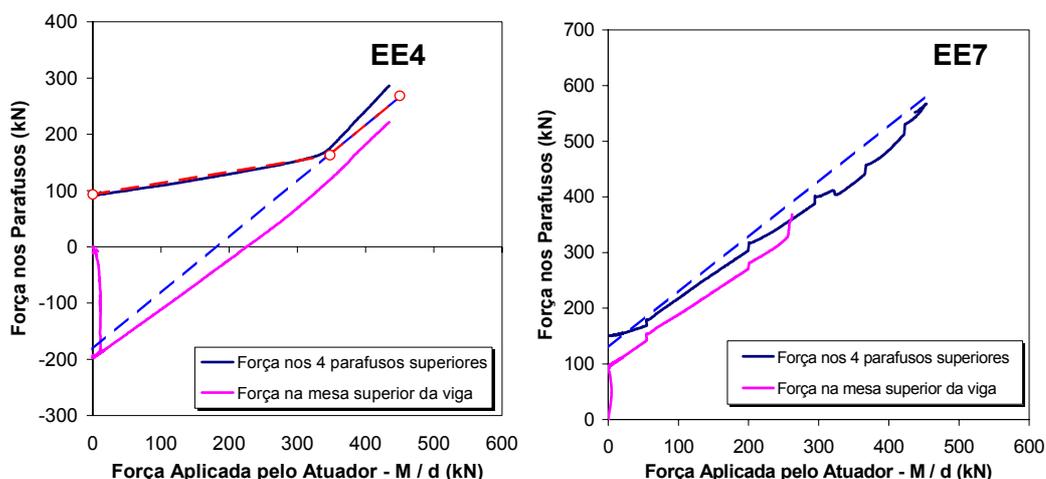


Figura 5.46 – Verificação do efeito de alavanca – Ensaio EE1

Em uma ligação onde a placa de extremidade fosse mais espessa, ou seja, mais rígida, as deformações por flexão da mesa do “*T-Stub*” considerado, ou seja, da placa de extremidade, seriam muito pequenas quando comparadas com as deformações nos parafusos. Neste caso, as forças de alavanca praticamente não existem e os parafusos estão submetidos, simplesmente, a tração. Na Figura 5.46 ilustra-se este comportamento através da linha tracejada em vermelho, [54]. O comportamento ideal - linha tracejada em azul – representa a igualdade entre a força aplicada através do atuador hidráulico – linha cheia magenta – e a força medida nos parafusos.

Para o caso da ligação em estudo, as deformações por flexão induzem as forças de alavanca  $Q$  apresentadas na Figura 5.46 que provocam um acréscimo na força aplicada aos parafusos representada pela linha cheia em azul. Inicialmente, a força de tração proveniente da mesa da viga reduz a pressão de contato entre a placa de extremidade e a mesa da coluna até o instante que ocorre a separação entre as mesmas, e começa a se desenvolver a força  $Q$ , distribuída ao longo do trecho compreendido entre a linha de parafusos e a extremidade da placa.



**Figura 5.47 – Efeito do esforço de alavanca – Ensaio EE4 e EE7**

Este efeito de alavanca pode ser observado nos gráficos da Figura 5.47 apresentada acima. No ensaio EE4 onde se aplicou o maior esforço axial de compressão, a separação prematura da placa de extremidade com a mesa da coluna não se verifica, fazendo com que o efeito de amplificação da força nos parafusos praticamente não se verifique. Este comportamento é semelhante ao caso de uma placa de extremidade bastante rígida, conforme descrito

anteriormente. Já no ensaio EE7 – máximo esforço axial de tração – não se verifica a compensação da força de protensão aplicada aos parafusos como nos casos anteriores. Além disso, percebe-se que a força obtida através das deformações medidas na mesa da viga, atinge o valor correspondente ao escoamento, deixando de ser linear.

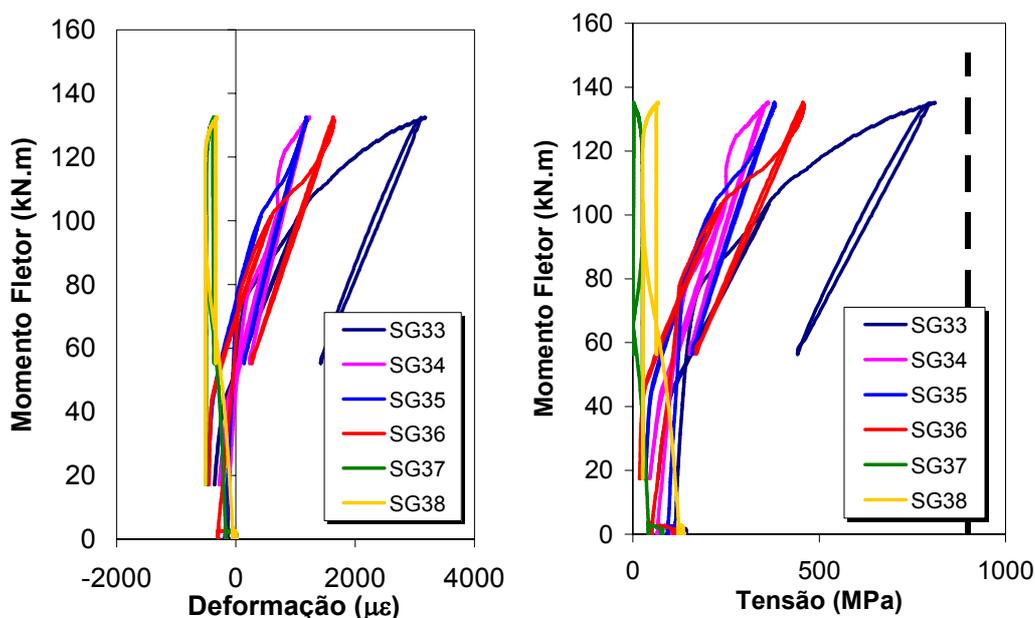


Figura 5.48 – Curvas  $M \times \varepsilon$  e  $M \times \sigma$  - Ensaio EE4

Nas curvas referentes ao ensaio EE4 cujo esforço axial aplicado foi de -27% da resistência plástica da viga, verifica-se que os parafusos não atingiram o limite de escoamento pois a força aplicada aos mesmos foi minorada pelo esforço axial, ver Figura 5.48.

Nas curvas momento *versus* tensão apresentadas na Figura 5.48, nota-se também que as deformações medidas no parafuso número 34 foram bastante diferentes das medidas no parafuso 33 e isto provocou a diferença nas curvas momento *versus* rotação apresentadas na Figura 5.49. Todavia, a rigidez inicial obtida no momento das descargas, apresentou uma boa concordância entre as duas curvas momento *versus* rotação.

Para o ensaio EE7, verifica-se uma maior semelhança entre as deformações medidas simetricamente para os parafusos da zona tracionada da ligação sendo observada a plastificação dos parafusos situados na segunda linha de parafusos - Figura 5.50. Esta plastificação faz com que a Lei de Hooke

não possa mais ser utilizada, provocando a divergência entre as curvas momento *versus* rotação apresentadas na Figura 5.51.

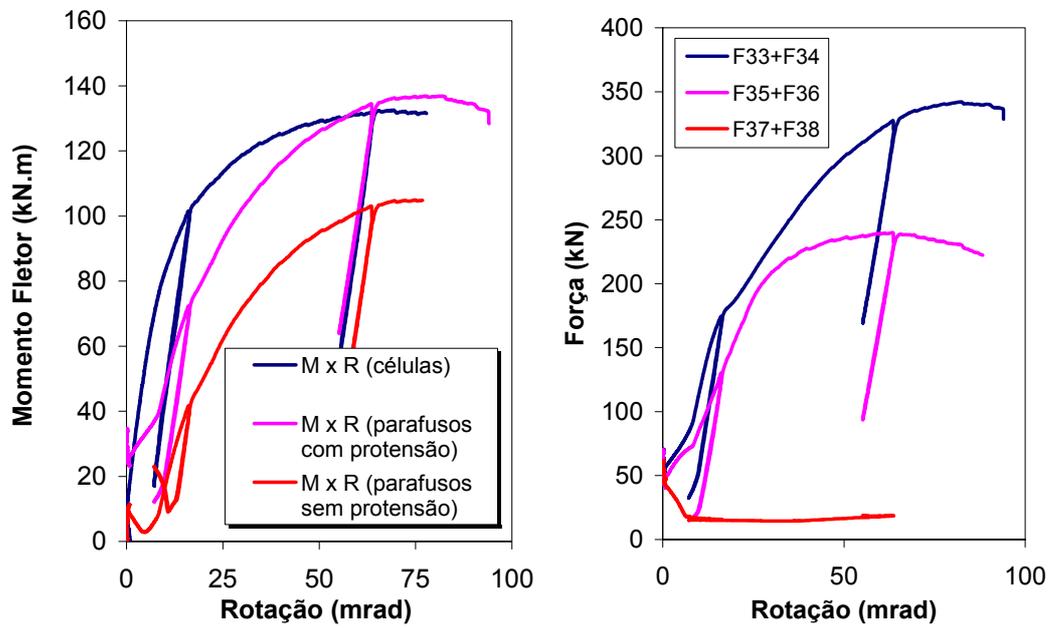


Figura 5.49 – Curvas  $M \times \phi$  e  $F \times \delta$  - Ensaio EE4

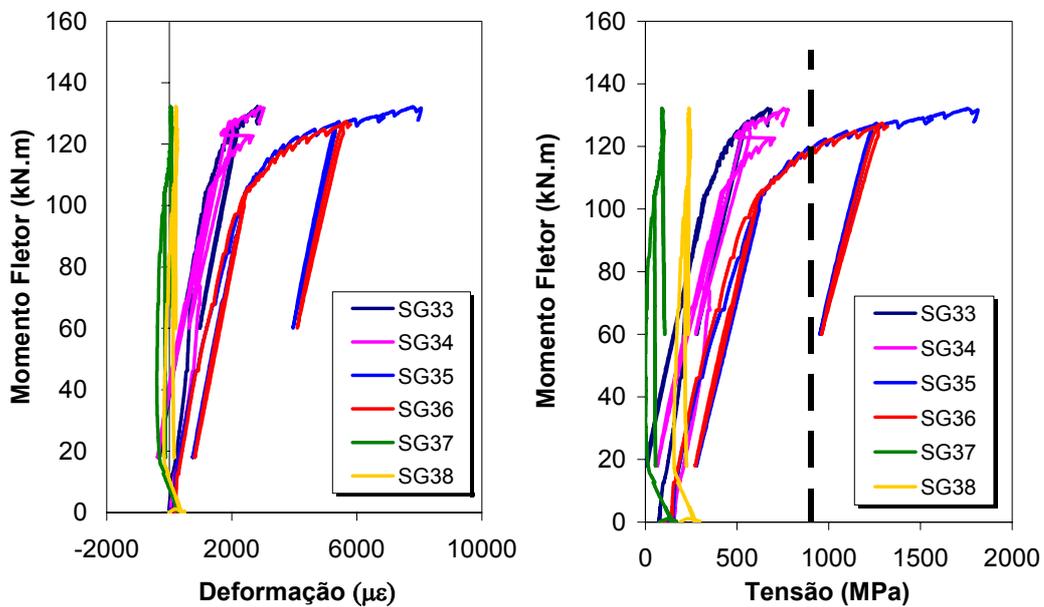


Figura 5.50 – Curvas  $M \times \epsilon$  e  $M \times \sigma$  - Ensaio EE7

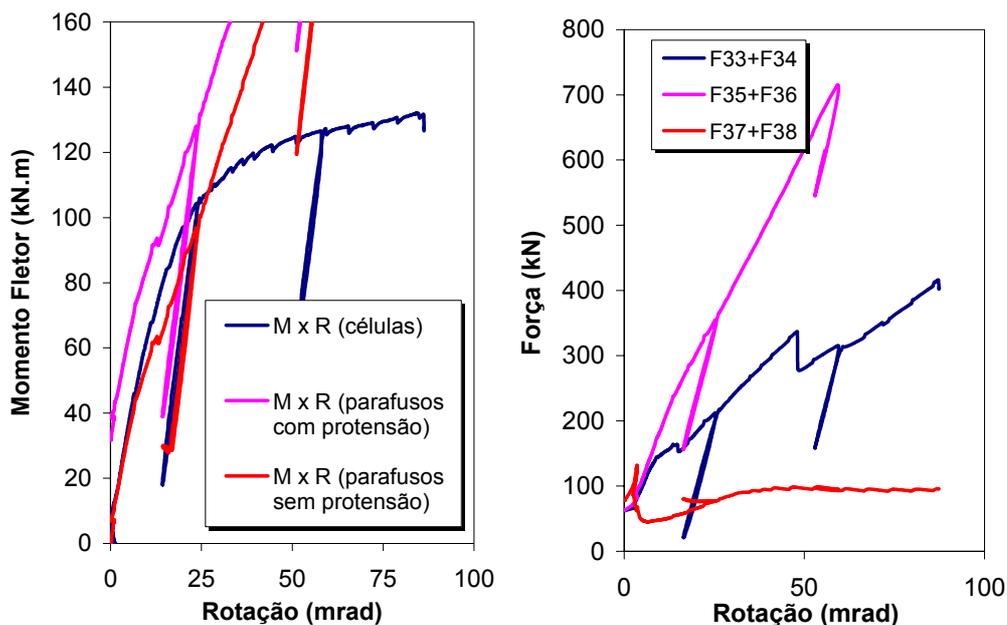


Figura 5.51 – Curvas  $M \times \phi$  e  $F \times \delta$  - Ensaio EE7

### 5.2.10 Considerações Finais dos Ensaio EE

Seguindo a mesma metodologia utilizada no capítulo anterior, apresenta-se na Figura 5.52, a seqüência de escoamento das diversas componentes para cada um dos ensaios com placa de extremidade estendida. Ao analisar-se estas curvas, percebe-se que a presença de esforço axial, seja de compressão ou de tração, afeta o comportamento das componentes mas de forma menos explícita do que nos ensaios com placa de extremidade ajustada. 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 65kN.m para o ensaio EE1 (somente momento fletor).

Para os ensaios onde foi aplicado esforço axial de compressão, EE2 a EE5, o escoamento desta componente é retardado conforme pode ser observado nas curvas (b) a (e). Entretanto, nos dois ensaios onde se aplicou esforço axial de tração, ou seja, os ensaios EE6 e EE7, esta componente atingiu o escoamento aos 45kN.m e 40kN.m, respectivamente.

Por outro lado, a componente referente à mesa da viga em compressão – componente crítica da zona em compressão – atinge o escoamento em níveis inferiores de momento fletor quando comparados com o ensaio EE1. Neste ensaio, o escoamento foi atingido aos 92kN.m. Para o ensaio EE4 (maior nível

de esforço axial de compressão) atingiu-se o escoamento aos 40kN.m e para o ensaio EE7 (maior nível de esforço axial de tração) aos 102kN.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 no próximo capítulo desta tese.

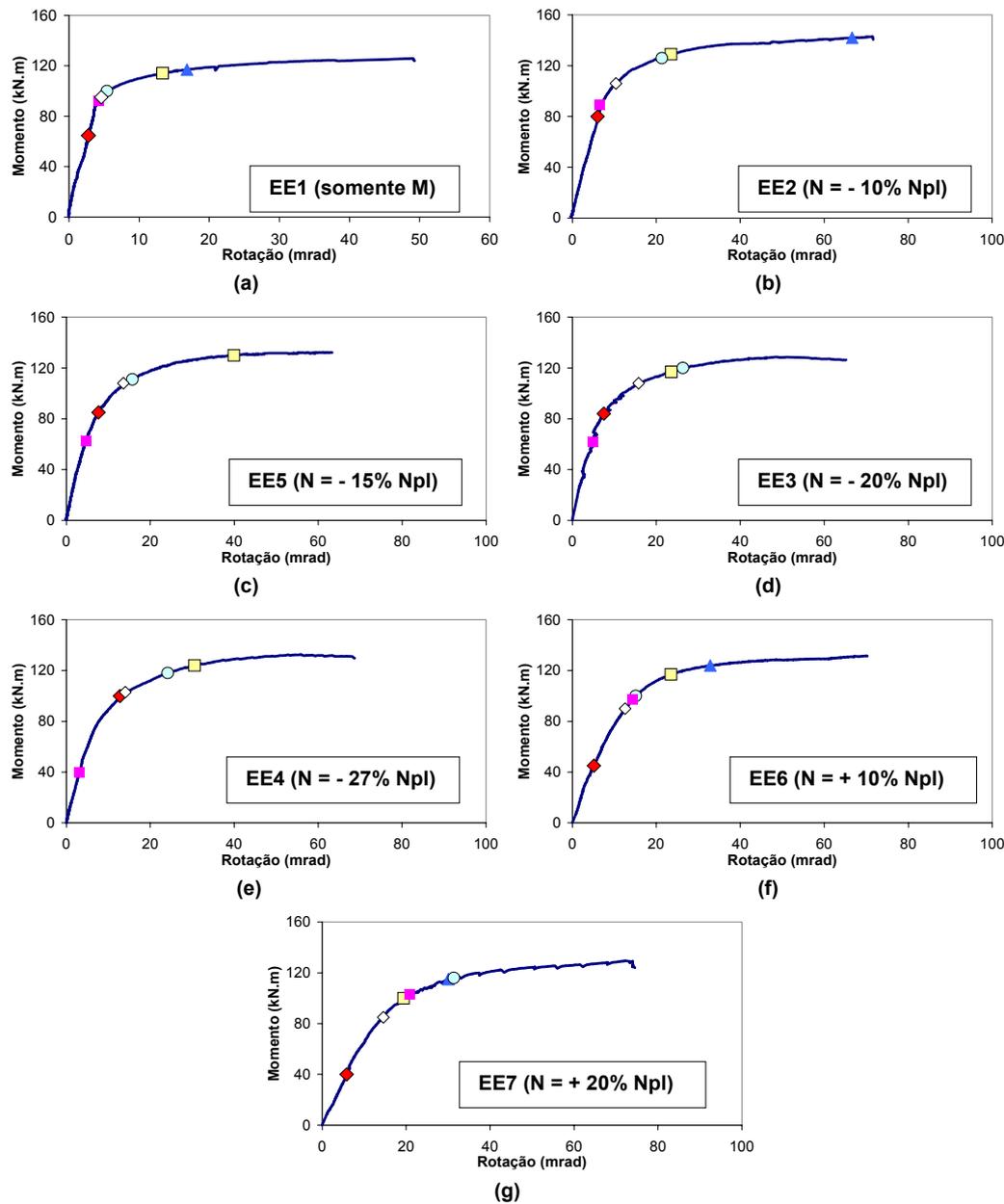


Figura 5.52 – Sequências de escoamento das componentes para cada ensaio