

5 Resultados experimentais

5.1. Introdução

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos dos dois testes experimentais realizados em escala real. Serão mostrados deslocamentos, tensões, momento resistente e curvas momento-rotação para as ligações mistas semirrígidas ensaiadas.

A comparação entre os resultados teóricos e experimentais e a discussão em torno dos resultados serão apresentadas no Capítulo 7.

5.2. Resultados obtidos no primeiro ensaio

Como já foi mostrado no capítulo anterior, no primeiro protótipo foram realizados alguns estágios de carregamento, com o intuito de aperfeiçoar o sistema de ensaio. Os dados obtidos nestas etapas de carregamento foram utilizados para plotagem de dois gráficos gerais representativos destes ciclos: carga aplicada *versus* deslocamento e momento *versus* rotação.

O ensaio final foi realizado no dia 20 de abril de 2015 e a carga aplicada referente à ruína do modelo foi de 136 kN. Interrompeu-se o ensaio quando uma fissura de grande abertura foi observada na linha do conector “*Perfobond*” Pe01. Com os resultados encontrados para a carga última, foram plotados todos os gráficos referentes a deslocamentos e deformações.

A curva momento-rotação da ligação estudada foi obtida indiretamente. O momento foi encontrado através das reações medidas nas células de carga, presentes nos elementos de apoio, multiplicadas pela distância ao centro do pilar. As rotações foram obtidas por meio dos deslocamentos verticais medidos nos transdutores (adotou-se uma relação trigonométrica em um triângulo retângulo, admitindo-se comportamento linear para o deslocamento).

5.2.1. Deslocamentos

Os deslocamentos verticais medidos nos seis transdutores utilizados no Ensaio 1, para o último estágio de aplicação de carga, estão representados no gráfico mostrado na Figura 5.1.

Como foram realizados alguns estágios de carregamento (40, 60, 80 e 128 kN) para o primeiro ensaio, os deslocamentos para cada um destes, referentes ao transdutor T4, estão ilustrados no gráfico da Figura 5.2. Por este gráfico percebe-se que o deslocamento residual final da ligação foi de aproximadamente 48 mm neste ponto. O deslocamento residual medido no laboratório, no ponto central da ligação, foi de 49 mm.

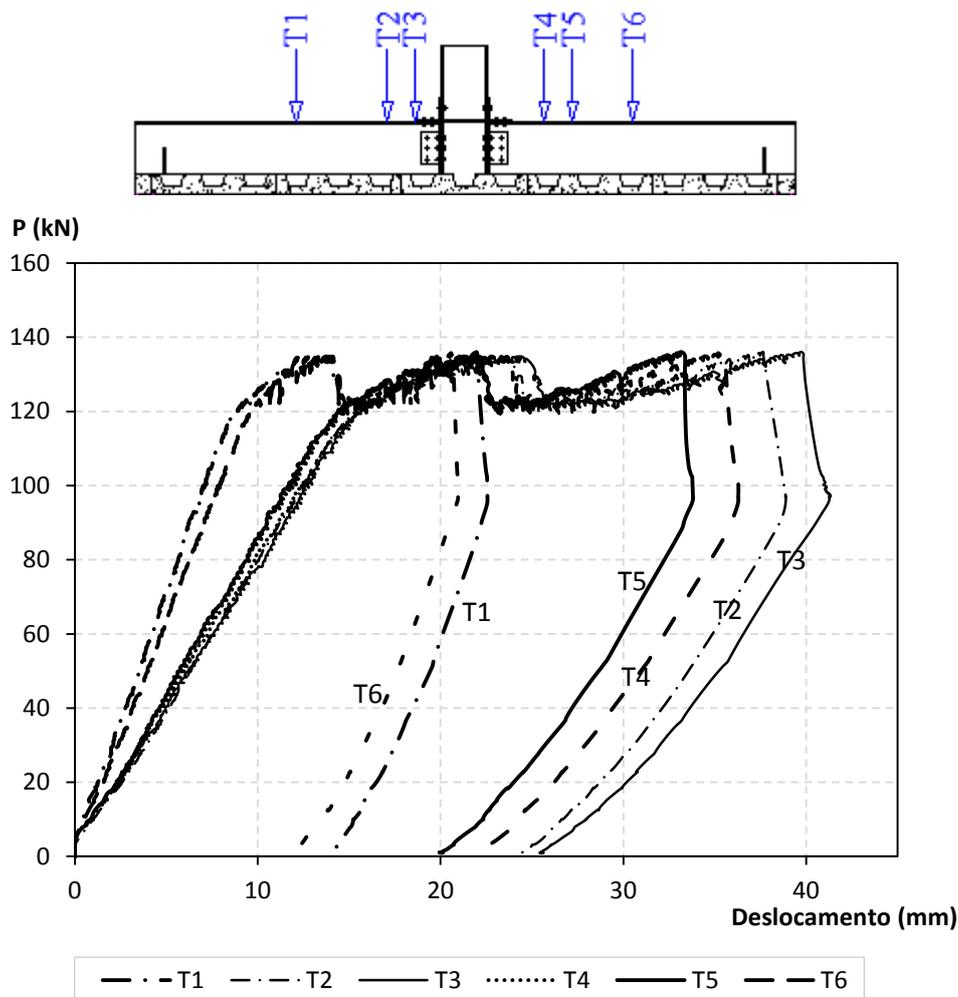
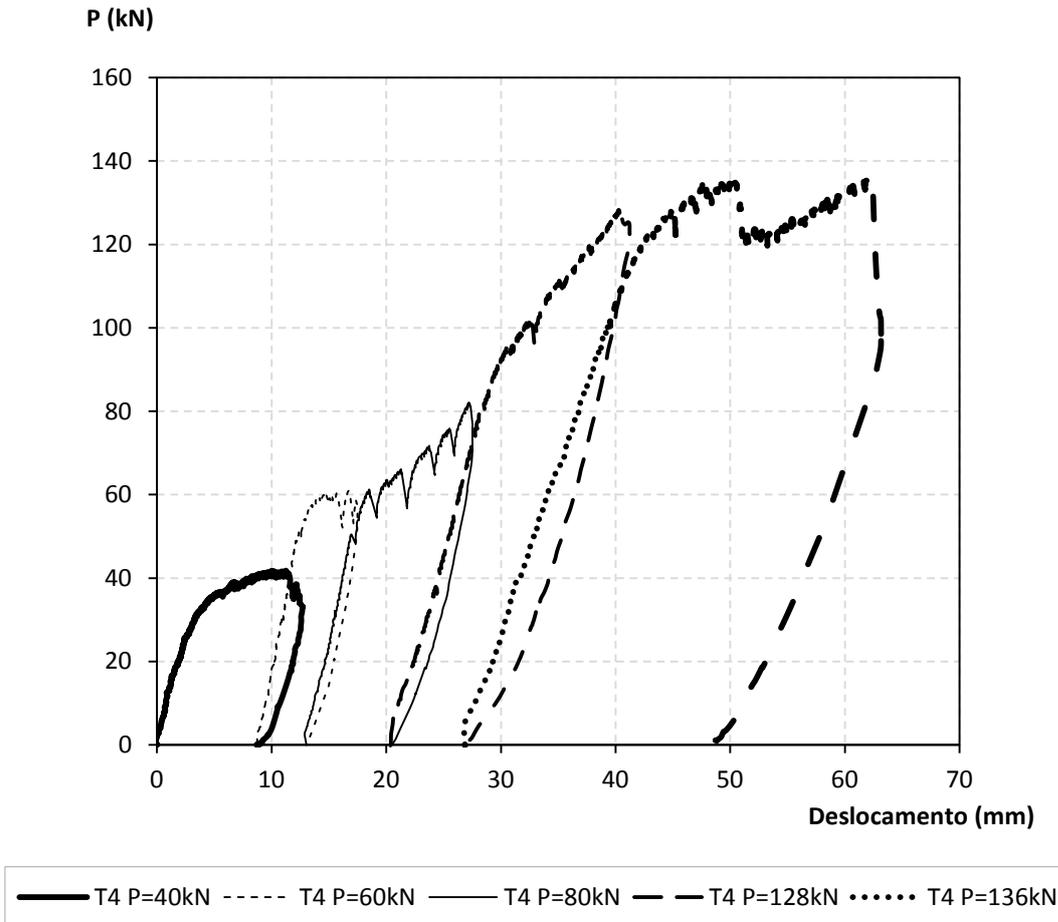


Figura 5.1 - Gráfico “carga aplicada *versus* deslocamento”, para o último estágio de carregamento, dos transdutores pertencentes ao Ensaio 1

Um gráfico com a configuração do deslocamento vertical do modelo experimental para alguns estágios de carga (50, 80, 100 e 140 kN) foi plotado, este é apresentado na Figura 5.3. Ressalta-se que estes deslocamentos verticais são os acumulados nos ciclos de carga, ou seja, os deslocamentos residuais dos estágios anteriores são somados aos dos estágios seguintes.



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312977/CA

Figura 5.2 - Gráfico “carga aplicada *versus* deslocamento” do transdutor 4, referente ao Ensaio 1

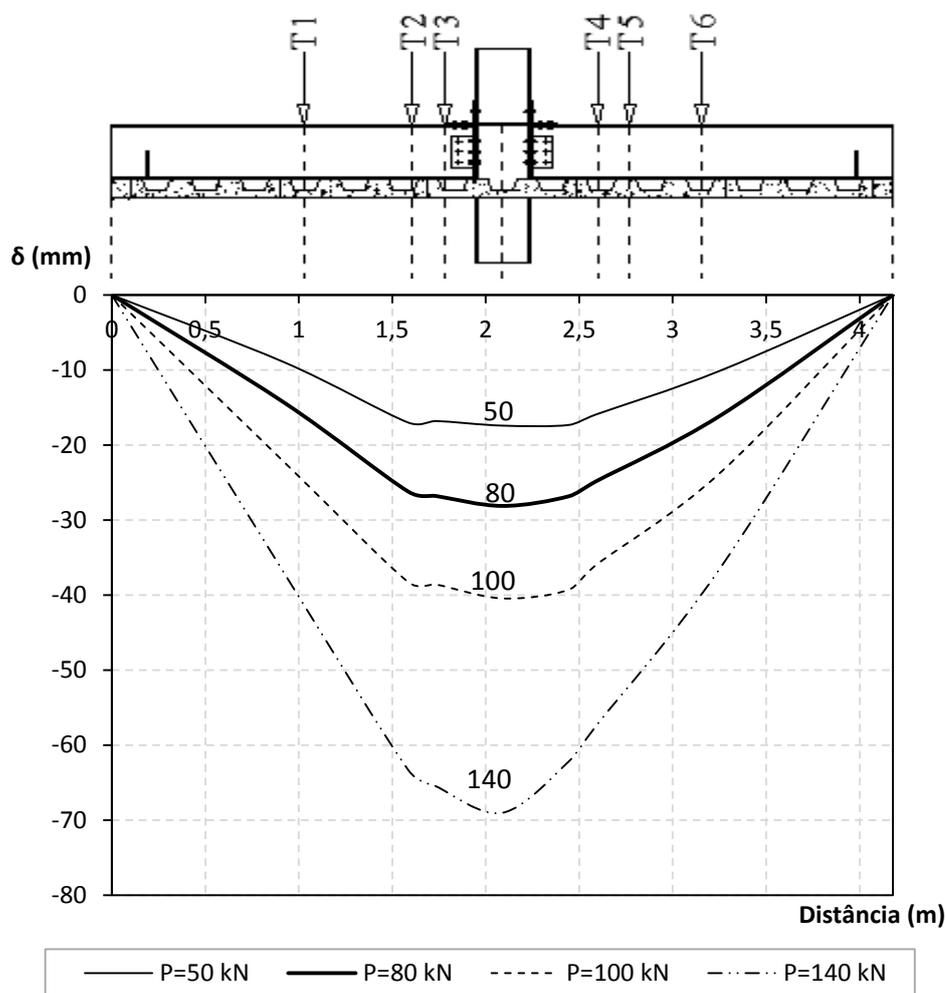


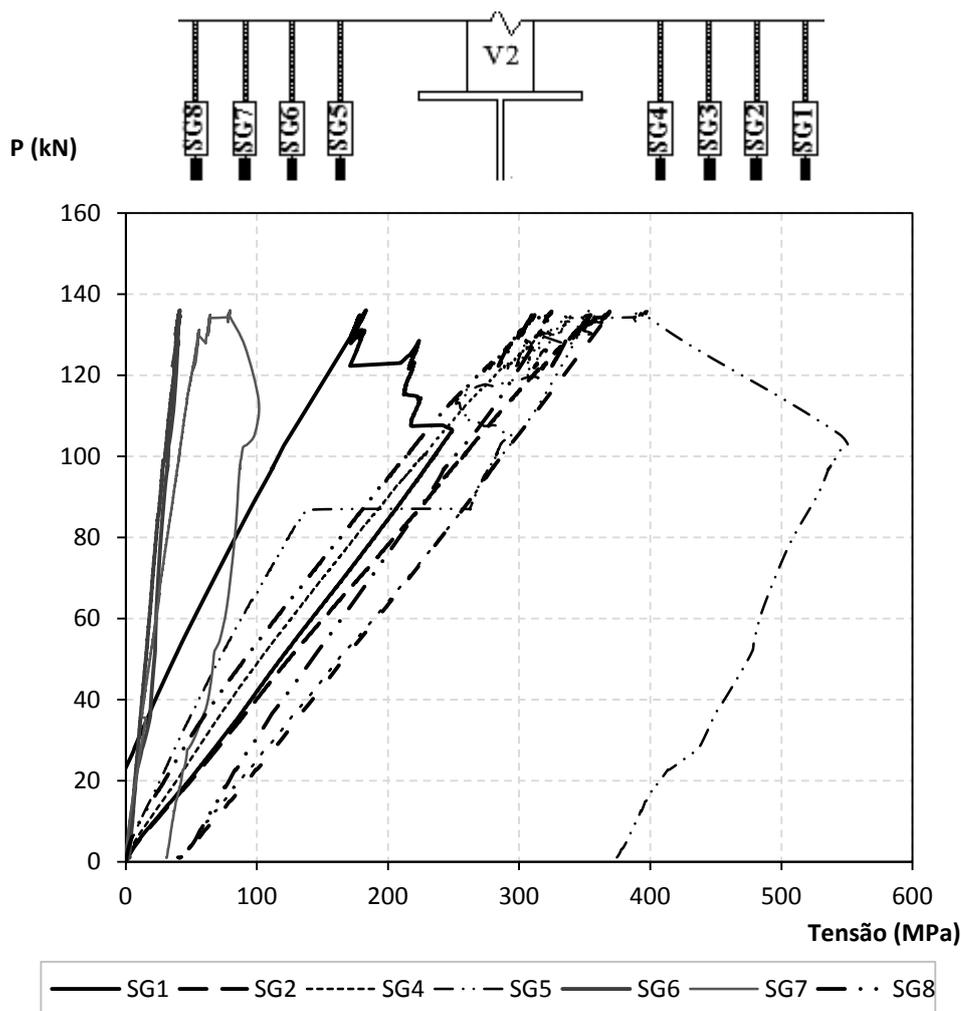
Figura 5.3 - Deslocamento do modelo experimental para algumas cargas do Ensaio 1

5.2.2. Tensões

5.2.2.1. Armadura

Os extensômetros nas armaduras estavam dispostos de acordo com a Figura 4.26 do item 4.8.1.1. No gráfico da Figura 5.4, são apresentadas as tensões das barras de aço pertencentes ao Ensaio 1. As tensões foram calculadas através das deformações (ϵ), obtidas nos extensômetros, multiplicadas pelo módulo de elasticidade teórico do aço, presente na NBR 6118:2014 ($E = 210.000 \text{ MPa}$). Então, pela Lei de Hooke, $\sigma = 210000 \times \epsilon$. A carga “P” é a carga aplicada pelo atuador.

É notória a diferença entre a distribuição de tensões obtidas no ensaio e aquela prevista pela teoria. Por exemplo, o SG 8 registrou uma deformação muito maior que o SG 6 e o esperado é que a tensão decresça conforme a distância da barra de aço ao pilar aumenta. Isto pode ser explicado por assimetrias no modelo ou na aplicação de carga. O extensômetro SG 3 foi perdido no ensaio.



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312977/CA

Figura 5.4 - Gráfico “carga aplicada x tensão” das barras de aço do Ensaio 1

Para uma melhor visualização da distribuição de tensões entre as barras de aço do lado direito e esquerdo do pilar, plotou-se os gráficos separados para cada lado e excluiu-se o descarregamento. Estes gráficos são apresentados na Figura 5.5.

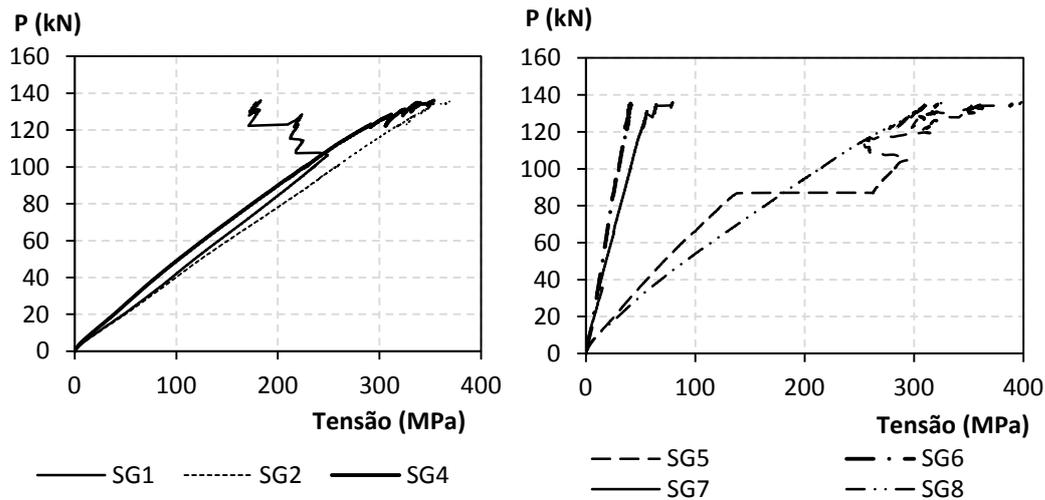


Figura 5.5 - Gráficos “carga aplicada x tensão” para as barras de aço

5.2.2.2.
Vigas e cantoneiras

As tensões obtidas nas vigas e cantoneiras do primeiro ensaio estão apresentadas nos gráficos das Figuras 5.6 a 5.8. Assim como para as barras de aço, as tensões foram calculadas através das deformações (ϵ), obtidas nos extensômetros, multiplicadas pelo módulo de elasticidade teórico do aço, neste caso presente na NBR 8800:2008 ($E = 200.000$ MPa).

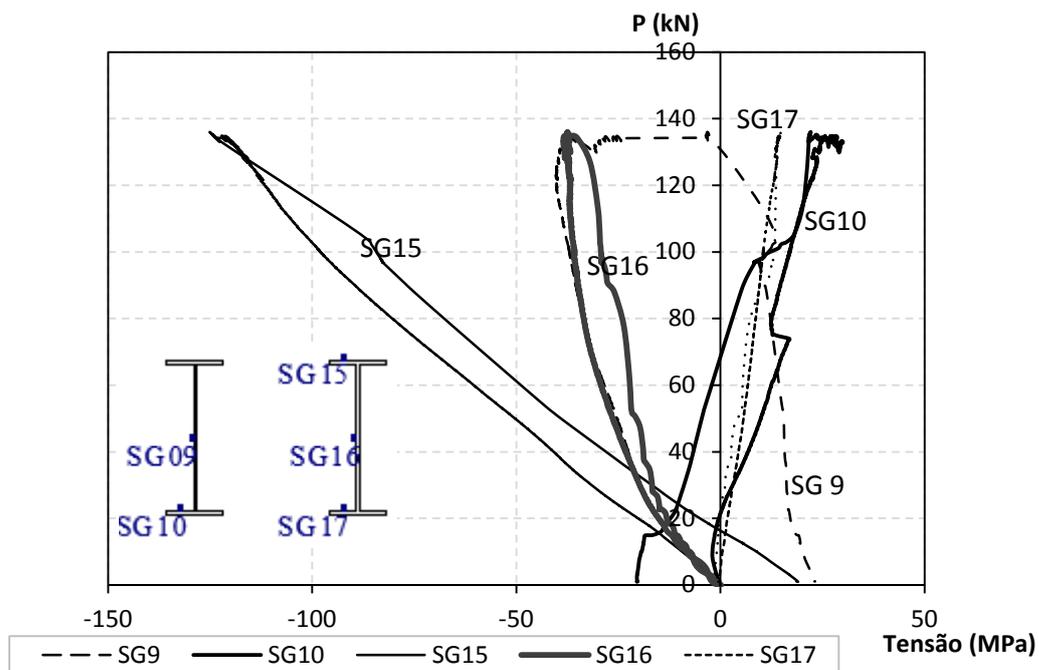


Figura 5.6 - Gráfico “carga aplicada versus tensão” das vigas do Ensaio 1

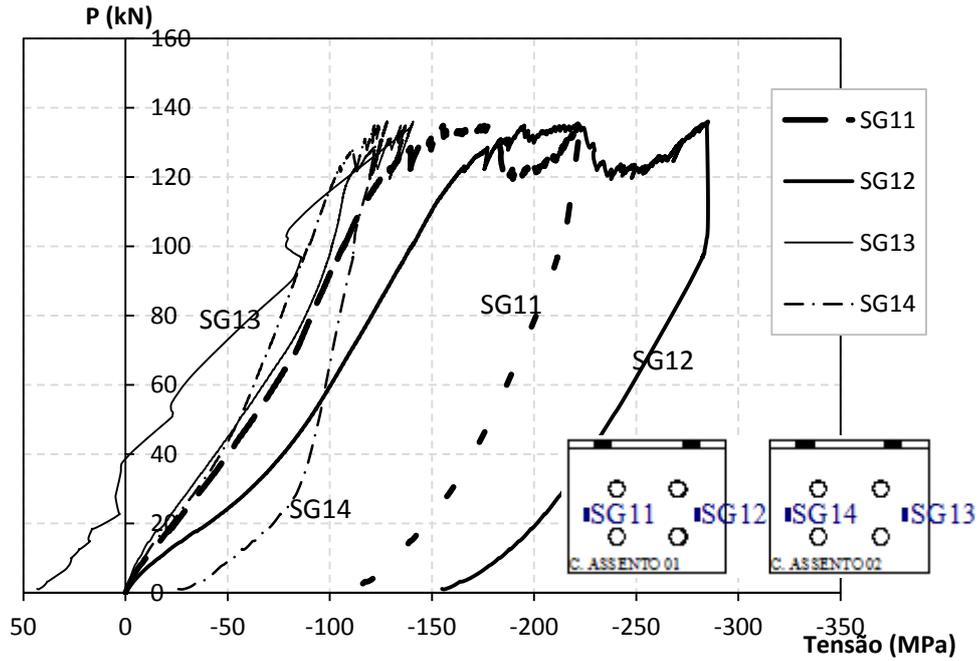


Figura 5.7 - Gráfico “carga aplicada *versus* tensão” das cantoneiras de assento do Ensaio 1

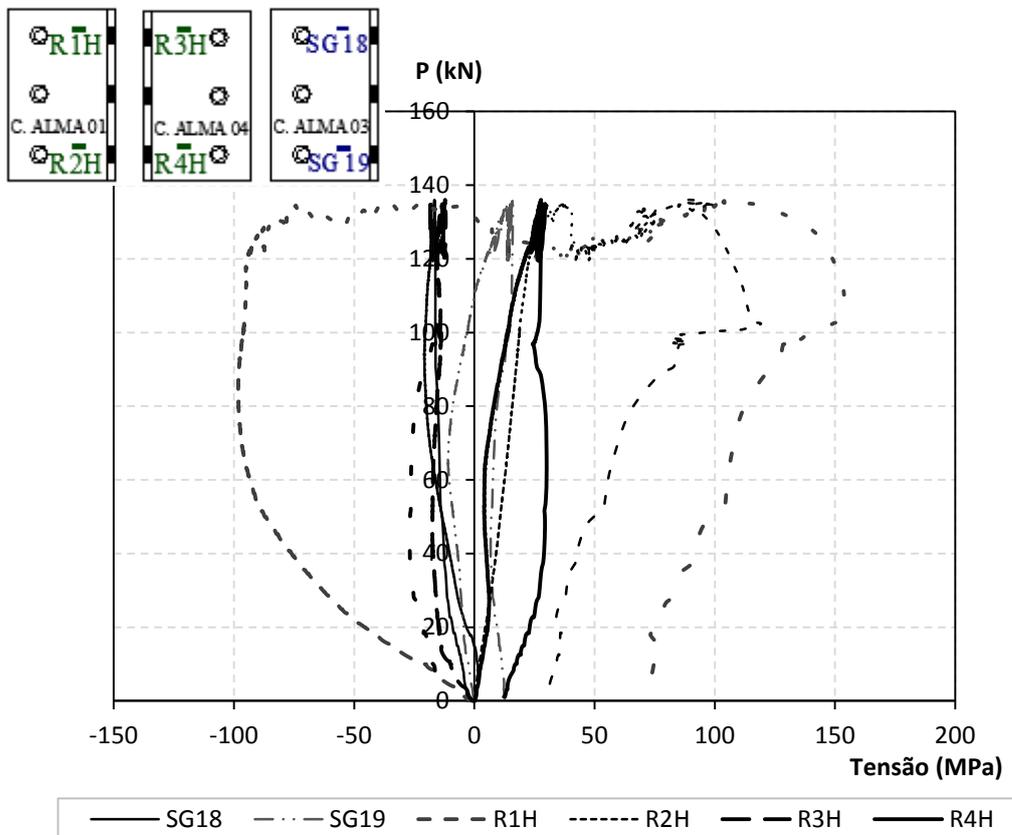


Figura 5.8 - Gráfico “carga aplicada *versus* tensão” das cantoneiras de alma do Ensaio 1 – extensômetros horizontais

Com as tensões obtidas para a carga última do Ensaio 1, determinou-se a posição da linha neutra nas vigas 1 e 2, apresentada na Figura 5.9.

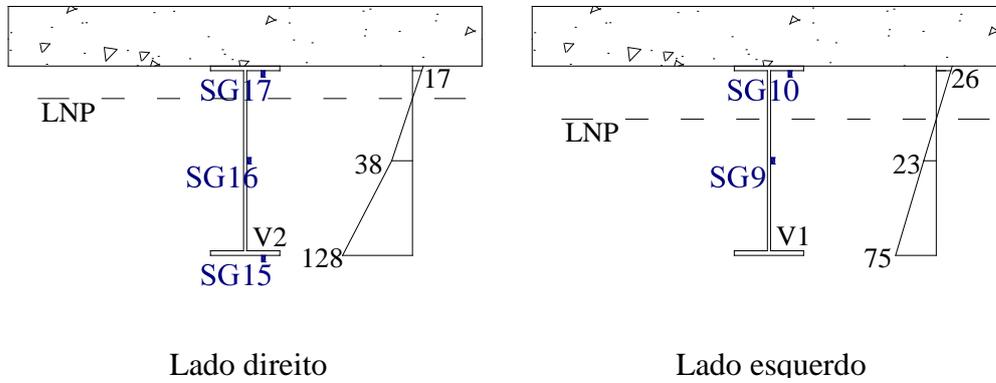


Figura 5.9 - Distribuição de tensões para a carga última nas vigas 1 e 2 do Ensaio 1

O gráfico da Figura 5.10 apresenta a variação da posição da linha neutra, para a viga 2, com o acréscimo de carga durante o primeiro ensaio.

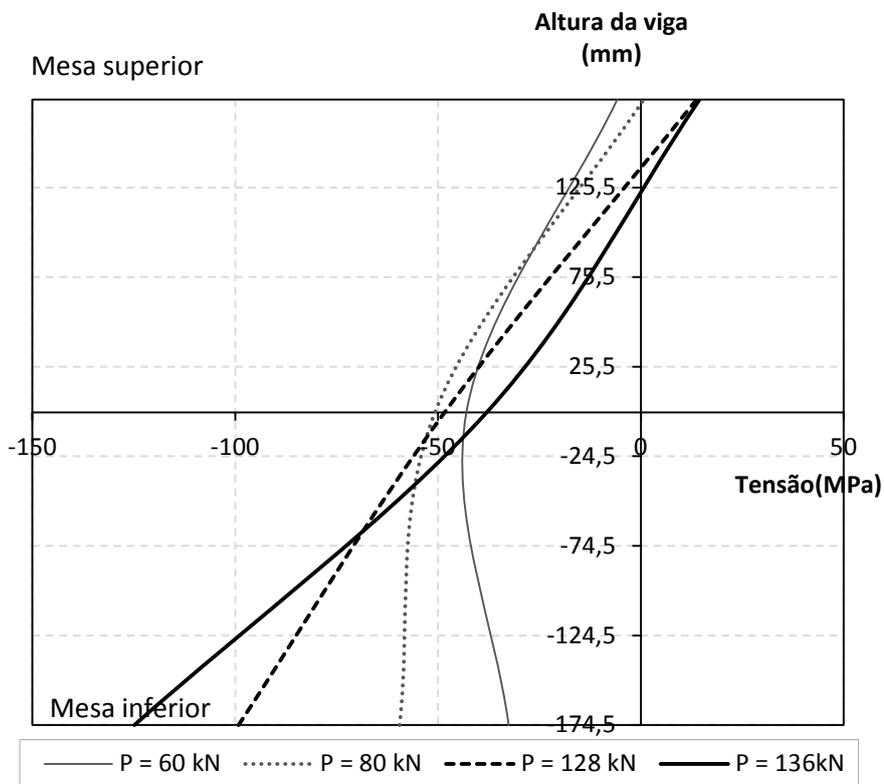


Figura 5.10 - Gráfico “altura da Viga 2 versus tensão” para alguns estágios de carregamento do Ensaio 1

5.2.3. Fissuras na laje

A primeira fissura na laje foi observada na direção transversal quando uma carga de 40 kN foi atingida. Com o aumento de carga esta fissura transversal se prolongou até atingir as extremidades da laje.

Ao se alcançar a carga de 60 kN, foram observadas fissuras na linha do pilar, em ambos os lados da ligação. Com 65 kN de carga aplicada, surgiu uma fissura próxima de onde se encontrava o Pe01 e esta foi determinante para o fim do ensaio, pois com o acréscimo de carga chegou-se a uma abertura elevada.

A Figura 5.11 apresenta as fissuras observadas na laje do primeiro ensaio. Como se pode observar, nem todas as cargas correspondentes às fissuras foram marcadas, uma vez que o ensaio era realizado invertido, preferiu-se não prosseguir com o mapeamento a partir de cargas mais elevadas para garantir a segurança do observador.

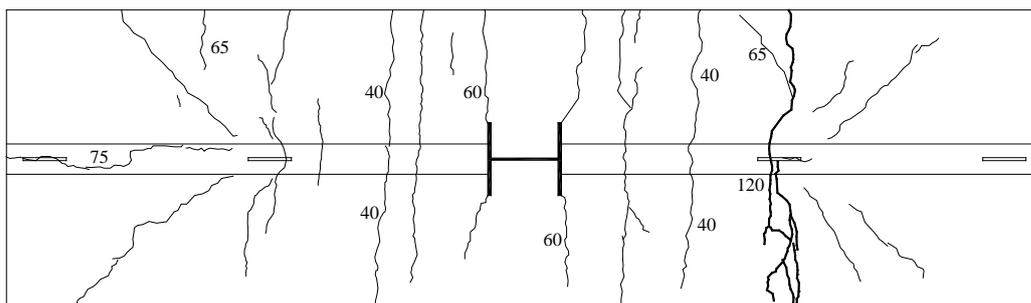


Figura 5.11 - Representação das fissuras na laje do Ensaio 1

As Figuras 5.12 a 5.14 apresentam detalhes das fissuras observadas durante o ensaio.



Figura 5.12 – Detalhe da primeira fissura observada (40 kN) e da fissura na linha do pilar (60kN)

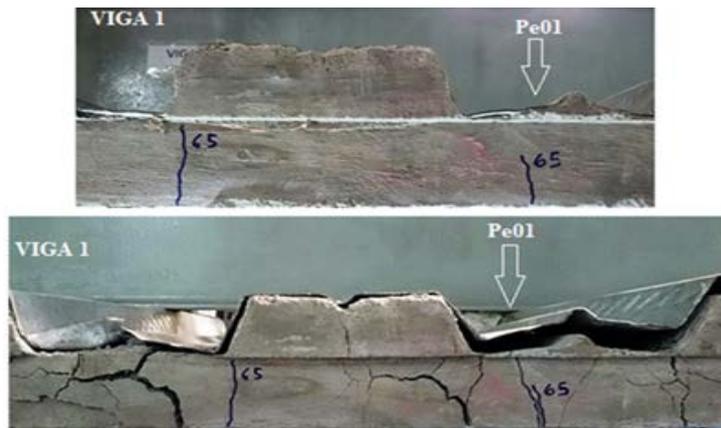


Figura 5.13 - Na foto superior o aparecimento da fissura na linha do Pe01; na foto inferior a mesma região ao término do Ensaio 1.

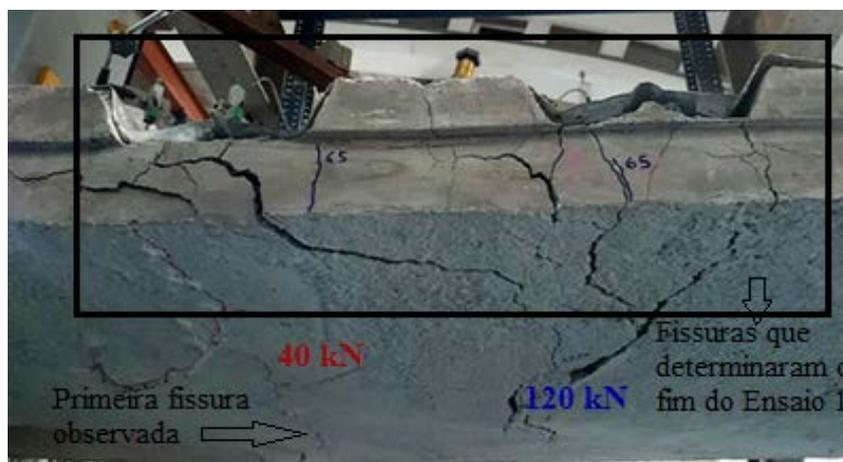


Figura 5.14 - Detalhe das fissuras que limitaram o Ensaio 1

5.2.4. Momento-rotação

Conforme já discutido nos capítulos anteriores, a curva $M-\theta$ é o principal parâmetro para se analisar e classificar uma ligação. Diante disto, uma das discussões cabíveis aqui é o que é adotado como rotação da ligação. Experimentalmente, pode-se medir esta rotação através de inclinômetros posicionados na viga ou por meio da relação entre a diferença de deslocamentos medidos por dois transdutores e a distância horizontal entre eles.

Neste trabalho, a rotação foi assumida igual à rotação da viga em um ponto próximo à ligação, com este objetivo foram posicionados quatro transdutores de deslocamento (T2, T3, T4 e T5), conforme item 4.8.1.2. A Figura 5.15 mostra

como a rotação foi obtida para os ensaios realizados. Observa-se na figura que ao adotar-se a diferença de deslocamentos entre os transdutores, há a simplificação de desconsiderar-se a curvatura da viga.

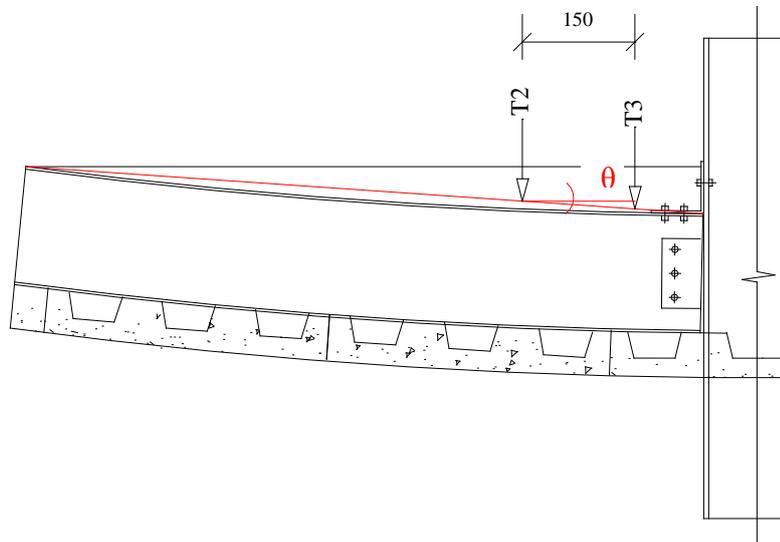


Figura 5.15 - Representação da deformada da viga

O momento fletor resultante na ligação foi calculado a partir das reações nos elementos de apoio, conforme Figura 5.16. Para o cálculo utilizou-se as Equações 5.1 e 5.2.

$$M = R \cdot x \quad (5.1)$$

$$x = L_{\text{viga}} + d_{\text{PILAR}} + 10 - \frac{b_c}{2} \quad (5.2)$$

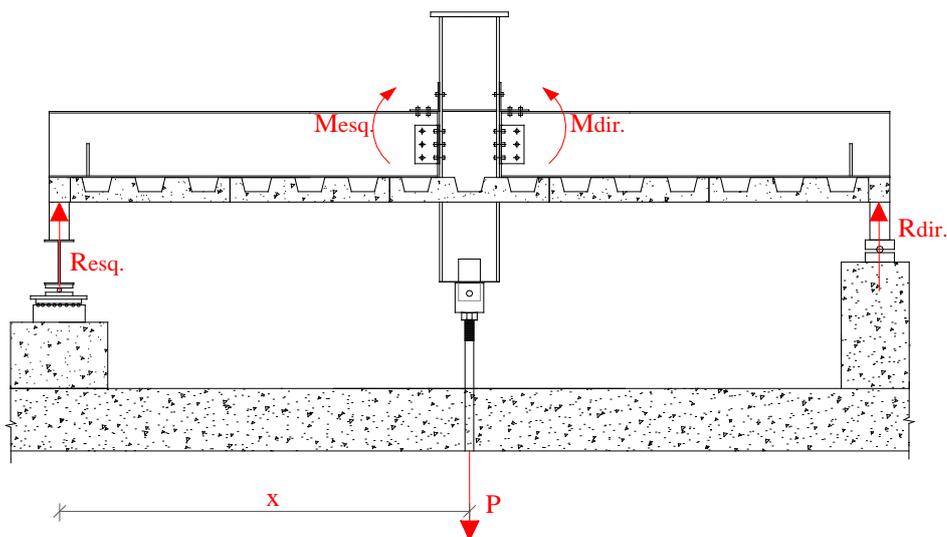
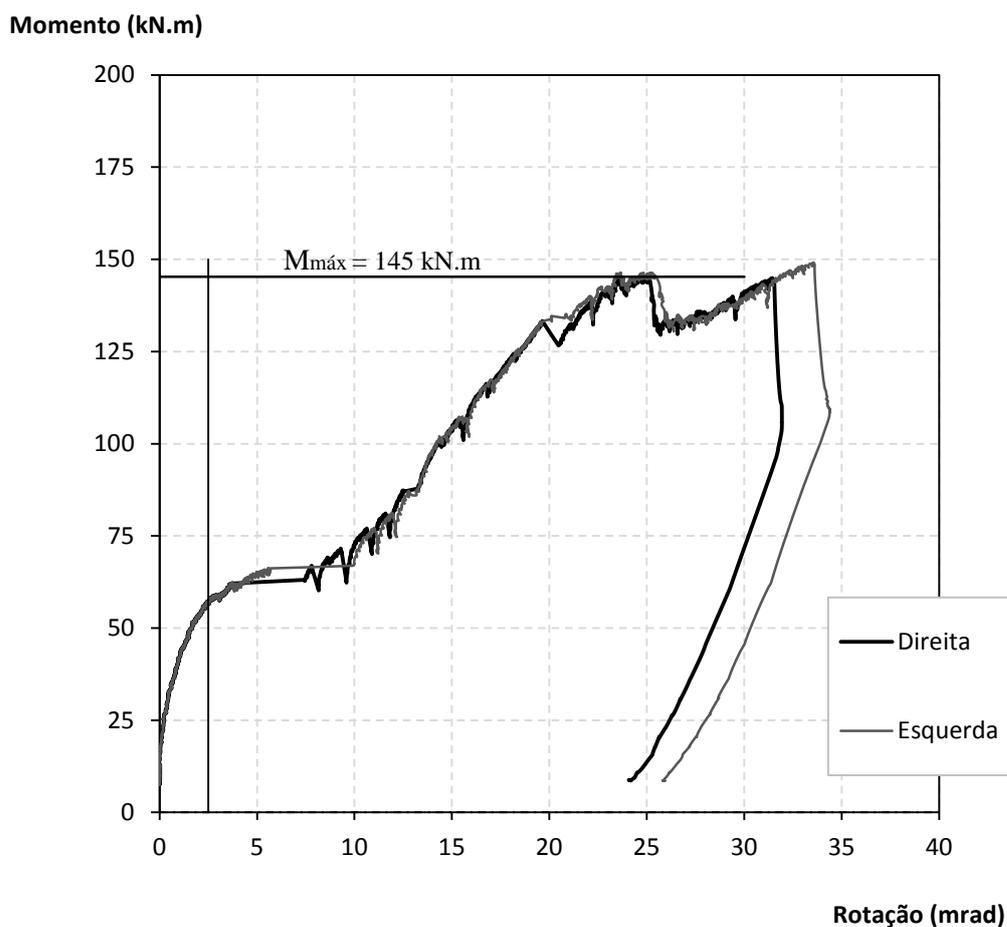


Figura 5.16 - Representação do cálculo do momento na ligação

As curvas momento-rotação, para os lados direito e esquerdo da ligação pertencente ao primeiro ensaio, são mostradas na Figura 5.17. Ao momento fletor encontrado através da Equação 5.1, somou-se o momento equivalente ao peso próprio do modelo. Para se encontrar o momento fletor relativo ao peso próprio de vigas, laje e pilares, foi utilizado um modelo no programa computacional Ftool, o valor obtido segundo este procedimento foi de $M_{PP} = 7,6 \text{ kN.m}$.



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312977/CA

Figura 5.17 - Curvas M- θ para os lados direito e esquerdo da ligação – Ensaio 1

As curvas momento-rotação para alguns estágios de carregamento (60, 80, 128 e 136 kN) do Ensaio 1, relacionados ao lado direito da ligação, estão apresentadas no gráfico da Figura 5.18.

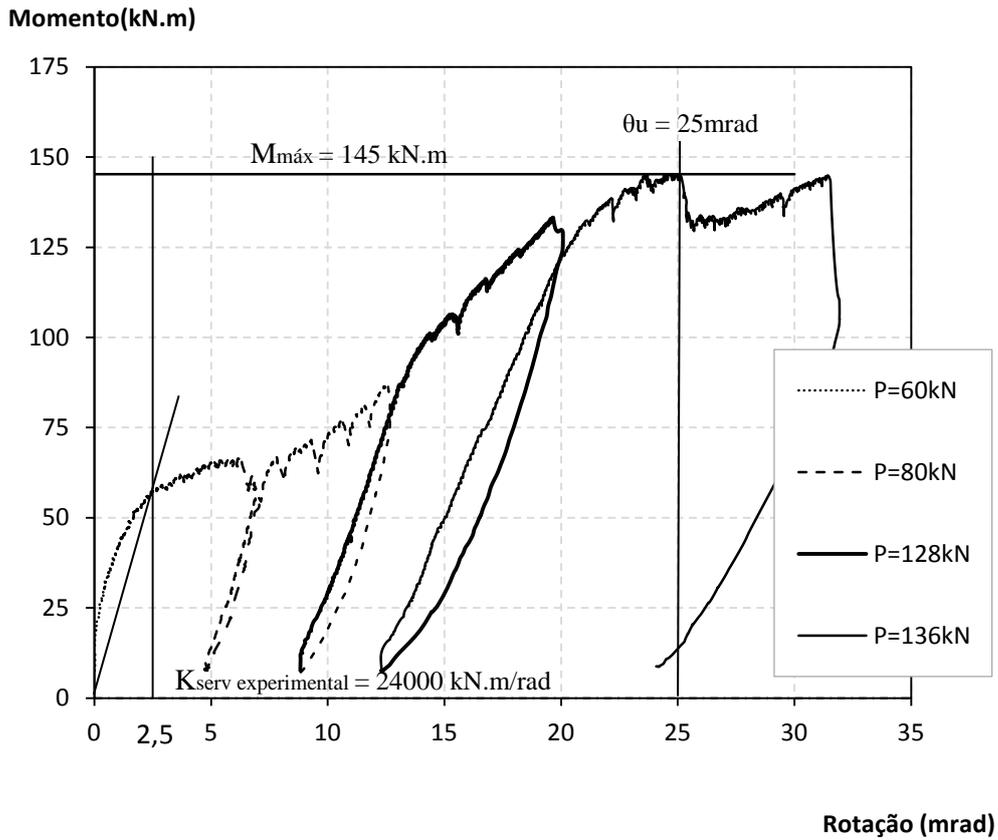


Figura 5.18 - Curvas M- θ para alguns estágios de carregamento do Ensaio 1, lado direito

Alguns detalhes da ligação, observados em laboratório, são mostrados nas fotos presentes nas Figuras 5.19 e 5.20.



Figura 5.19 – Detalhe do modelo ao final do Ensaio 1



Figura 5.20 - Detalhe da rotação da ligação ao final do Ensaio 1

5.3. Resultados obtidos no segundo ensaio

No segundo ensaio foram realizados apenas dois estágios de carregamento, o primeiro até uma carga de 40 kN e no segundo levou-se o modelo até a carga de ruína.

O ensaio final foi realizado no dia 05 de maio de 2015 e a carga máxima aplicada ao modelo foi de 150 kN. O ensaio foi interrompido quando uma fissura de grande abertura apareceu na linha do conector “*Perfobond*” Pe03. Com os resultados encontrados para esta carga, foram plotados todos os gráficos referentes a deslocamentos e tensões.

5.3.1. Deslocamentos

Os deslocamentos verticais, medidos nos seis transdutores de deslocamento utilizados no Ensaio 2, estão representados no gráfico da Figura 5.21. A carga “P” corresponde à carga aplicada pelo atuador.

Pelo gráfico da Figura 5.21, percebe-se que o deslocamento residual final da ligação foi de aproximadamente 75 mm. O deslocamento residual medido em laboratório, no ponto central do modelo, foi de 95 mm.

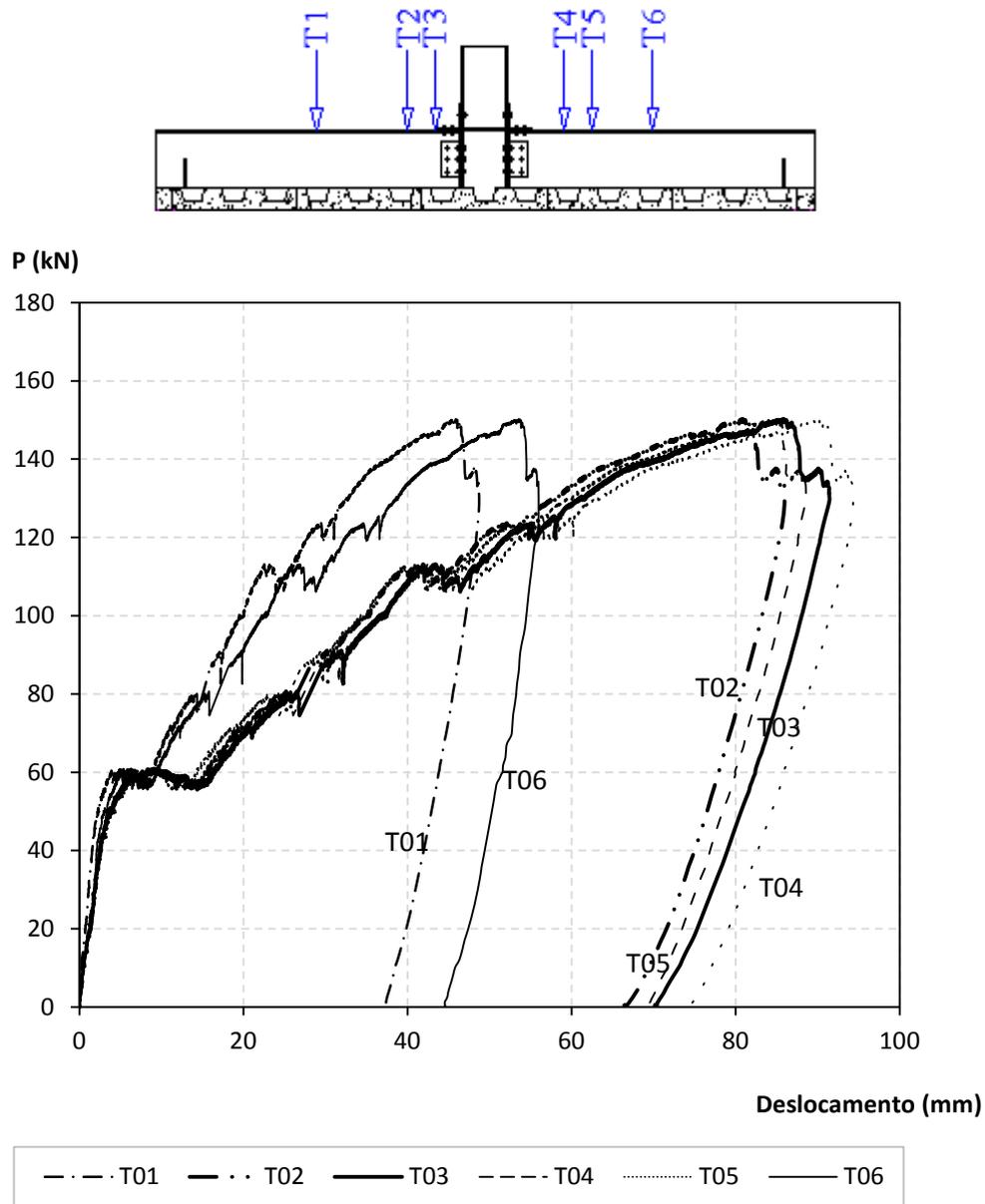
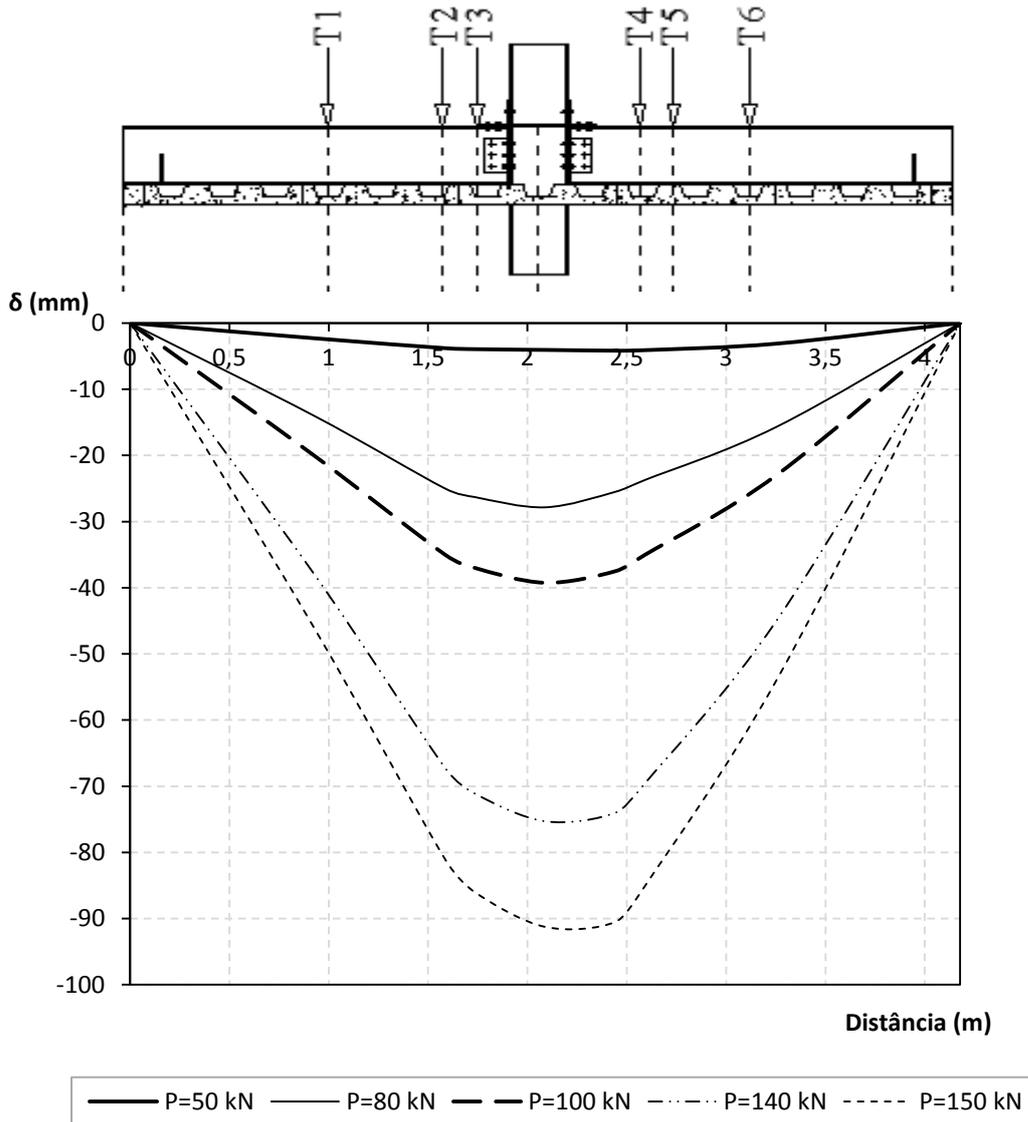


Figura 5.21 - Gráfico “carga aplicada *versus* deslocamento” dos transdutores pertencentes ao Ensaio 2

Um gráfico com a configuração dos deslocamentos verticais do protótipo 2, para alguns estágios de carga (50, 80, 100, 140 e 150 kN), foi plotado e é apresentado na Figura 5.22.



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312977/CA

Figura 5.22 - Deslocamento do modelo experimental para alguns estágios de carga do Ensaio 2

5.3.2. Tensões

5.3.2.1. Armadura

Os extensômetros nas armaduras estavam dispostos de acordo com a Figura 4.26 do item 4.8.1.1. No gráfico da Figura 5.23, são apresentadas as tensões encontradas nas barras de aço pertencentes ao Ensaio 2. Assim como no Ensaio 1, as tensões foram calculadas através das deformações (ϵ), obtidas nos

extensômetros, multiplicadas pelo módulo de elasticidade teórico do aço, presente na NBR 6118:2014. A carga “P” é a carga aplicada no atuador.

Percebe-se que nenhuma das barras atingiu a tensão de escoamento. É notória também a diferença entre a distribuição de tensões no ensaio e a esperada pela teoria, assim como observado no Ensaio 1.

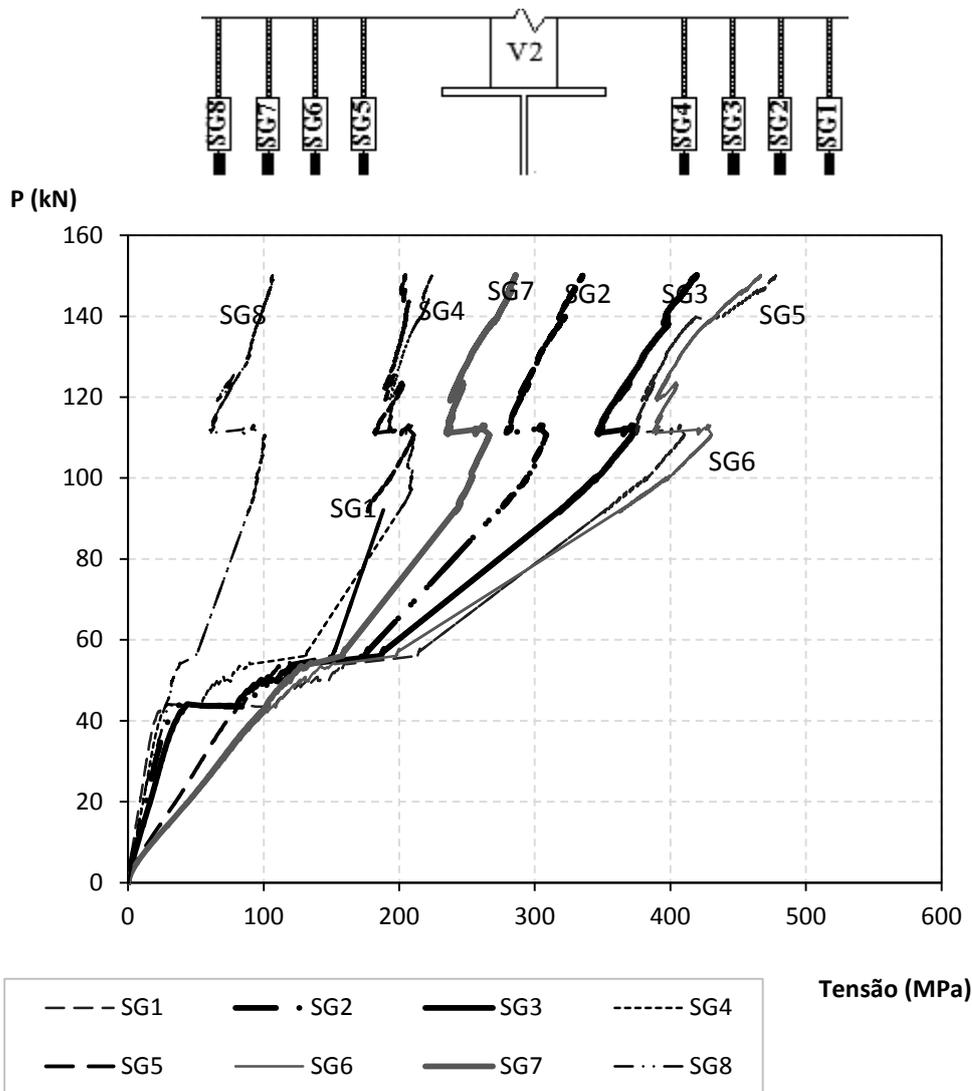


Figura 5.23 - Gráfico “carga aplicada x tensão” das barras de aço do Ensaio 2

Para uma melhor visualização da distribuição de tensões entre as barras de aço do lado direito e esquerdo do pilar, plotou-se os gráficos separados para cada lado, apresentados na Figura 5.24.

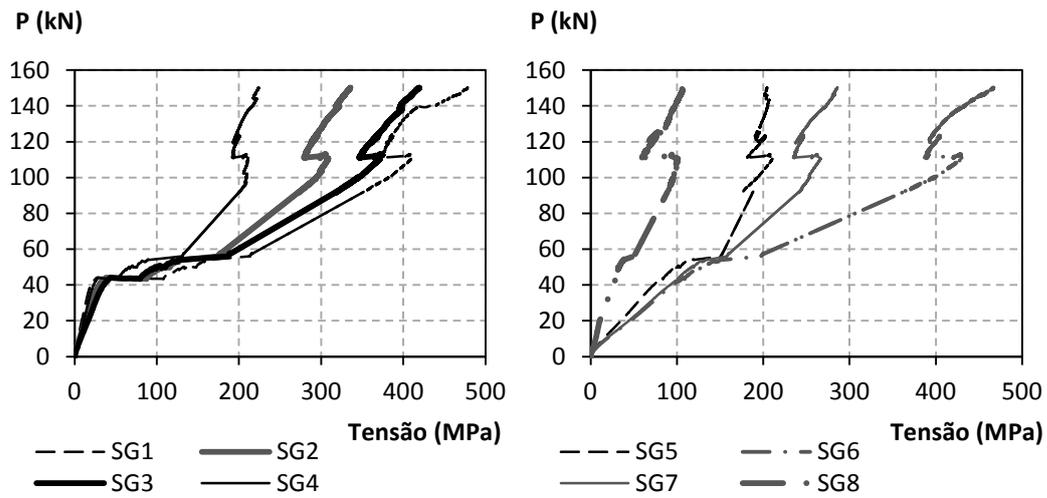


Figura 5.24 - Gráficos “carga aplicada x tensão” para as barras de aço - Ensaio 2

5.3.2.2.
Vigas e cantoneiras

As tensões obtidas nas vigas e cantoneiras, pertencentes ao segundo ensaio, estão apresentadas nos gráficos das Figuras 5.25 a 5.27.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312977/CA

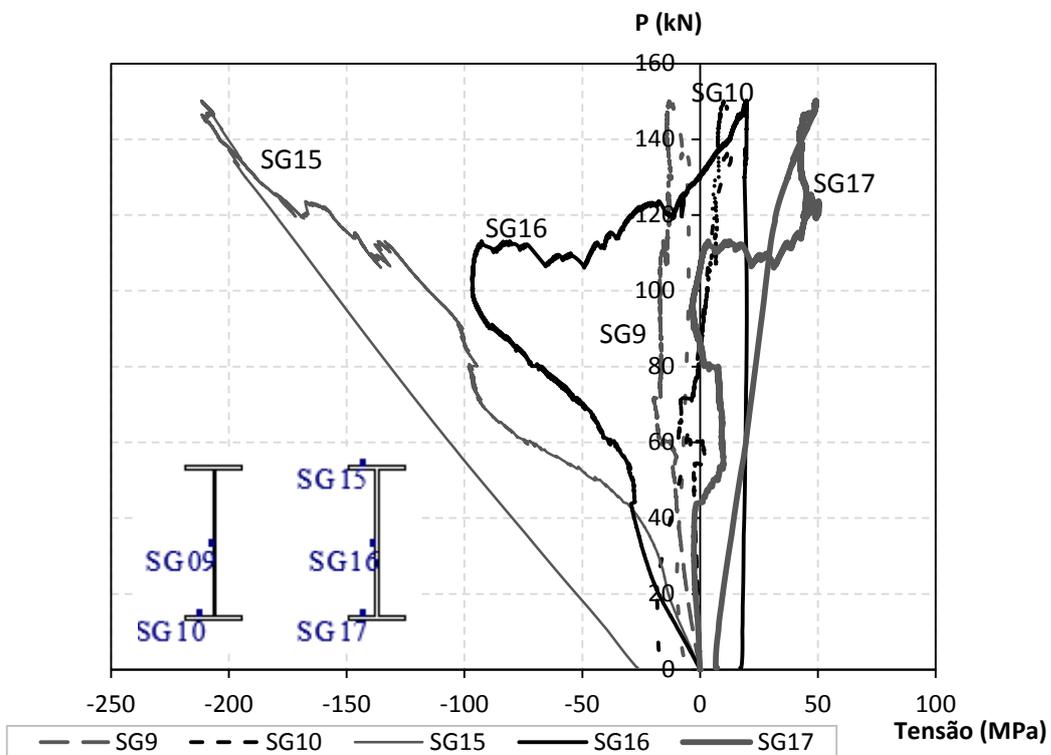


Figura 5.25 - Gráfico “carga aplicada x tensão” das vigas do Ensaio 2

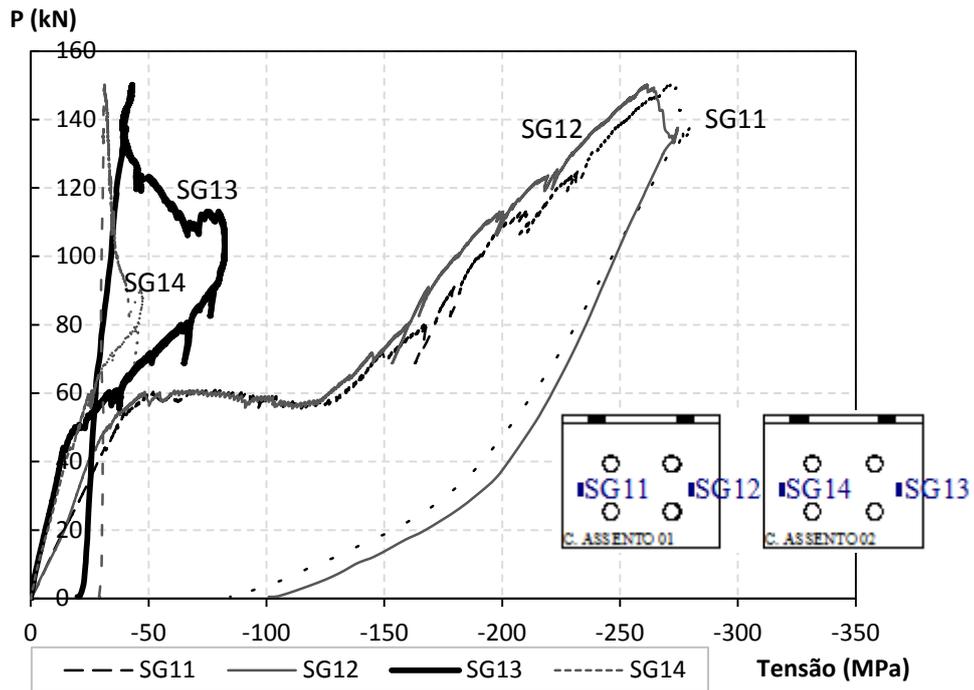


Figura 5.26 – Gráfico “carga aplicada *versus* tensão” das cantoneiras de assento do Ensaio 2

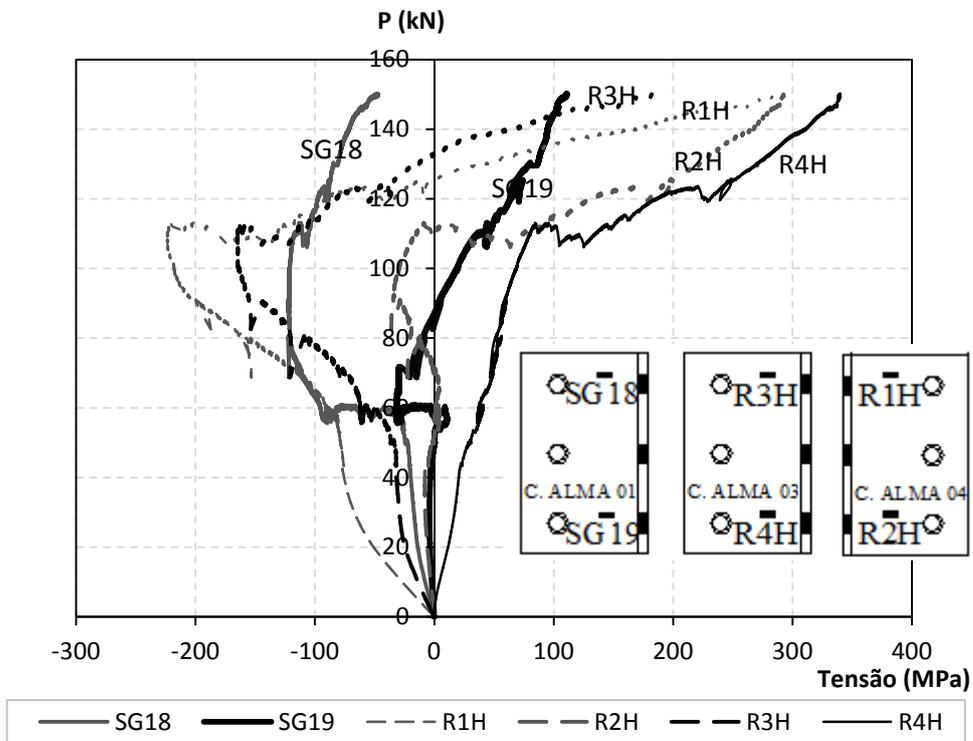


Figura 5.27 - Gráfico “carga aplicada *versus* tensão” das cantoneiras de alma do Ensaio 2 – extensômetros horizontais

5.3.3. Tensões

Com as tensões obtidas para a carga última do Ensaio 2, determinou-se a posição da linha neutra (LN) nas vigas 1 e 2. A “LN”, para os lados direito e esquerdo do segundo ensaio, está mostrada na Figura 5.28.

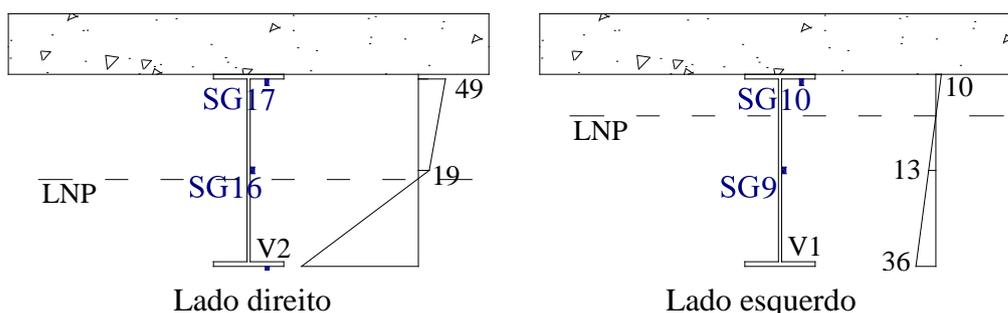


Figura 5.28 - Distribuição de tensões para a carga última nas vigas 1 e 2 do Ensaio 2

5.3.4. Fissuras na laje

A primeira fissura no segundo ensaio foi observada para uma carga aplicada de 35 kN. Com 100 kN de carga aplicada, surgiu uma fissura próxima de onde se encontrava o conector “*Perfobond*” Pe03 e esta foi determinante para o fim do ensaio, pois com o acréscimo de carga chegou-se a uma abertura elevada. Então, assim como ocorrido no Ensaio 1, a fissura observada nas proximidades do “*Perfobond*” mais próximo ao pilar limitou o ensaio.

A Figura 5.29 apresenta as fissuras observadas na laje do segundo ensaio.

As Figuras 5.30 e 5.31 mostram detalhes das fissuras visualizadas durante e após o término do Ensaio 2.

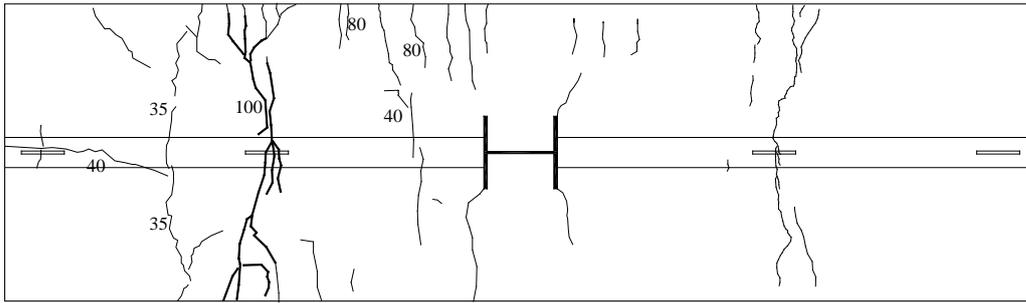


Figura 5.29 - Representação das fissuras na laje do Ensaio 2



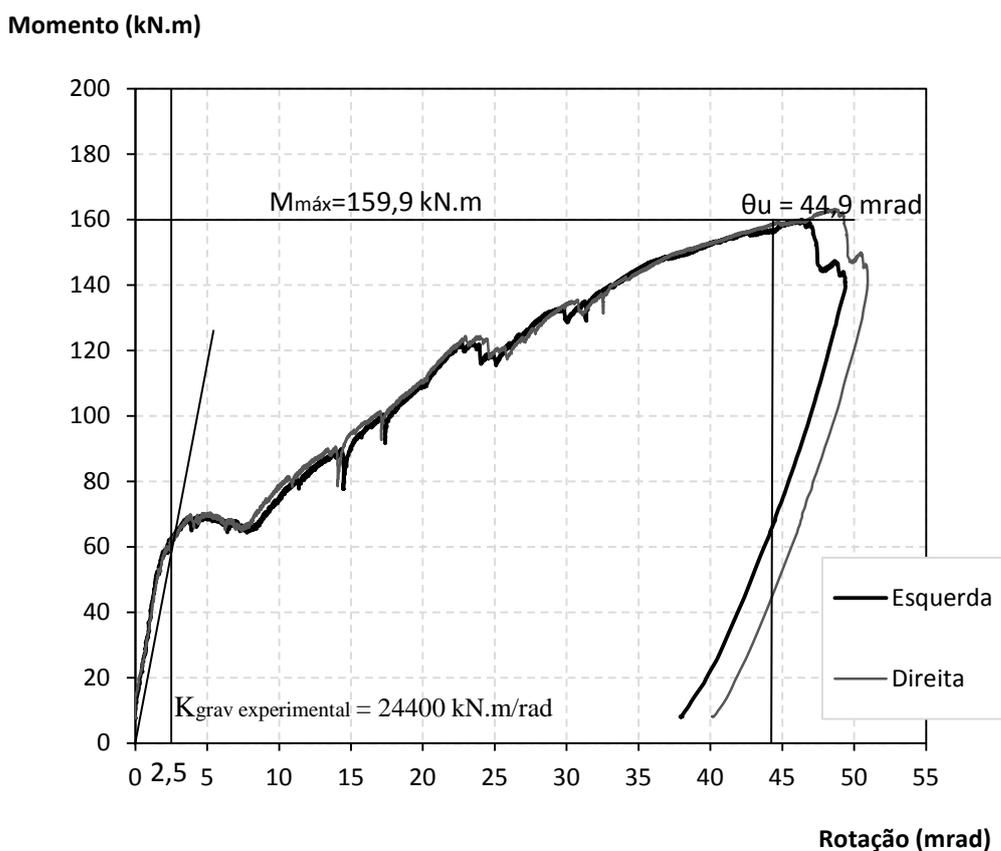
Figura 5.30 - Detalhe da fissura que determinou o final do Ensaio 2



Figura 5.31 - Detalhe das fissuras nas proximidades do pilar do Ensaio 2

5.3.5. Momento-rotação

A curva momento-rotação (obtida igualmente mostrado no item 5.2.4 para o Ensaio 1), referente à carga última do Ensaio 2, está apresentada no gráfico da Figura 5.32. Vale lembrar que, assim como mostrado para o primeiro ensaio, somou-se o momento fletor equivalente ao peso próprio do modelo ao momento fletor encontrado através das reações nas células de carga.



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312977/CA

Figura 5.32 - Curva momento-rotação correspondente ao Ensaio 2

Alguns detalhes da ligação, observados em laboratório, são mostrados nas fotos presentes nas Figuras 5.33 a 5.35.



Figura 5.33 – Detalhe da cantoneira de alma durante o Ensaio 2

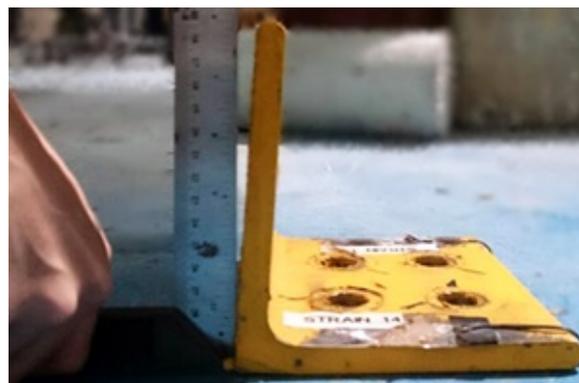


Figura 5.34 - Cantoneira de assento após o término do Ensaio 2



Figura 5.35 - Detalhe da rotação da ligação (Ensaio 2)