4– APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1.Materiais

4.1.1.Concreto

Na moldagem dos espécimes é utilizado concreto dosado no LEM-DEC. Os valores da resistência à compressão, resistência à tração e do módulo de elasticidade do concreto são obtidos por meio de ensaios de corpos-de-prova cilíndricos, com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, de acordo com a NBR 5739/94, NBR 7222/94 e NBR 8522/84 respectivamente. A Figura 4.1 apresenta as fotografias dos ensaios de resistência à tração e do módulo de elasticidade.



(a) Ensaio de resistência à tração.



(b) Ensaio do módulo de elasticidade

Figura 4.1 – Fotografia dos ensaios de: (a) resistência à tração, (b) módulo de elasticidade.

Para se obter o módulo de elasticidade adotou-se o plano de carga 3 da NBR 8522 (1984), que simula a estrutura em seu primeiro carregamento, fornece o módulo de deformação secante, e permite também traçar a curva tensão-deformação específica, Anexo F.

A Figura 4.2 apresenta a seqüência das concretagens dos espécimes PVdxy (duas vigas) e PVdx (uma viga). A Tabela 4.1 mostra os resultados dos ensaios de caracterização do concreto, divididos de acordo com a série, concretagem e betonada. Todos os ensaios são realizados na prensa da marca CONTENCO, com capacidade de 2400 kN.



Figura 4.2 - Seqüência da concretagem: (a) PVxy; (b) PVx.

| | _ | Valores obtidos | | | | | | |
|----------------------|------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--|--|--|
| Concretagem | | Resi | stência | Resistência | Módulo de | | | |
| | | | à | à | elasticidade | | | |
| | | comp | pressão | tração | secante | | | |
| | | (N | 1Pa) | (MPa) | (GPa) | | | |
| | | 28 dias | dia do teste | dia do teste | 28 dias | | | |
| | 1ª Conc. 1ª Bet. | 65,0 | 71,1 | 5,5 | 27,3 | | | |
| 1 ⁸ Sária | 2ª Conc. 1ª Bet. | 27,9 | 30,3 | 3,1 | 17,7 | | | |
| I* Selle | 2ª Conc. 2ª Bet. | 30,7 | 32,7 | 3,3 | 15,7 | | | |
| | 3ª Conc. 1ª Bet. | 73,1 | 79,4 | 5,4 | 30,1 | | | |
| 2ª Série | 1ª Conc. 1ª Bet. | 80,3 | 81,9 | 5,6 | 31,4 | | | |
| | 2ª Conc. 1ª Bet. | 30,7 | 31,7 | 3,8 | 25,6 | | | |
| | 2ª Conc. 2ª Bet. | 33,7 | 33,8 | 3,9 | 20,2 | | | |
| | 3ª Conc. 1ª Bet. | 77,9 | 79,4 | 5,9 | 32,3 | | | |
| 3ª Série | 1ª Conc. 1ª Bet. | 71,0 | 68,9 | 5,7 | 32,4 | | | |
| | 2ª Conc. 1ª Bet. | 29,7 | 32,1 | 3,1 | 19,2 | | | |
| | 3ª Conc. 1ª Bet. | 76,8 | 79,6 | 6,3 | 29,0 | | | |

| Tabela 4.1 – | Resultados do | os ensaios | de caracte | erização do | concreto. |
|--------------|---------------|------------|------------|-------------|-----------|
|--------------|---------------|------------|------------|-------------|-----------|

4.1.2.Aço

Os valores da resistência à tração das barras de aço CA-50 são obtidos por meio de ensaios de duas amostras com 400 mm de comprimento para os diâmetros de 5, 8, 10 e 12.5 mm, de acordo com a NBR 6152/92.

Os ensaios são realizados em um pórtico de reação com um atuador hidráulico da marca ENERPAC, com capacidade de 1600kN, e uma célula de carga da marca KYOWA, com capacidade de 2000kN. A Figura 4.3 apresenta as fotografias das amostras das barras, com exceção do diâmetro de 12.5 mm, e de uma barra após o ensaio.





(a) Amostras das barras.(b) Barra após o ensaio.Figura 4.3 – Fotografias: (a) amostras das barras, (b) barra após o ensaio.

A deformação da barra é medida por meio de um extensômetro elétrico. Com esses dados é traçada a curva tensão-deformação específica (Anexo F) e são determinadas as propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 4.2.

| Propriedades | Diâmetro da barra de aço | | | | | |
|---|--------------------------|--------|---------|---------|--|--|
| mecânicas | 5.0 mm | 8.0 mm | 10.0 mm | 12.5 mm | | |
| Tensão de escoamento (MPa) | 588 | 580 | 621 | 587 | | |
| Tensão de ruptura (MPa) | 661 | 651 | 741 | 725 | | |
| Módulo de elasticidade (GPa) | 193 | 201 | 206 | 197 | | |
| Deformação no início do escoamento (mm/m) | 3,12 | 2,92 | 3,04 | 2,98 | | |

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de caracterização das barras de aço.

4.2.Modo de ruptura

Em todos os espécimes a ruptura ocorre com o esmagamento do concreto (no nó ou fora dele), no lado mais comprimido, após o escoamento das barras da armadura longitudinal do pilar dessa região.

Em todos os espécimes PVx e nos espécimes PVxy-0,5-1 e PVxy-0,5-2, a ruptura ocorre no nó com o destacamento de parte do concreto do recobrimento do pilar superior e/ou inferior ao nó. Nos espécimes PVxy-1,0-1 e PVxy-1,0-2 a ruptura ocorre de forma brusca na região do pilar superior, com o esmagamento do concreto.

A Figura 4.4 apresenta as fotografias de frente e de perfil dos espécimes PI-30 e PI-70. A ruptura do PI-30 está localizada na parte inferior, acima da armadura de reforço da extremidade do pilar.



(a) PI-30. (b) PI-70. Figura 4.4 – Fotografias de frente e de perfil dos espécimes: (a) PI-30, (b) PI-70.

No PI-70 a ruptura ocorre na parte superior do pilar, com o esmagamento do concreto no lado mais comprimido, este espécime apresenta uma superfície de ruptura inclinada que separou o pilar em duas partes. Nos espécimes PVxy-1,0-1 e PVxy-1,0-2 a ruptura ocorre no pilar superior, formando uma superfície de ruptura em forma de cone, conforme visto na (Figura 4.5). Essa ruptura ocorre na seção de concreto dentro do estribo, por esta não suportar o acréscimo de tensão após o lascamento do concreto fora da região do estribo.





Figura 4.5 – Fotografias dos espécimes: (a) PVxy-1,0-2.

Nos espécimes PVxy-0,5-1 e PVxy-0,5-2, com vigas nas duas direções, a ruptura fica restrita ao centro do nó. Para poder observar o nó, retira-se a viga do lado em que ocorreu a ruptura, como visto na Figura 4.6.



Figura 4.6 – Fotografia do espécime PVxy-0,5-1, após a retirada da viga do lado em que o concreto está esmagado.

A Figura 4.7 mostra as fotografias do espécime PVxy-0,5-2 antes e depois da ruptura. Percebe-se que antes da ruptura só há fissuras de flexão na viga e que na ruptura surgem novas fissuras na parte inferior da viga, devido ao escoamento da armadura longitudinal do pilar e do esmagamento do concreto no nó dessa região, além do destacamento do concreto do pilar abaixo do nó.



Figura 4.7 – Fotografia do espécime PVxy-0,5-2 antes e depois da ruptura.

A Figura 4.8 apresenta as fotografias dos espécimes com viga em uma direção após a ruptura. Observa-se que a ruptura do PVx-0,5-1 ocorre na parte do nó onde a armadura está tracionada, enquanto nos demais casos a ruptura é no centro do nó.

Os espécimes PVx-0,5-2 e PVx-1,0-2 apresentam fissuras que iniciam na armadura tracionada da viga e seguem em direção da armadura longitudinal do pilar até atingir a parte onde o concreto do nó está comprimido. Nos espécimes PVx-1,6-2 e PVx-2,5-2 há uma fissura na região superior do nó que delimita a área de concreto confinado e forma um semicírculo abaixo do pilar superior. Abaixo dessa região o concreto do nó está esmagado.



(a) PVx-0,5-1

(b) PVx-1,0-1



(c) PVx-1,6-1



(d) PVx-2,5-1



(e) PVx-0,5-2



(f) PVx-1,0-2





78

A Tabela 4.3 apresenta as fissuras nos espécimes e as cargas aplicadas no pilar superior e em cada viga relacionadas a tais fissuras. Em geral, as fissuras começam a surgir com a aplicação da carga na viga, enquanto a carga no pilar é mantida constante. Estas fissuras progridem e por vezes surgem novas fissuras ao longo da viga e no nó enquanto a carga no pilar superior é aplicada, e enquanto a carga na viga é mantida constante. As fissuras na interface viga-pilar surgem quando o espécime está próximo de romper.

| Fissuras | Dados | PVx-0,5-2 | PVx-1,0-1 | PVx-1,0-2 | PVx-1,6-1 | PVx-1,6-2 | PVx-2,5-1 | PVx-2,5-2 | PVxy-0,5-1 | PVxy-0,5-2 | PVxy-1,0-1 | PVxy-1,0-2 |
|-----------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| | F _{pilar} (kN) | 200 | 200 | 200 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 350 | 300 |
| 1 ^a | F _{viga} (kN) | 10 | 25 | 25 | 13 | 6 | 55 | 18 | 10 | 12 | 25 | 25 |
| | Região | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V |
| | F _{pilar} (kN) | 200 | 275 | 200 | — | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 500 | 300 |
| 2 ^a | F _{viga} (kN) | 15 | 25 | 30 | _ | 28 | 84 | 26 | 13 | 14 | 25 | 30 |
| | Região | V | V | V | _ | V | V | V | V | V | V | V |
| | F _{pilar} (kN) | 200 | 375 | 200 | _ | 300 | 300 | 300 | 350 | 300 | 550 | 300 |
| 3 ^a | F _{viga} (kN) | 20 | 25 | 37 | — | 32 | 100 | 45 | 13 | 16 | 25 | 35 |
| | Região | V | V | V | - | V | V | V | V | V | V | V |
| | F _{pilar} (kN) | 200 | 450 | 200 | _ | 300 | 300 | 300 | 400 | 300 | 600 | 300 |
| 4 ^a | F _{viga} (kN) | 25 | 25 | 40 | - | 40 | 104 | 55 | 13 | 20 | 25 | 37 |
| | Região | V/N | IF | V | - | V | V | V | V | V | V | V |
| | F _{pilar} (kN) | 300 | 500 | 350 | _ | 300 | 400 | 300 | _ | 900 | 800 | 450 |
| 5 ^a | F _{viga} (kN) | 26 | 25 | 40 | - | 42 | 100 | 70 | - | 27 | 25 | 37 |
| | Região | V/N | IF | V | _ | V | V | V | _ | IF | V | V |
| | F _{pilar} (kN) | 350 | 700 | 400 | - | 300 | 474 | 300 | - | - | 850 | 650 |
| 6 ^a | F _{viga} (kN) | 26 | 25 | 40 | _ | 44 | 100 | 79 | _ | _ | 25 | 37 |
| | Região | IF | IF | IF | _ | V | V | V | _ | _ | V | IF |
| | F _{pilar} (kN) | 370 | _ | 500 | _ | 300 | _ | 300 | _ | _ | _ | 700 |
| 7 ^a | F _{viga} (kN) | 26 | _ | 40 | _ | 50 | _ | 95 | _ | _ | _ | 37 |
| | Região | Ν | - | V | - | V | - | V | - | - | - | V |
| | F _{pilar} (kN) | 490 | - | 600 | - | 300 | - | 300 | - | - | - | 800 |
| 8 ^a | F _{viga} (kN) | 26 | _ | 40 | _ | 62 | _ | 100 | _ | _ | _ | 37 |
| - | Região | Ν | _ | IF | _ | V | _ | V | _ | _ | _ | V |
| | F _{pilar} (kN) | 600 | _ | _ | _ | 300 | _ | 300 | _ | _ | _ | _ |
| 9ª _ | F _{viga} (kN) | 26 | _ | _ | _ | 64 | _ | 105 | _ | _ | _ | _ |
| | Região | Ν | _ | _ | _ | V | _ | V | _ | _ | _ | _ |
| 10 ^a | F _{pilar} (kN) | _ | _ | _ | _ | 300 | _ | 300 | _ | _ | _ | _ |
| | F _{viga} (kN) | _ | _ | _ | _ | 66 | _ | 115 | _ | _ | _ | _ |
| | Região | _ | _ | _ | _ | V | _ | V | _ | _ | _ | _ |
| 11 ^a | F _{pilar} (kN) | _ | _ | _ | _ | 300 | _ | 300 | _ | _ | _ | _ |
| | F _{viga} (kN) | _ | _ | _ | _ | 70 | _ | 125 | _ | _ | _ | - |
| | Região | _ | _ | _ | _ | V | _ | IF | _ | _ | _ | _ |

Tabela 4.3 – Fissuras nos espécimes e suas respectivas cargas no pilar e na viga.

IF – Fissura surgida na região de interface entre a viga e o pilar.

N – Fissura surgida no nó.

V – Fissura surgida na região da viga.

4.3.Carga de ruptura

A Tabela 4.4 apresenta o valor da resistência à compressão do concreto nos elementos constituintes dos espécimes (pilar superior, viga e pilar inferior), juntamente com as cargas atuantes no pilar (superior e inferior) e na viga, no momento da ruptura, e o modo de ruptura. A alternativa de adotar a carga de ruptura igual à carga suportada pelo pilar inferior é a mais conservadora, visto que este é o pilar menos carregado. Porém, a carga aplicada no pilar superior é adotada como de ruptura, pois se considera que a carga da viga atua no nó.

Nenhum dos espécimes com viga em uma direção apresenta carga de ruptura F_{u,pil.sup} inferior ao PI-30 e nem superior à obtida pelo espécime PI-70. Somente os espécimes PVxy-1,0-1 e PVxy-1,0-2 apresentam esta carga superior ou próxima da apresentada pelo PI-70, respectivamente.

| Espécime | f _{c,pil. sup.} (MPa) | f _{c,viga} (MPa) | f _{c,pil. inf.} (MPa) | F _{u,pil.sup} (kN) | F _{u,viga} (kN) | F _{u,pil.inf.} (kN) | Modo de ruptura |
|------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------|
| PI-30 | 32,7 | _ | 32,7 | 668,5 | - | _ | Rupt. no pilar |
| PI-70 | 79,4 | - | 79,4 | 1292,2 | - | _ | Rupt. no pilar |
| PVx-0,5-1 | 71,1 | 32,7 | 79,4 | 780,8 | 17,68x 2 | 745,4 | Ruptura no nó |
| PVx-0,5-2 | 71,1 | 32,7 | 79,4 | 792,5 | 26,63 x 2 | 739,2 | Ruptura no nó |
| PVx-1,0-1 | 79,4 | 33,8 | 81,9 | 868,1 | 25,67 x 2 | 816,8 | Ruptura no nó |
| PVx-1,0-2 | 79,4 | 33,8 | 81,9 | 937,8 | 40,17 x 2 | 857,5 | Ruptura no nó |
| PVx-1,6-1 | 79,6 | 32,1 | 68,9 | 740,3 | 46,17 x 2 | 648,0 | Ruptura no nó |
| PVx-1,6-2 | 79,6 | 32,1 | 68,9 | 824,6 | 87,33 x 2 | 649,9 | Ruptura no nó |
| PVx-2,5-1 | 79,6 | 32,1 | 68,9 | 830,2 | 68,32 x 2 | 693,6 | Ruptura no nó |
| PVx-2,5-2 | 79,6 | 32,1 | 68,9 | 821,5 | 153,22 x 2 | 515,1 | Ruptura no nó |
| PVxy-0,5-1 | 71,1 | 30,3 | 79,4 | 1032,0 | 13,68 x 4 | 977,3 | Ruptura no nó |
| PVxy-0,5-2 | 71,1 | 30,3 | 79,4 | 1014,6 | 27,13 x 4 | 906,1 | Ruptura no nó |
| PVxy-1,0-1 | 81,9 | 31,7 | 79,4 | 1408,5 | 25,56x4 | 1306,3 | Rupt. pilar sup. |
| PVxy-1,0-2 | 81,9 | 31,7 | 79,4 | 1093,1 | 38,26 x 4 | 940,1 | Rupt. pilar sup. |

Tabela 4.4 – Carga e modo de ruptura.

Aumentando-se o número de lados confinados por vigas a carga de ruptura teve um aumento que variou de 17 a 62%. O aumento da quantidade da armadura de flexão da viga resulta em um aumento na carga de ruptura dos espécimes PVxy de 36% e 8% quando a deformação inicial é de 1 mm/m e 2 mm/m, respectivamente. Nos espécimes PVx não há um comportamento bem definido quanto a influência dos parâmetros estudados.

4.4.Deformação

4.4.1.Concreto

Na Figura 4.9 são apresentadas as curvas força-deformação do concreto e a distribuição dessas deformações numa seção dos espécimes PI-30 e PI-70. A seção analisada fica a meia altura do pilar onde existe um extensômetro SG-01 na face do pilar onde a carga excêntrica é aplicada e um extensômetro SG-02 na face oposta, a reta formada por estes dois valores é ilustrativa e pode não condizer com a deformação na armadura longitudinal do pilar. A excentricidade inicial da carga aplicada no pilar é de 15 mm.

No espécime PI-30 o SG-02 apresenta deformação maior do que o SG-01 na maior parte do ensaio. O SG-01 supera a deformação do SG-02 somente ao final do ensaio, quando a carga aplicada é de 96% da carga de ruptura. O SG-02 apresenta comportamento linear até a ruptura do espécime. A ruptura ocorre na parte inferior do pilar, o que justifica o baixo valor da deformação do concreto, $\mathcal{E}_c = 1,6mm/m$, próximo à carga de ruptura.



Figura 4.9 – Curvas força–deformação do concreto e distribuição dessas deformações em seções dos espécimes: (a) PI-30; (b) PI-70.

O espécime PI-70 apresenta a deformação do SG-01 superior a do SG-02 durante todo o ensaio. O SG-02 apresenta comportamento linear até a carga de 800kN. A partir da carga de 1140kN o SG-01 apresenta deformação $\varepsilon_c = 2,0 mm/m$ constante até o fim do ensaio devido a problemas na aquisição destes dados.

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam as deformações do concreto nos espécimes PVx. Os extensômetros SG-01 e 02 estão no centro da face do nó.



Figura 4.10 – Curvas força–deformação do concreto e distribuição dessas deformações em seções dos espécimes: (a) PVx-0,5-1; (b) PVx-0,5-2; (c) PVx-1,0-1; (d) PVx-1,0-2.

Na maioria dos espécimes, quando a carga aplicada se aproxima da carga de ruptura do PI-30 (668,5kN), o SG-02 começa a apresentar uma redução no valor do acréscimo de deformação, enquanto o SG-01 continua a aumentar constantemente. Esse aumento ocorre até próximo à carga de ruptura, depois disso o valor do SG-01 começa a reduzir e o SG-02 indica que há tração no concreto no lado oposto à aplicação da carga excêntrica.



Figura 4.11 – Curvas força–deformação do concreto e distribuição dessas deformações em seções dos espécimes: (a) PVx-1,6-1; (b) PVx-1,6-2; (c) PVx-2,5-1; (d) PVx-2,5-2.

No caso dos espécimes PVxy (Figuras 4.12 e 4.13), por terem vigas nas duas direções, são analisadas duas seções distantes 200mm das extremidades do pilar. Os extensômetros na face do pilar onde a carga excêntrica é aplicada são o SG-01 (pilar superior) e o SG-03 (pilar inferior), e na face oposta são o SG-02 (pilar superior) e SG-04 (pilar inferior). Na seção do pilar inferior a força resultante da aplicação de carga no pilar muda de posição devido as condições de apoio que restringem a rotação nas extremidades dos espécimes.





Nos espécimes PVxy os extensômetros que deformam mais e menos são o SG-01 e o SG-02, respectivamente, ambos localizados no pilar superior. No PVxy-0,5-1 e no PVxy-0,5-2 a deformação do SG-04 é superior a do SG-03 durante o início e no fim do ensaio, enquanto o SG-03 é superior no meio do ensaio. Para o PVxy-1,0-1, o SG-03 e o SG-04 apresentam valores de deformações semelhantes, o que indica que a resultante das forças aplicadas está atuando próxima ao centro do pilar. No PVxy-1,0-2 o SG-03 deforma mais do que o SG-04.

Quando o carregamento se aproxima da carga de ruptura dos espécimes PVxy-0,5-1 e PVxy-0,5-2, o SG-03 e o SG-04 começam a apresentar, respectivamente, uma redução e um aumento no valor da deformação. Enquanto nos espécimes PVxy-1,0-1 e PVxy-1,0-2 a curva do SG-01 começa a apresentar um patamar próximo ao valor de $\varepsilon_c = 2,0 mm/m$.



em seções dos espécimes: (a) PVxy-1,0-1; (b) PVxy-1,0-2.

4.4.2.1. Armadura longitudinal da viga

A Figura 4.14 apresenta a posição dos extensômetros na armadura da viga, são eles: SG-05 à SG-12 e SG-21 à SG-28. Estes extensômetros são utilizados para traçar as curvas força–deformação do aço da armadura negativa (Figuras 4.15 e 4.16) e positiva (Figuras 4.17 e 4.18). Os espécimes do tipo PVx têm apenas os extensômetros de 05 à 12.



(a) Armadura negativa
(b) Armadura positiva
Figura 4.14 – Posição dos extensômetros na armadura da viga: (a) negativa; (b) positiva.

Armadura negativa

Na Figura 4.15 pode-se observar nas curvas três fases distintas, as quais estão relacionadas as fases de carregamento dos espécimes, são elas:

- Fase 1: aplicação de carga no pilar com a viga descarregada;
- Fase 2: aplicação de carga na viga enquanto a carga no pilar é mantida constante;
- Fase 3: aplicação de carga no pilar até a ruptura enquanto o momento na viga é mantido constante;

Enquanto é aplicada a carga na viga, o SG-05 e o SG-06, da interface viga-pilar, deformam mais do que o SG-09 e o SG-10, do nó. Em todos os casos, apesar da carga excêntrica aplicada no pilar, os extensômetros SG-05 e SG-06 apresentam valores idênticos durante a Fase 2 (carregamento da viga).

Durante a aplicação da carga na viga, com exceção do PVx-2,5-1 e do PVx-2,5-2, os demais espécimes apresentam deformação maior na interface viga-pilar do que no centro do nó. Contudo, ao aumentar a quantidade da armadura longitudinal da viga, essa diferença diminui até que para os espécimes PVx-2,5-1 e PVx-2,5-2 não há diferença entre os valores da interface e do nó.



Figura 4.15 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal negativa da viga dos espécimes: (a) PVx-0,5-1; (b) PVx-0,5-2; (c) PVx-1,0-1; (d) PVx-1,0-2; (e) PVx-1,6-1; (f) PVx-1,6-2; (g) PVx-2,5-1; (h) PVx-2,5-2.

Após o carregamento da viga as curvas do SG-09 e do SG-10 seguem paralelas às curvas do SG-05 e SG-06, respectivamente. Quando o valor da carga aplicada no pilar chega próximo ao valor da carga de ruptura do PI-30 (668,5kN), todos os extensômetros apresentam incrementos maiores de deformação. Os maiores incrementos são nos extensômetros localizados no lado em que a carga excêntrica é aplicada, SG-05 e SG-09, sendo que na maioria dos casos o SG-09 apresenta o maior incremento entre os dois.

Na Figura 4.16 o SG-21 e o SG-22 apresentam valores da deformação semelhantes durante a maior parte do ensaio, tanto no espécime PVxy-0,5-1 como no PVxy-0,5-2. No PVxy-0,5-1 o SG-25 e o SG-26 também apresentam valores semelhantes.

No PVxy-0,5-2 os extensômetros SG-05 e SG-09, localizados onde a carga excêntrica é aplicada, deformam mais do que os seus respectivos pares no lado oposto, SG-06 e SG-10, após a aplicação da carga na viga e até a ruptura da peça.



Figura 4.16 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal negativa da viga dos espécimes: (a) PVxy-0,5-1; (b) PVxy-0,5-2; (c) PVxy-1,0-1; (d) PVxy-1,0-2.

O SG-05 e o SG-22, localizados próximos um ao outro, apresentam valores semelhantes até a ruptura. Após atingir a carga de ruptura do PI-30

(668,5kN) o acréscimo de deformação do SG-09, para um mesmo intervalo de carga, é maior do que os demais, chegando em alguns casos a apresentar deformação maior do que o SG-05.

No PVxy-1,0-2 devido a um problema com a mangueira que abastecia um dos atuadores hidráulicos que aplicam carga na viga, a deformação inicial na armadura da viga ficou limitada a 1,5 mm/m.

Armadura positiva

Na Figura 4.17, observando-se o comportamento dos extensômetros dos espécimes com deformação inicial da armadura longitudinal da viga de 1 mm/m, vemos que com o aumento da taxa de armadura os extensômetros passam a registrar que as barras estão comprimidas.

Próximo à ruptura, para a viga com $\rho = 0,5$ todos os extensômetros indicam tração. Quando a viga tem $\rho = 1,0$ ou $\rho = 1,6$ os extensômetros da interface viga-pilar, SG-07 e SG-08, indicam compressão enquanto os extensômetros do centro do nó, SG-11 e SG-12, indicam tração. Já na viga com $\rho = 2,5$ todos os extensômetros apresentam compressão.

Comparando-se os espécimes com deformação inicial de 2 mm/m na armadura longitudinal da viga, percebe-se que para a viga com ρ = 0,5, com exceção do SG-08, todos os extensômetros estão tracionados.

Quando a viga tem ρ = 1,0, todos os extensômetros indicam compressão até 700 kN e depois desse valor, só o SG-07 e o SG-11, do lado em que a carga excêntrica é aplicada, apresentam valores de tração. Para a viga com ρ = 1,6 e ρ = 2,5, todos os extensômetros apresentam compressão.

A Figura 4.18 mostra que durante todo o ensaio do PVxy-0,5-1 o SG-23 e o SG-24 apresentam os valores da deformação semelhantes, assim como o SG-27 e o SG-28.

Durante a aplicação de carga na viga, o extensômetro SG-08 apresenta um maior valor de deformação à compressão do que o SG-07. Ambos os extensômetros estão mais comprimidos ou menos tracionados do que os seus respectivos pares do centro do nó, SG-11 e SG-12. Em todos os casos o SG-24 apresenta valor de compressão maior do que o SG-07, apesar de estarem localizados próximos um do outro.

Nos espécimes PVxy-0,5-1 e PVxy-0,5-2 todos os extensômetros apresentam valores de tração, sendo que os maiores valores são registrados pelos extensômetros da interface viga-pilar.



Figura 4.17 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal positiva da viga dos espécimes: (a) PVx-0,5-1; (b) PVx0,5-2; (c) PVx-1,0-1; (d) PVx-1,0-2; (e) PVx-1,6-1; (f) PVx-1,6-2; (g) PVx-2,5-1; (h) PVx-2,5-2.

Nos espécimes com ρ = 1,0 na viga somente os extensômetros SG-07, SG-08 e SG-24, ambos da interface viga-pilar, apresentam valores que indicam compressão nas armaduras. Contudo, após a carga no pilar atingir 800kN no espécime PVxy-0,5-1, todos os extensômetros apresentam valores de tração. No PVxy-0,5-2 após a carga de 900kN no pilar, só o SG-08 apresenta compressão.



Figura 4.18 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal positiva da viga dos espécimes: (a) PVxy-0,5-1; (b) PVxy-0,5-2; (c) PVxy-1,0-1; (d) PVxy-1,0-2.

4.4.2.2. Armadura longitudinal do pilar

As deformações apresentadas nas Figuras 4.19 a 4.21 são medidas com extensômetros localizados a meia altura do pilar, um em uma barra do pilar do lado onde a carga excêntrica é aplicada, chamado de SG-13, e o outro em uma barra do lado oposto, SG-14.

O PI-30 e PI-70 têm apenas o SG-13. O PVxy-0,5-2 têm dois extensômetros extras, SG-20 e SG-19, que estão posicionados nos mesmos lados dos SG-13 e SG-14, respectivamente.

Os espécimes PI-30 e PI-70 apresentam valores baixos de deformação, pois a ruptura ocorre na parte inferior e superior do pilar, respectivamente, longe da seção onde o extensômetro está localizado. Ao atingir as cargas de 630kN e 660kN, nos espécimes PI-30 e PI-70 respectivamente, o SG-13 mantém um valor constante apesar do incremento da carga, devido a problemas na aquisição dos dados.



Figura 4.19 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal do pilar dos espécimes: (a) PI-30; (b) PI-70.

Em todos os casos dos espécimes PVx, o valor do SG-13 é maior do que o do SG-14, por este estar localizado no lado em que a carga excêntrica no pilar é aplicada. O valor do SG-14 é maior quando a deformação inicial na armadura da viga é de 1 mm/m, se comparado aos valores obtidos para deformação de 2 mm/m, porém nesses dois casos o comportamento é o mesmo. Em alguns casos quando a carga aplicada no pilar chega próxima a carga de ruptura do PI-30 (668,5 kN) o valor do SG-14 diminuí e próximo a carga de ruptura do espécime esse valor indica tração.

Quando são comparados espécimes com mesma taxa de armadura e deformações iniciais distintas, o SG-13 apresenta comportamento parecido em ambos os casos. O valor da deformação é maior quando a deformação inicial na armadura da viga é de 1 mm/m. O SG-13 apresenta grande valor de deformação para a carga de 700 e 600 kN nos espécimes com viga com $\rho = 1,0$ e nos demais casos, respectivamente.

Em todos os espécimes PVxy há um aumento na deformação do SG-13 enquanto a carga nas vigas é aplicada. Nos espécimes PVxy-0,5-1 e PVxy-0,5-2 o SG-13 apresenta o mesmo tipo de comportamento. Em ambos os casos quando a carga atinge 600kN a deformação é de 2,5 mm/m. A deformação passa a aumentar rapidamente até a carga de 700kN. Na seqüência, até a carga de 850kN o valor da deformação começa a reduzir, para depois a deformação voltar a aumentar até a ruptura da peça. O SG-20 segue a mesma tendência apresentada pelo SG-13, porém com valor da deformação menor.

Nos ensaios com ρ = 1,0 o SG-13 apresenta deformação de 2,5 mm/m com 800 e 900kN para o PVxy-1,0-1 e o PVxy-1,0-2, respectivamente. Do mesmo modo que os espécimes com viga em uma direção, após esse ponto há um grande acréscimo de deformação. O SG-14 apresenta o mesmo comportamento para os espécimes com viga em uma e nas duas direções.



Figura 4.20 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal do pilar dos espécimes: (a) PVx-0,5-1; (b) PVx-0,5-2; (c) PVx-1,0-1; (d) PVx-1,0-2; (e) PVx-1,6-1; (f) PVx-1,6-2; (g) PVx-2,5-1; (h) PVx-2,5-2.



4.4.2.3.Estribos no nó

As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 apresentam a curva força-deformação do aço dos estribos da região central dos espécimes isolados, com viga em uma direção e nas duas direções, respectivamente. Os extensômetros estão a 50 mm do centro dos espécimes. Na face em que a carga do pilar é aplicada o SG-15 e o SG-17 estão nos estribos inferior (parte tracionada do nó) e superior (parte comprimida do nó), respectivamente. Na face perpendicular o SG-16 e o SG-18 estão posicionados nos estribos inferior e superior, respectivamente. Os espécimes PI-30 e o PI-70 têm apenas o SG-15.



Figura 4.22 – Curvas força–deformação dos estribos do nó dos espécimes: (a) PI-30; (b) PI-70.



Figura 4.23 – Curvas força–deformação dos estribos do nó dos espécimes: (a) PVx-0,5-1; (b) PVx-0,5-2; (c) PVx-1,0-1; (d) PVx-1,0-2; (e) PVx-1,6-1; (f) PVx-1,6-2; (g) PVx-2,5-1; (h) PVx-2,5-2.

Os espécimes PI-30 e PI-70 apresentam valores baixos das deformações porque a ruptura ocorreu na parte inferior e superior do pilar, respectivamente, longe da seção onde o extensômetro estava localizado.

Nos espécimes com viga em uma direção, no momento em que as vigas estão sendo carregadas, os extensômetros SG-15 e SG-16 apresentam incrementos de deformação de tração, enquanto o SG-17 apresenta valores de compressão e o SG-18 têm pequenas alterações no seu valor.

Após essa fase e até a carga do pilar se aproximar da carga de ruptura do PI-30 (668,5 kN), os extensômetros SG-17 e SG-18 seguem paralelos ao SG-15 e ao SG-16, respectivamente. Em seguida, o SG-17 e o SG-18 (da parte comprimida do nó) apresentam incrementos maiores do que o SG-15 e o SG-16 (da parte tracionada do nó), respectivamente.



Figura 4.24 – Curvas força–deformação dos estribos do nó dos espécimes: (a) PVxy-0,5-1; (b) PVxy-0,5-2; (c) PVxy-1,0-1; (d) PVxy-1,0-2.

Nos espécimes com viga nas duas direções, enquanto é aplicada a carga no pilar no início do ensaio, todos os extensômetros indicam tração nos estribos. Quando se inicia a aplicação de cargas nas vigas, para os espécimes PVxy-0,5-1 e PVxy-0,5-2, os extensômetros SG-15 e SG-16 apresentam incrementos de deformação de tração enquanto o SG-17 e o SG-18 mantém os seus valores constantes. No caso do PVxy-1,0-1 e PVxy-1,0-2, ao passo que o SG-15 e o

SG-16 são tracionados o SG-17 e o SG-18 reduzem o valor das suas deformações.

Após a aplicação da carga da viga e até a carga do pilar ultrapassar a carga de ruptura do PI-30 (668,5 kN), os extensômetros SG-17 e SG-18 seguem paralelos aos SG-15 e SG-16, respectivamente. Nesta fase o SG-15 e o SG-17 apresentam os maiores incrementos de deformação. Próximo à carga de ruptura, o SG-15 e o SG-16 começam a apresentar incrementos maiores do que o SG-17 e o SG-18, respectivamente.

4.5.Deslocamentos

4.5.1.Pilar

Nas Figuras 4.25 a 4.28 são apresentadas as curvas força-deslocamento lateral do pilar e a distribuição desses deslocamentos ao longo da altura H dos pilares dos espécimes isolados, PVx da primeira e segunda séries de ensaios, PVx da terceira série e PVxy, respectivamente. O deslocamento para H igual a zero é nulo, pois a base do pilar está apoiada na base de ensaio. Com exceção da Figura 4.28, nas demais figuras não é apresentado o deslocamento para H igual a 1000 mm, uma vez que nesse ponto o deslocamento do pilar não é medido.



Figura 4.25 – Curvas força–deslocamento lateral e figura com o deslocamento lateral do espécime ao longo do ensaio: (a) PI-30; (b) PI-70.

A face analisada nos espécimes isolados e com viga em uma direção fica no lado em que há excentricidade e é instrumentada com três transdutores de deslocamentos, identificados como TD 1, TD 2 e TD 3, que estão posicionados a 750mm, 500mm e 250mm a partir da extremidade inferior do pilar. No caso do PVxy, o TD 2 não é posicionado, pois há uma viga nesta região. Nos espécimes PVx da terceira série há um transdutor de deslocamento identificado por TD 8, que está posicionado no ponto de aplicação da carga.

No espécime PI-30 o TD 1 e o TD 2 apresentam grandes deslocamentos para cargas baixas, devido à acomodação da base do pilar. Esse deslocamento excessivo também é observado no início do ensaio do PI-70.

Analisando o deslocamento medido a partir da carga de 200kN, supondo que antes desse ponto o valor medido pode ser desprezado, observa-se que em ambos os espécimes o TD 1 desloca mais que o TD 2, que por sua vez têm deslocamento superior ao TD 3. Os valores obtidos para o TD 3 são muito inferiores ao deslocamento apresentado pelo TD 1.

Na maior parte dos ensaios, com exceção do PVx-0,5-2, o TD 1 apresenta deslocamento muito superior aos TDs 2 e 3, que por sua vez apresentam valores próximos entre si. Após atingir as forças aplicadas no pilar de 700, 740, 770 e 900 kN nos espécimes PVx-0,5-1, PVx-0,5-2, PVx-1,0-1 e PVx-1,0-2, respectivamente, o TD3 passa a apresentar deslocamento no sentido oposto aos TDs 1 e 2. O PVx-0,5-2 é o único espécime que altera sensivelmente o valor do deslocamento de todos os TDs enquanto é aplicada a carga na viga.

Na terceira série de ensaios, com exceção do PVx-1,6-1, os espécimes apresentam comportamento similar aos espécimes com viga em uma direção ensaiados anteriormente. O TD 8 apresenta deslocamento superior ao TD 1, porém seguindo o mesmo comportamento da curva. O TD 3 passa a apresentar deslocamento no sentido oposto ao TD 1 nas forças de 705, 727 e 695 kN nos espécimes PVx-1,6-2, PVx-2,5-1 e PVx-1,6-2, respectivamente.

Nos espécimes PVxy-0,5-1 e PVxy-0,5-2 a curvas força-deslocamento do TD 1 são lineares durante a maior parte do ensaio. O TD 3 varia pouco até chegar a carga de 750kN e 860kN para os espécimes PVxy-0,5-1 e PVxy-0,5-2, respectivamente, e depois desse ponto ele passa a apresentar deslocamento no sentido oposto ao do TD 1.

Os espécimes PVxy-1,0-1 e PVxy-1,0-2 apresentam comportamento diferente dos anteriores, pois o deslocamento do TD 3 é superior ao do TD 1 e por apresentarem os deslocamentos em sentidos opostos desde o início do



ensaio. No PVxy-0,5-1 os TDs são retirados quando a carga é de 900kN e nos demais casos os TDs permanecem até o fim do ensaio.

Figura 4.26 – Curvas força–deslocamento lateral e figura com o deslocamento lateral do espécime ao longo do ensaio: (a) PVx-0,5-1; (b) PVx-0,5-2; (c) PVx-1,0-1; (b) PVx-1,0-2.





Figura 4.27 – Curvas força–deslocamento lateral e figura com o deslocamento lateral do espécime ao longo do ensaio: (a) PVx-1,6-1; (b) PVx-1,6-2; (c) PVx-2,5-1; (d) PVx-2,5-2.





Figura 4.28 – Curvas força–deslocamento lateral e figura com o deslocamento lateral do espécime ao longo do ensaio: (a) PVxy-0,5-1; (b) PVxy-0,5-2; (c) PVxy-1,0-1; (d) PVxy-1,0-2.