

5– ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1.Comportamento dos espécimes

O comportamento dos espécimes pode ser descrito dividindo o ensaio em quatro fases distintas:

- Fase 1: aplicação de força no pilar com a viga descarregada;
- Fase 2: aplicação de força na viga enquanto a força no pilar é mantida em um valor constante;
- Fase 3: aplicação de força no pilar até a armadura longitudinal mais comprimida do pilar atingir a deformação de escoamento, enquanto o momento na viga é mantido constante;
- Fase 4: aplicação de força no pilar até a ruptura, enquanto o momento na viga é mantido constante.

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam as deformações nas armaduras longitudinais da viga ao longo da altura da viga. Os valores dessas deformações são obtidos ao final de cada fase pelos extensômetros do lado mais comprimido SG-05, SG-07, SG-09 e SG-11, onde os dois primeiros representam as deformações na interface viga-pilar e os outros dois as deformações no cento do nó.

Fase 1: Os extensômetros da armadura longitudinal da viga na interface viga-pilar e no interior do nó trabalham como tirantes, evitando a expansão do nó. Os extensômetros do lado em que a carga excêntrica do pilar é aplicada deformam mais do que o do lado oposto devido a maior força de compressão nessa região.

O valor dos extensômetros do estribo do pilar pouco se altera. Os extensômetros da armadura longitudinal do pilar apresentam valores próximos ao do espécime PI-30. Nessa fase não há grande diferença entre os resultados obtidos nos espécimes com viga em uma e nas duas direções devido a baixa magnitude dos valores registrados.

Fase 2: Os extensômetros na interface viga-pilar apresentam deformações superiores à dos extensômetros no interior do nó. A diferença entre os valores

da interface e do interior são maiores nos espécimes com deformação inicial na armadura $\varepsilon_s = 2,0\text{mm/m}$.

A armadura de compressão da viga passa a apresentar deformações de compressão. Quanto maior é a taxa de armadura da viga e a deformação inicial aplicada, maiores são os valores de deformação de compressão obtidos.

Com a aplicação de carga na viga o estribo no nó mais próximo da armadura negativa apresenta valores crescentes de deformação de tração, devido à expansão do concreto na parte tracionada do nó. Os deslocamentos medidos ao longo do comprimento do pilar pouco se alteram, assim como os valores dos extensômetros na armadura longitudinal do pilar.

Fase 3: Os valores dos extensômetros da interface e do interior do nó passam a apresentar valores crescentes de deformação de tração, tanto na armadura negativa quanto na positiva, com curvas paralelas. Os extensômetros do lado em que a carga excêntrica do pilar é aplicada continuam a deformar mais do que o do lado oposto.

Os estribos apresentam pouca variação nos valores dos extensômetros, enquanto os extensômetros do pilar continuam a apresentar valores próximos ao do espécime PI-30.

Fase 4: Nos espécimes PVxy, quanto maior a taxa de armadura da viga, maior é a força aplicada no pilar para que se observe o comportamento descrito abaixo. Nos espécimes PVx os valores dessas forças são muito próximas.

Nos espécimes PVx-0,5-1, PVx-0,5-2 e PVx-1,0-1 os extensômetros na armadura de tração da viga no interior do nó passam a ter incrementos maiores de deformação do que dos extensômetros da interface viga-pilar. Nos espécimes PVx-1,0-1 e PVx-1,6-2 ocorre o contrário e nos espécimes PVx-2,5-1 e PVx-2,5-2 esses valores são iguais.

Os incrementos de deformação nos espécimes PVx com $\varepsilon_s = 1,0\text{mm/m}$ são maiores, sendo que no final do ensaio os valores das deformações da armadura negativa passam a ser próximos, enquanto o valor da deformação na armadura positiva é maior no nó.

A armadura de compressão no lado em que a carga excêntrica é aplicada apresenta deformações de tração significativas nos casos onde a força de compressão gerada pelo momento aplicado na viga é baixa, assim como nos estribos do nó. A armadura longitudinal do pilar no lado oposto a excentricidade começa a ter um incremento de deformação maior porque a força passa a ser transferida para esse lado devido ao esmagamento do concreto no nó.

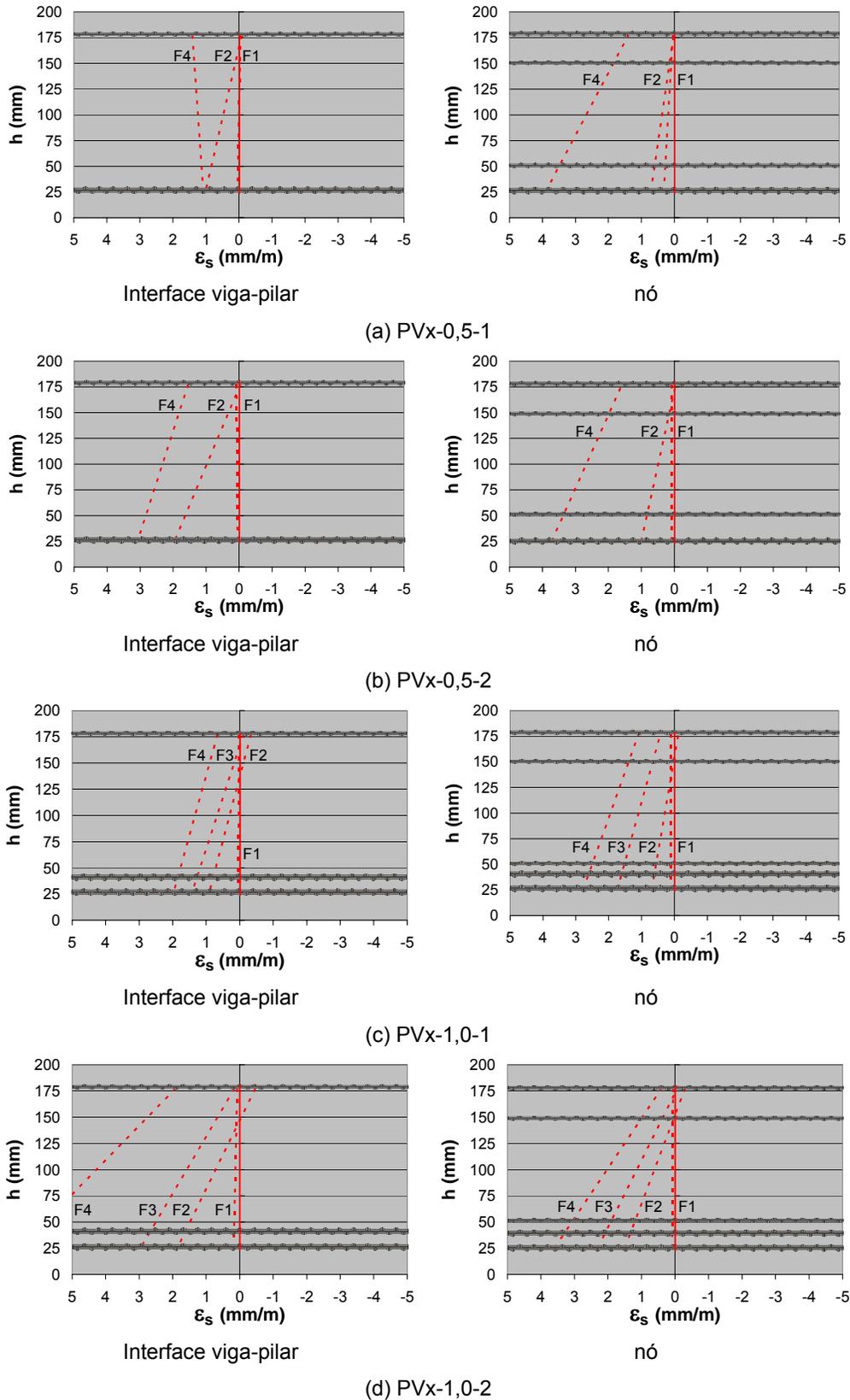


Figura 5.1 – Deformação da armadura longitudinal da viga dos espécimes: (a) PVx-0,5-1; (b) PVx-0,5-2; (c) PVx-1,0-1; (d) PVx-1,0-2.

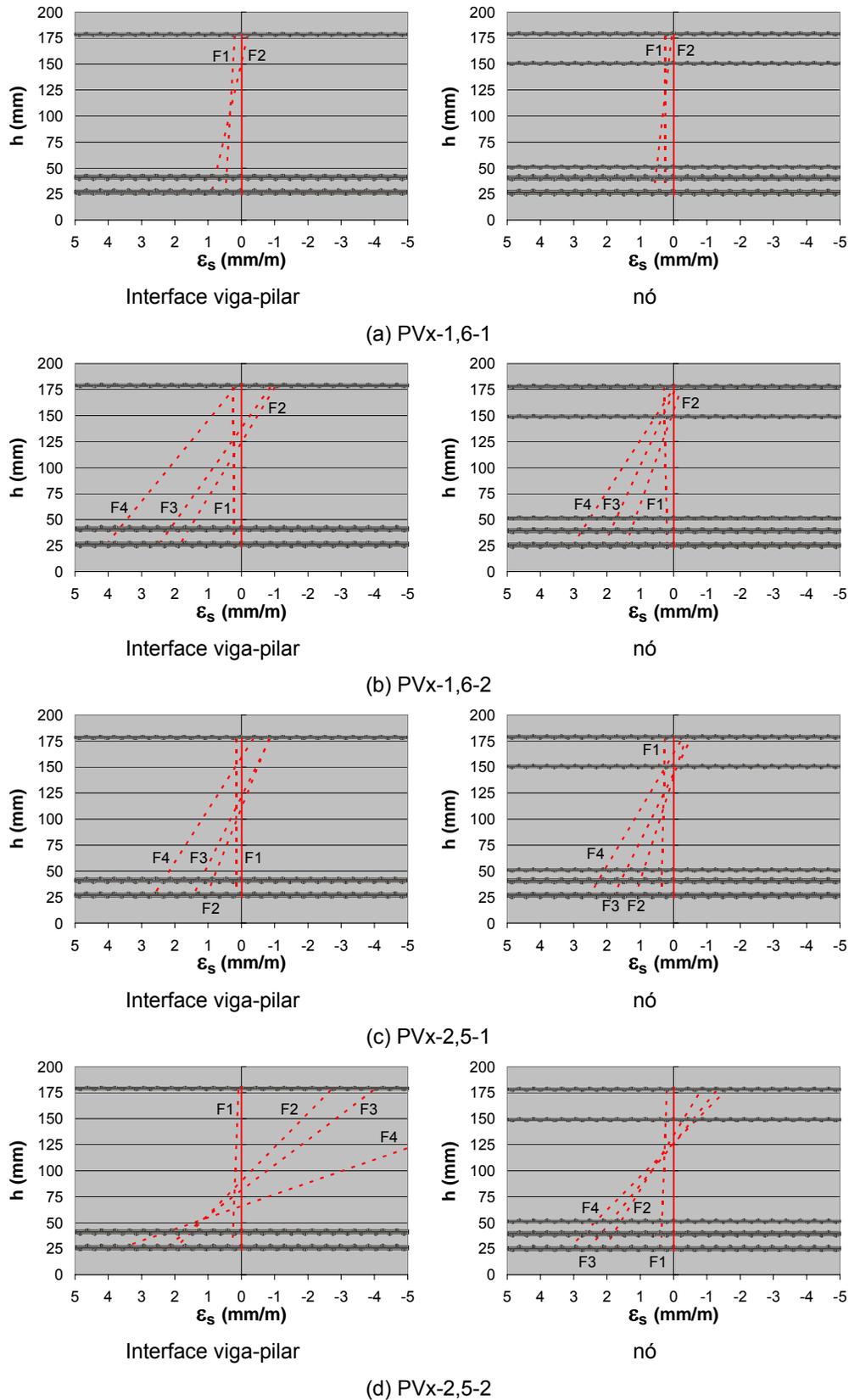


Figura 5.2 – Deformação da armadura longitudinal da viga dos espécimes: (a) PVx-1,6-1; (b) PVx-1,6-2; (c) PVx-2,5-1; (d) PVx-2,5-2.

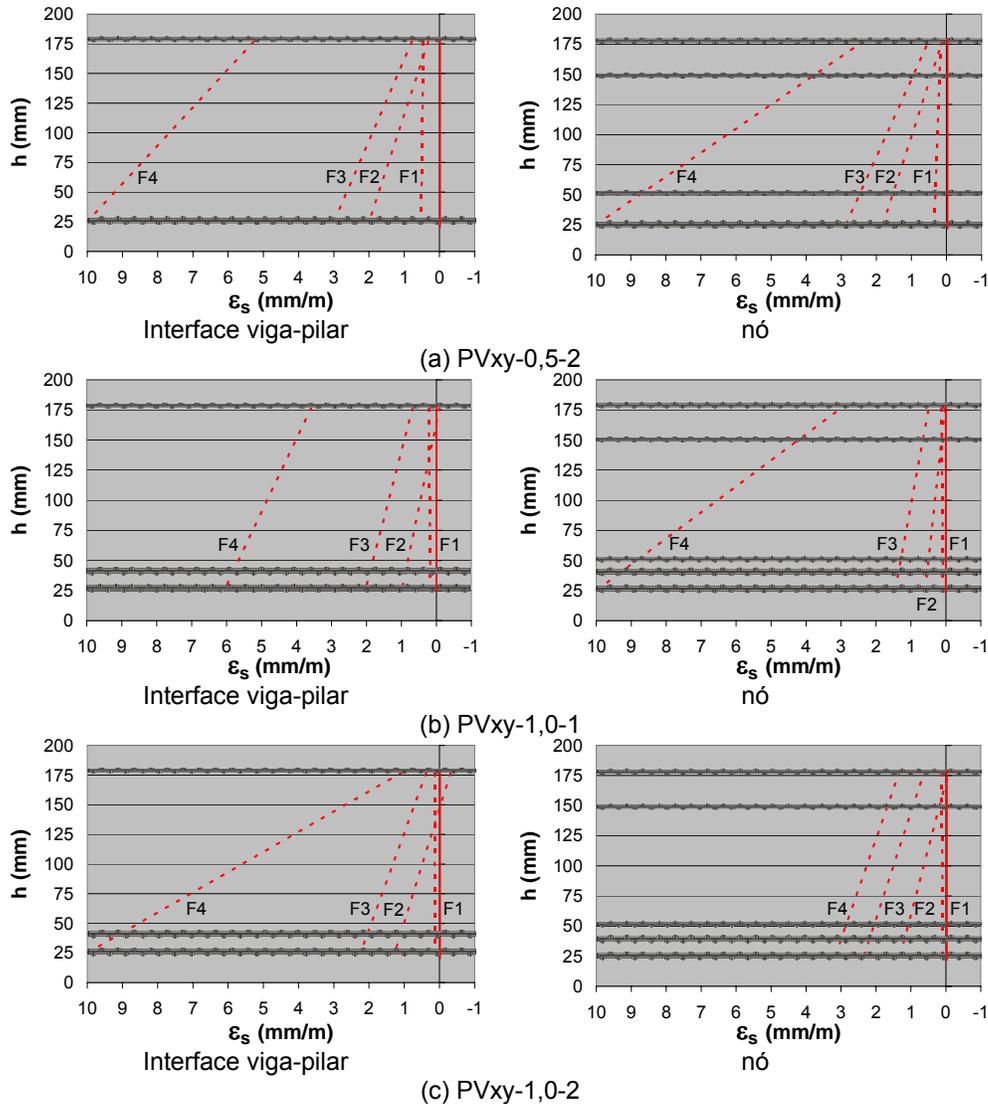


Figura 5.3 – Deformação da armadura longitudinal da viga dos espécimes: (a) PVxy-0,5-2; (b) PVxy-1,0-1; (c) PVxy-1,0-2.

5.2.Carga e modo de ruptura

5.2.1.Carga de ruptura

Na análise das cargas aplicadas no pilar é realizada uma comparação entre os valores das cargas quando uma determinada deformação é alcançada pelos extensômetros SG-13, SG-05 e SG-09. O SG-13 está localizado na armadura longitudinal do pilar, no lado em que a carga excêntrica é aplicada e a meia altura do espécime. O SG-05 e o SG-09 estão localizados respectivamente na interface viga-pilar e no centro do nó da armadura de tração da viga.

A Tabela 5.1 apresenta os valores das cargas aplicadas nos espécimes quando os extensômetros SG-13, SG-05 e SG-09 apresentam o valor da

deformação igual ao valor da deformação de escoamento da barra ou o maior valor registrado, juntamente com a carga de ruptura dos mesmos, considerando a carga de ruptura igual a carga aplicada no pilar superior $F_{u,pil.sup.}$.

Tabela 5.1 – Cargas de ruptura F_u igual à carga aplicada no pilar superior $F_{u,pil.sup.}$ e de escoamento dos espécimes com viga em uma direção.

Espécimes	F_{y13} (kN)	F_{y05} (kN)	F_{y09} (kN)	F_u (kN)	F_{y13}/F_u (%)	F_{y05}/F_u (%)	F_{y09}/F_u (%)	F_u/F_{u30} (%)	F_u/F_{u70} (%)
PI30	-	-	-	668,5	-	-	-	1,00	0,52
PI70				1292,2				1,93	1,00
PVx-0,5-1	-	740,6	741,6	780,8	-	95	95	1,17	0,60
PVx-0,5-2	-	667,6	772,8	792,5	-	84	98	1,19	0,61
PVx-1,0-1	726,6	868,1*	868,1*	868,1	84	100*	100*	1,30	0,67
PVx-1,0-2	729,5	719,8	884,3	937,8	78	77	94	1,40	0,73
PVx-1,6-1	-	-	-	740,3	-	-	-	1,11	0,57
PVx-1,6-2	644,5	760,1	824,6*	824,6	78	92	100*	1,23	0,64
PVx-2,5-1	600,5	830,2*	830,2*	830,2	72	100*	100*	1,24	0,64
PVx-2,5-2	659,0	766,0	773,1	821,5	80	93	94	1,23	0,64

F_{y13} é a carga no pilar quando o SG-13 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{y05} é a carga no pilar quando o SG-05 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{y09} é a carga no pilar quando o SG-09 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{u30} é a carga F_u do pilar isolado PI30

F_{u70} é a carga F_u do pilar isolado PI70

F_u é a carga de ruptura do pilar considerada igual à carga aplicada no pilar superior $F_{u,pil.sup.}$.

*O espécime rompeu antes do escoamento da barra.

Em todos os casos ocorre o escoamento da armadura mais comprimida do pilar antes do esmagamento do concreto no nó ou no pilar. Em elementos submetidos à flexo-compressão o concreto só esmaga quando atinge um valor da deformação que é superior a deformação de escoamento da armadura longitudinal do pilar. Em média, o SG-13, localizado na armadura longitudinal mais comprimida do pilar, apresenta esse valor de escoamento com 78 % da carga de ruptura.

Entre os espécimes com deformação inicial na armadura da viga igual a 1,0mm/m, somente o PVx-0,5-1 apresenta valores do SG-05 e SG-09 maiores que a deformação de escoamento da barra antes do fim do ensaio, porém próximo a ruptura. Isso ocorre porque devido ao pequeno valor da deformação inicial, o acréscimo de deformação requerido para atingir o escoamento se torna

muito grande, mesmo assim o SG-09 apresenta valor superior ou igual ao SG-05 ao final dos ensaios.

De acordo com os dados registrados pelo SG-05, todos os espécimes com deformação inicial igual a 2,0mm/m atingem a deformação de escoamento da armadura. Isto ocorre com 84%, 77%, 92% e 93% da carga de ruptura dos espécimes PVx-0,5-2, PVx-1,0-2, PVx-1,6-2 e PVx-2,5-2, respectivamente. No caso do SG-09, o espécime PVx-1,0-2 não apresenta o valor da deformação igual ou superior ao valor de escoamento da barra. Nos demais casos, os espécimes alcançam a deformação de escoamento com 94% da carga de ruptura.

O aumento da armadura longitudinal da viga não promove uma grande alteração na carga de ruptura quando os espécimes com vigas com diferentes taxas de armadura são comparados. A diferença entre as deformações iniciais na armadura das vigas, 1,0mm/m e 2mm/m, também não teve influência significativa nas cargas de ruptura. Isso ocorreu porque a ruptura ocorre na face mais comprimida do nó e esta face não está confinada pela viga, o que faz com que o aumento da armadura da viga tenha pouca influência.

A comparação entre as cargas de ruptura dos espécimes com viga em uma direção e a carga de ruptura do espécime PI30, que é o pilar isolado com resistência do concreto igual à resistência do concreto das vigas (30 MPa), mostra que o aumento da carga de ruptura causado pelo confinamento das vigas varia de 11% a 40%, com um valor médio de 23%.

A Tabela 5.2 apresenta os valores das cargas aplicadas nos espécimes quando os extensômetros SG-13, SG-05, SG-22, SG-09 e SG-26 apresentam o valor da deformação igual ao da deformação de escoamento da barra ou o maior valor registrado, juntamente com a carga de ruptura dos mesmos considerando a carga de ruptura igual a $F_{u,pil.sup.}$. O SG-22 e o SG-26 estão localizados respectivamente na interface viga-pilar e no centro do nó da armadura de tração da viga no sentido da carga excêntrica do pilar.

No PVxy-1,0-2 o SG-13 alcança o valor da deformação de escoamento com 85% da carga de ruptura. Nos espécimes PVxy-0,5-1, PVxy-0,5-2 e PVxy-1,0-1 esse valor é de 69%, 63% e 60%, respectivamente. Sendo assim, com exceção do PVxy-1,0-2, os espécimes com viga nas duas direções apresentam um acréscimo de carga no pilar maior após o SG-13 atingir a deformação de escoamento do que os espécimes com viga em uma direção. O baixo acréscimo do PVxy-1,0-2 pode ser devido a maior força aplicada na viga ou a uma ruptura prematura do pilar.

Tabela 5.2 – Cargas de ruptura F_u igual à carga aplicada no pilar superior $F_{u,pil.sup.}$ e de escoamento dos espécimes com viga nas duas direções.

Espécimes	F_{y13} (kN)	F_{y05} (kN)	F_{y22} (kN)	F_{y09} (kN)	F_{y26} (kN)	F_u (kN)	F_{y13}/F_u (%)	F_{y05}/F_u (%)	F_{y09}/F_u (%)	F_u/F_{u30} (%)	F_u/F_{u70} (%)
PI30	-	-	-	-	-	669	-	-	-	1,00	0,52
PI70	-	-	-	-	-	1292	-	-	-	1,93	1,00
PVxy-0,5-1	709	-	780	-	905	1032	69	-	-	1,54	0,80
PVxy-0,5-2	642	625	598	661	-	1017	63	66	68	1,52	0,79
PVxy-1,0-1	840	1137	1131	1059	1314	1409	60	82	77	2,10	1,09
PVxy-1,0-2	925	1018	970	1056	1093*	1093	85	95	100*	1,64	0,85

F_{y13} é a carga no pilar quando o SG-13 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{y05} é a carga no pilar quando o SG-05 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{y22} é a carga no pilar quando o SG-22 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{y09} é a carga no pilar quando o SG-09 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{y26} é a carga no pilar quando o SG-26 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{u30} é a carga F_u do pilar isolado PI30

F_{u70} é a carga F_u do pilar isolado PI70

F_u é a carga de ruptura do pilar considerada igual à carga aplicada no pilar superior $F_{u,pil.sup.}$

*O espécime rompeu antes do escoamento da barra.

O SG-05 e o SG-22 apresentam valores próximos da carga do pilar no momento em que eles atingem a deformação de escoamento, devido a proximidade dos mesmos. Para os espécimes com a taxa da armadura da viga igual a 0,5% e 1,0%, a carga no pilar em que o SG-05 e o SG-22 atingem a deformação de escoamento cai 21% e 13%, respectivamente, devido ao aumento da deformação inicial na armadura da viga para 2 mm/m.

No espécime PVxy-1,0-2 o SG-09 atinge o valor da deformação de escoamento da barra próximo a carga de ruptura, enquanto o SG-26 não atinge esse valor antes da ruptura da peça. Já no PVxy-0,5-2 e no PVxy-1,0-1, respectivamente com 68% e 77% da carga de ruptura, o SG-09 alcança a deformação de escoamento enquanto o SG-26 atinge esse valor próximo a carga de ruptura. Em todos os casos o SG-05 e o SG-09 apresentam o valor da deformação de escoamento com valores da carga aplicada no pilar muito próximos.

A comparação entre as cargas de ruptura dos espécimes com vigas nas duas direções e a carga de ruptura do espécime PI30, mostra um aumento expressivo da carga de ruptura causado pelo confinamento das vigas, esse aumento variou de 1,52 a 2,1 vezes o valor da carga do PI30, com um valor médio de 1,7. Tal como no caso dos espécimes com vigas numa direção, a taxa

de armadura das vigas e a deformação inicial na armadura tracionada dessas vigas não influenciam a carga de ruptura dos espécimes com vigas nas duas direções.

As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os valores das cargas aplicadas nos espécimes quando o grupo de extensômetros SG-13, SG-05 e SG-09 (Tabela 5.3) e o grupo de extensômetros SG-13, SG-05, SG-22, SG-09 e SG-26 (Tabela 5.4) apresentam o valor da deformação igual ao valor da deformação de escoamento da barra ou o maior valor registrado. Esses valores são obtidos a partir da força de reação $F_{u,pil.inf.}$, que atua no pilar inferior, que neste caso também é adotada para a carga de ruptura de todos os espécimes.

Tabela 5.3 – Cargas de ruptura F_u igual à carga aplicada no pilar superior $F_{u,pil.inf.}$ e de escoamento dos espécimes com viga em uma direção.

Espécimes	F_{y13} (kN)	F_{y05} (kN)	F_{y09} (kN)	F_u (kN)	F_{y13}/F_u (%)	F_{y05}/F_u (%)	F_{y09}/F_u (%)	F_u/F_{u30} (%)	F_u/F_{u70} (%)
PI30	–	–	–	669	–	–	–	1,00	0,52
PI70				1292				1,93	1,00
PVx-0,5-1	–	705	706	745	–	95	95	1,12	0,58
PVx-0,5-2	–	615	720	739	–	83	97	1,11	0,57
PVx-1,0-1	676	817*	817*	817	83	100*	100*	1,22	0,63
PVx-1,0-2	649	639	804	858	76	74	94	1,28	0,66
PVx-1,6-1	–	–	–	648	–	–	–	0,97	0,50
PVx-1,6-2	467	583	645*	645	72	90	100*	0,97	0,50
PVx-2,5-1	401	694*	694*	694	58	100*	100*	1,04	0,54
PVx-2,5-2	373	485	494	515	72	94	96	0,77	0,40

F_{y13} é a carga no pilar quando o SG-13 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{y05} é a carga no pilar quando o SG-05 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{y09} é a carga no pilar quando o SG-09 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{u30} é a carga F_u do pilar isolado PI30

F_{u70} é a carga F_u do pilar isolado PI70

F_u é a carga de ruptura do pilar considerada igual à carga aplicada no pilar superior $F_{u,pil.inf.}$

*O espécime rompeu antes do escoamento da barra.

Ao comparar a Tabela 5.1 com a Tabela 5.3 observa-se que não há diferenças significativas entre os valores das relações F_{y05}/F_u e F_{y09}/F_u . Contudo, com o aumento da taxa de armadura a relação F_{y13}/F_u dos espécimes PVx-1,6-2, PVx-2,5-1 e PVx-2,5-2 são menores na Tabela 5.3, pois conforme o valor da carga aplicada na viga aumenta há uma maior redução no valor da carga $F_{u,pil.inf.}$ do pilar inferior e da carga F_{y13} quando o SG-13 alcança a deformação de escoamento.

Os valores da relação F_u/F_{u30} na Tabela 5.3 revela que o acréscimo na carga de ruptura em relação ao pilar isolado com concreto de 30 MPa é de no máximo 28% (espécime PVx-1,0-2). Nos espécimes com $\rho = 1,6\%$ e com $\rho = 2,5\%$ o valor dessa relação ficou próximo a 1,0, sendo que no espécime PVx-2,5-2 esse valor é 0,77.

Tabela 5.4 – Cargas de ruptura F_u igual à carga aplicada no pilar superior $F_{u,pil.inf.}$ e de escoamento dos espécimes com viga nas duas direções.

Espécimes	F_{y13} (kN)	F_{y05} (kN)	F_{y22} (kN)	F_{y09} (kN)	F_{y26} (kN)	F_u (kN)	F_{y13}/F_u (%)	F_{y05}/F_u (%)	F_{y09}/F_u (%)	F_u/F_{u30} (%)	F_u/F_{u70} (%)
PI30	-	-	-	-	-	669	-	-	-	1,00	0,52
PI70	-	-	-	-	-	1292	-	-	-	1,93	1,00
PVxy-0,5-1	656	-	727	-	852	977	67	-	-	1,46	0,76
PVxy-0,5-2	534	517	490	553	-	906	59	57	61	1,35	0,70
PVxy-1,0-1	739	1035	1029	957	1212	1306	57	79	73	1,95	1,01
PVxy-1,0-2	773	866	817	904	940*	940	82	92	100*	1,41	0,73

F_{y13} é a carga no pilar quando o SG-13 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{y05} é a carga no pilar quando o SG-05 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{y22} é a carga no pilar quando o SG-22 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{y09} é a carga no pilar quando o SG-09 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{y26} é a carga no pilar quando o SG-26 alcançou a deformação de escoamento da barra.

F_{u30} é a carga F_u do pilar isolado PI30

F_{u70} é a carga F_u do pilar isolado PI70

F_u é a carga de ruptura do pilar considerada igual à carga aplicada no pilar superior $F_{u,pil.inf.}$

*O espécime rompeu antes do escoamento da barra.

Devido a pouca variação entre as cargas apresentadas nas Tabelas 5.2 e 5.4, pois nos espécimes com $\rho = 0,5\%$ e com $\rho = 1,0\%$ a carga aplicada nas vigas é pequena (no máximo 38,3 kN por viga), os valores das cargas e das suas relações apresentadas nessas duas tabelas são próximas.

5.2.2. Modo de ruptura

A ruptura de todos os espécimes ocorre após o escoamento das barras da armadura do pilar, no lado mais comprimido, quando o concreto no nó ou fora dele esmaga.

Em todos os espécimes com viga em uma direção a ruptura está localizada no nó. Neste caso, o aumento da taxa de armadura da viga e a diferença entre as deformações na armadura longitudinal tracionada da viga não influenciam no local da ruptura, pois a parte central do nó, que está entre estribos, é a parte mais suscetível à ruptura.

A parte superior do nó é confinada pela força de compressão do binário provocada pela aplicação de momento na viga e na parte inferior do nó, parte tracionada, a armadura longitudinal da viga após a aplicação da carga na viga atua como um tirante, provocando o confinamento passivo desta parte do nó.

Nos espécimes com viga nas duas direções, com o aumento da taxa de armadura da viga, o local da ruptura passa do nó para o pilar superior, pois não há qualquer face do nó que esteja sem confinamento. Desta forma, demonstra-se que o acréscimo na carga de ruptura, proveniente do aumento da taxa de armadura, só é possível quando todos os lados estão confinados.

5.3. Deformação

5.3.1. Concreto

A Figura 5.4 apresenta a posição dos extensômetros SG-01, 02, 03 e 04, localizados na superfície do concreto dos espécimes. As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam as curvas força–acrécimo de deformação $\Delta\varepsilon_c$ desses extensômetros nos espécimes PVx e PVxy. Esse acréscimo é resultante da aplicação de carga no pilar após o carregamento da viga.

Nos gráficos a força no pilar inicia em 200kN nos espécimes com $\rho = 0,5\%$ e com $\rho = 1,0\%$. Nos espécimes com viga com $\rho = 1,6\%$ e com $\rho = 2,5\%$ a força no pilar inicia em 300kN. Em todos os espécimes o incremento de deformação é maior nos extensômetros SG-01 e 03, localizados no lado em que a carga excêntrica no pilar é aplicada, se comparado aos seus respectivos pares SG-02 e 04, localizados na face oposta do pilar.

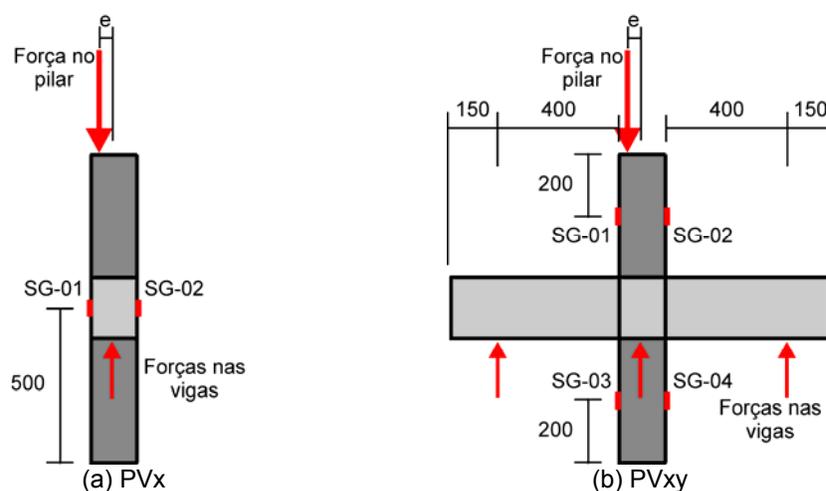
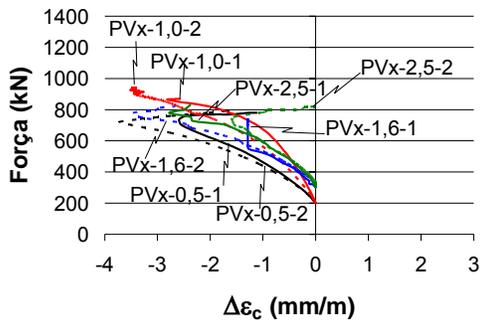
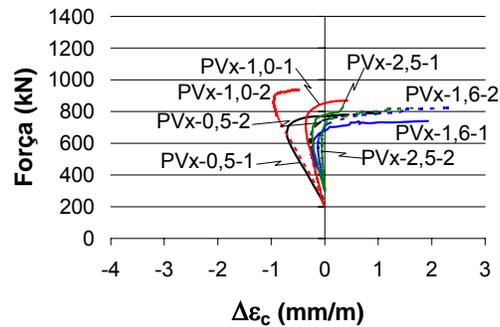


Figura 5.4 – Posição dos extensômetros do concreto: (a) PVx; (b) PVxy (valores em mm).



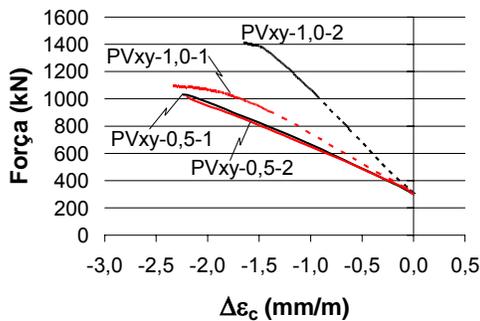
(a) SG-01



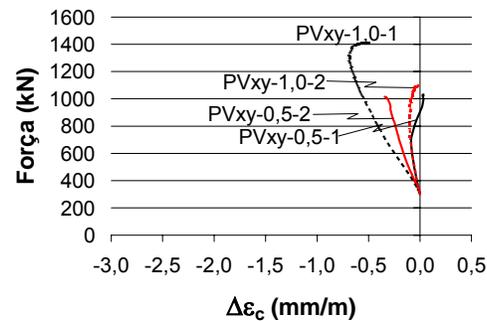
(b) SG-02

Figura 5.5 – Curva força–deformação do concreto após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVx: (a) SG-01; (b) SG-02.

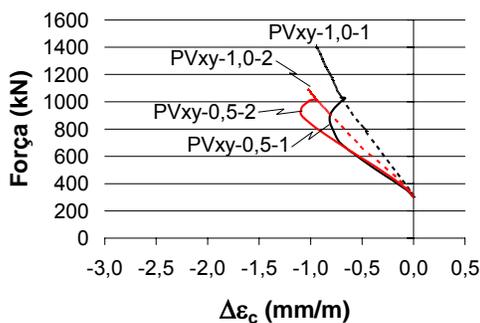
Nos espécimes com viga em uma direção, com exceção do PVx-1,0-1 e PVx-1,0-2, o SG-01 apresenta uma redução no acréscimo de deformação com valores da força no pilar entre 700kN e 800kN. No SG-02 essa redução ocorre entre 600kN e 700kN.



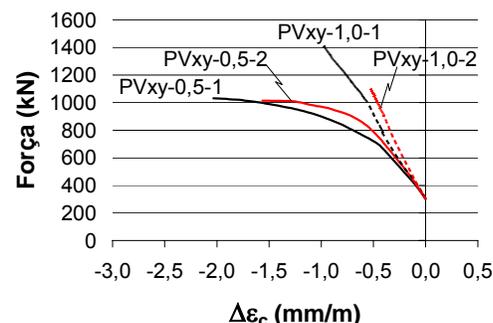
(a) SG-01



(b) SG-02



(c) SG-03



(d) SG-04

Figura 5.6 – Curva força–deformação do concreto após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVxy: (a) SG-01; (b) SG-02; (c) SG-03; (d) SG-04.

O SG-01 não apresenta diferença entre os espécimes com deformação inicial de 1mm/m e 2mm/m em vigas com a mesma taxa de armadura. Isto

indica que independentemente da deformação inicial da armadura da viga, a face mais comprimida do pilar sofre o mesmo acréscimo de deformação, inclusive com a ruptura ocorrendo com valores de carga e deformação próximas.

O SG-02 apresenta menor incremento de deformação nos espécimes com $\varepsilon_s = 2,0\text{mm/m}$, com exceção do PVx-1,0-2, visto que nestes casos a maior aplicação de carga na viga resulta em menores valores de deformação de compressão na face oposta ao lado da aplicação de carga.

Nos espécimes PVxy-0,5-1 e PVxy-0,5-2, com ruptura localizada no nó, até 700kN os incrementos de deformação de todos os extensômetros são constantes para o mesmo intervalo de carregamento. Após essa carga, que é próxima ao valor da carga em que o SG-13, localizado na armadura longitudinal mais comprimida do pilar, atinge a deformação de escoamento (ver dados na Tabela 5.3), os incrementos de deformação dos SG-02 e SG-03 passam a ser cada vez menores. Enquanto o SG-04 apresenta incrementos de deformação de compressão cada vez maiores e o SG-01 segue um comportamento linear até próximo à ruptura da peça.

Nos espécimes PVxy-1,0-1 e PVxy-1,0-2, com ruptura localizada no pilar, o SG-01 apresenta um patamar nas cargas de 1100kN e 1350kN, respectivamente. Próxima dessas cargas, o SG-02 e o SG-03 passam a reduzir os seus incrementos de compressão, enquanto o SG-04 segue linear.

Nos espécimes com $\rho = 0,5\%$ na viga, enquanto é aplicada carga no pilar o concreto do nó vai expandindo. Após o escoamento da armadura longitudinal do pilar, a carga que antes era transmitida do pilar superior para o pilar inferior através do lado mais comprido do nó, devido ao grande nível de deformação neste local, passa a ser transmitido em maior quantidade pelo lado oposto.

Como resultado, o SG-02 e 03 tem reduzido o valor do incremento da deformação de compressão, enquanto o SG-04 aumenta. Esse efeito não foi visto por completo nos espécimes com $\rho = 1,0\%$ na viga porque a ruptura está localizada no pilar, como observado pela presença de um patamar nas curvas do extensômetro do pilar superior no lado mais comprimido.

5.3.2.Aço

5.3.2.1.Armadura longitudinal da viga

A Figura 5.7 mostra a localização dos extensômetros na armadura longitudinal negativa e positiva da viga.

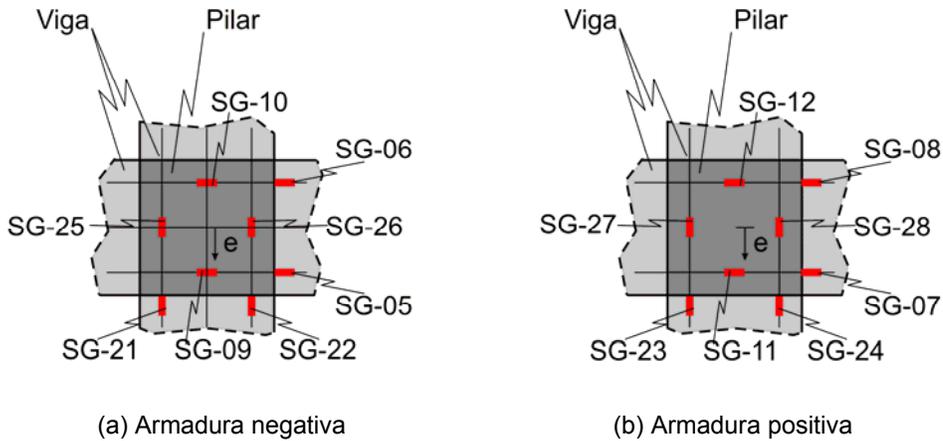


Figura 5.7 – Posição dos extensômetros na armadura da viga: (a) armadura negativa; (b) armadura positiva.

Armadura negativa

As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam a curva da força aplicada no pilar – força $F_{s,viga}$ na armadura negativa da viga, nos extensômetros 05, 06 e 22 (interface viga-pilar) e nos extensômetros 09, 10 e 26 (região dentro do nó) dos espécimes PVx e PVxy, respectivamente. Essa força $F_{s,viga}$ é associada à deformação medida em cada extensômetro no aço durante o ensaio dos espécimes e a quantidade de barras na mesma posição.

As equações utilizadas são retiradas dos gráficos tensão-deformação, obtidos no ensaio das barras de aço. A carga de escoamento de uma barra ensaiada a tração é considerada a carga de escoamento teórica para as forças $F_{s,viga}$ de 29,1kN ($1\phi 8\text{mm}$), 58,2kN ($2\phi 8\text{mm}$), 116,2kN ($2\phi 10\text{mm}$) e 144,0kN ($2\phi 12.5\text{mm}$), nos espécimes com viga com taxa de armadura ρ igual a 0,5%, 1,0%, 1,6% e 2,5%, respectivamente.

Para a barra com o diâmetro igual a 8 mm, uma vez que o gráfico tensão-deformação do ensaio não apresenta patamar definido, as equações da parte linear e não-linear são, respectivamente:

$$F_{s,viga} = (201,15 \cdot \varepsilon_s + 3,4269) \cdot A_s$$

$$F_{s,viga} = (0,0257 \cdot \varepsilon_s^5 - 1,0686 \cdot \varepsilon_s^4 + 17,204 \cdot \varepsilon_s^3 - 134,77 \cdot \varepsilon_s^2 + 525,11 \cdot \varepsilon_s - 216,56) \cdot A_s$$

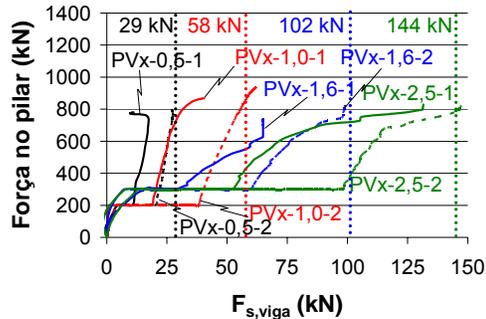
Nas barras com o diâmetro igual a 10 mm e 12.5 mm a curva tensão-deformação apresenta patamar definido e as equações da parte linear, $\varepsilon_s \leq 3,04\text{mm/m}$ ($\phi 10\text{mm}$) e $\varepsilon_s \leq 2,98\text{mm/m}$ ($\phi 12.5\text{mm}$), e do patamar são respectivamente:

para $\phi=10\text{mm}$

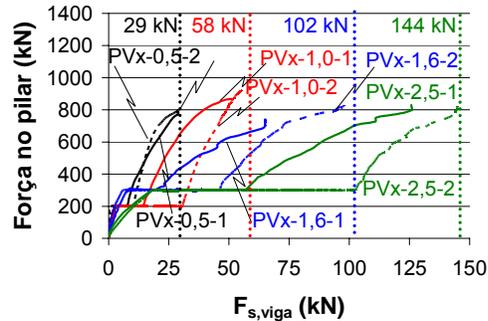
$$F_{s,viga} = (205,23 \cdot \varepsilon_s - 0,2609) \cdot A_s \text{ e } F_{s,viga} = [621,0 + (\varepsilon_s - 3,04) \cdot 19/1,75] \cdot A_s$$

para $\phi = 12,5\text{mm}$

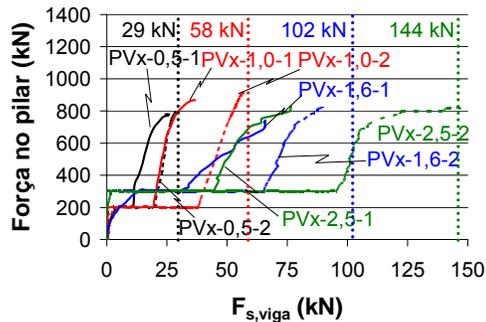
$$F_{s,viga} = (200,80 \cdot \varepsilon_s - 0,4486) \cdot A_s \text{ e } F_{s,viga} = [587,0 + (\varepsilon_s - 2,98) \cdot 20] \cdot A_s$$



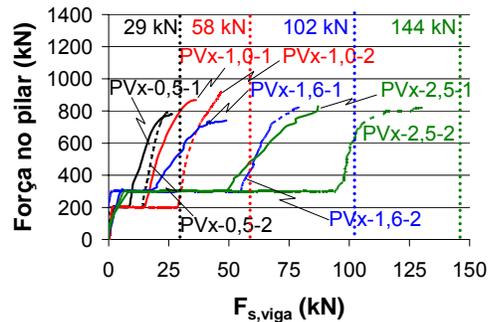
(a) SG-05



(b) SG-09



(c) SG-06



(d) SG-10

Figura 5.8 – Curvas força aplicada no pilar – força $F_{s,viga}$ da armadura negativa da viga nos espécimes PVx: (a) SG-05; (b) SG-09; (c) SG-06; (d) SG-10.

Os espécimes PVx com viga com $\rho = 0,5\%$ e com $\rho = 1,0\%$ apresentam as menores forças de confinamento geradas pelo momento aplicado na viga. As suas curvas dos extensômetros na interface viga-pilar SG-05 (lado mais comprimido) e SG-06 (lado menos comprimido) são iguais. Neste caso, o concreto do nó expande por igual sem diferença entre o lado em que é aplicada a força excêntrica e o lado oposto.

Nos demais casos, após a aplicação de carga na viga, os extensômetros do lado da força excêntrica, SG-05 (interface viga-pilar) e SG-09 (nó), apresentam maior valor da força $F_{s,viga}$, se comparado respectivamente ao SG-06 (interface viga-pilar) e ao SG-10 (nó), indicando a maior expansão do concreto do nó neste lado.

Todos os espécimes PVx com deformação inicial na armadura da viga igual a 2 mm/m atingem a força teórica de escoamento $F_{s,viga}$ nos extensômetros do lado em que é aplicada a força excêntrica no pilar, SG-05 e SG-09. Nos espécimes com viga com $\rho = 0,5\%$ e com $\rho = 1,0\%$ e deformação inicial igual a 1mm/m isso também ocorre.

Uma vez que todos os espécimes PVx apresentam valores da carga de ruptura próximos, pode-se afirmar que a variação da força de confinamento, devido ao momento aplicado na viga, não tem influência nesse caso, pois a ruptura na maior parte dos casos ocorre entre os estribos no centro do nó quando o SG-09 está próximo de alcançar a deformação de escoamento.

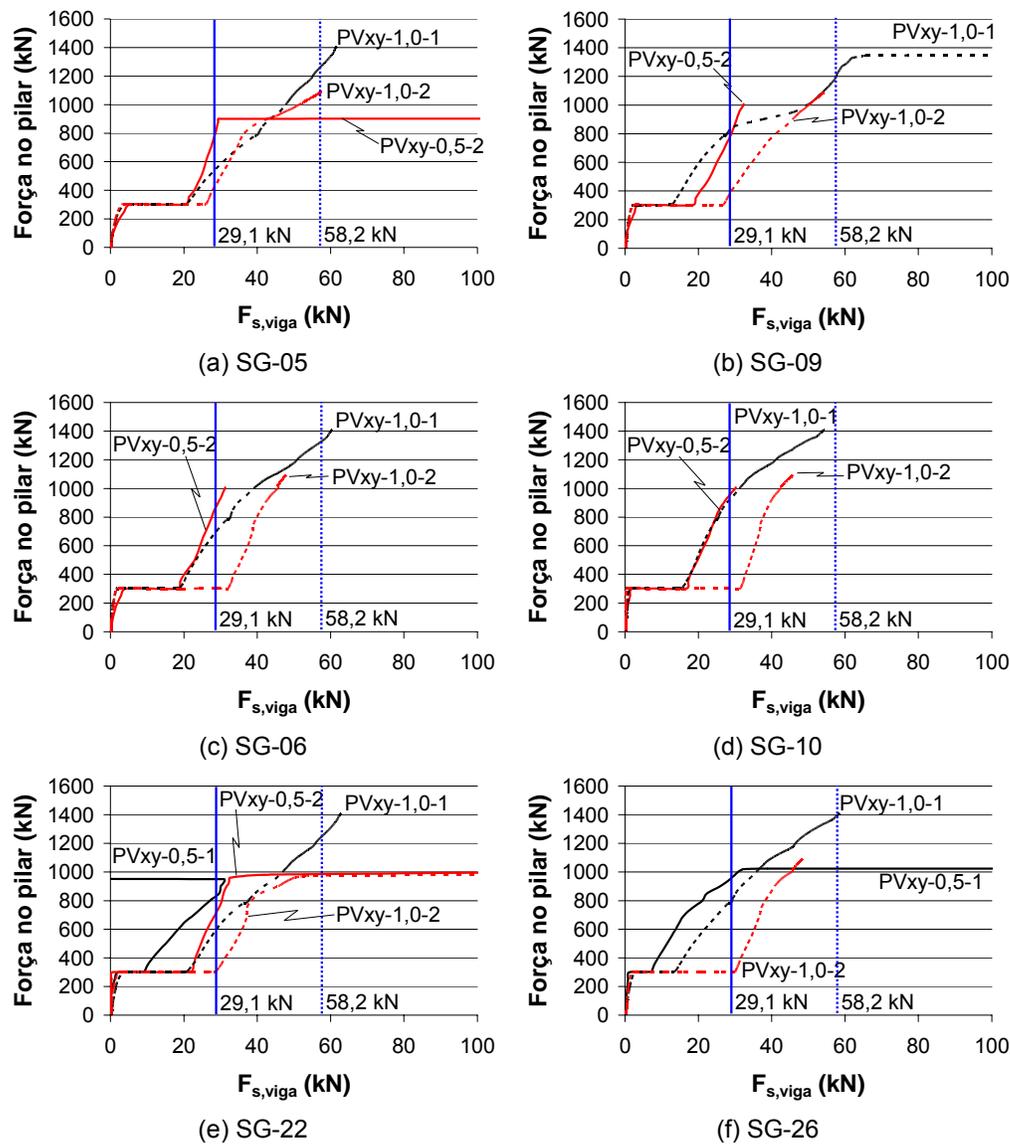


Figura 5.9 – Curvas força aplicada no pilar – força $F_{s,viga}$ da armadura negativa da viga nos espécimes PVxy: (a) SG-05; (b) SG-09; (c) SG-06; (d) SG-10; (e) SG-22 e (f) SG-26.

Os espécimes PVxy com deformação no aço de $\varepsilon_s = 1,0\text{mm/m}$ e $2,0\text{mm/m}$, iniciam as curvas na carga de 300kN em pontos distintos, mas tendem a seguir para um mesmo ponto. Sendo assim, os espécimes com $\varepsilon_s = 1,0\text{mm/m}$ apresentam curvas mais inclinadas do que com $\varepsilon_s = 2,0\text{mm/m}$.

Nos espécimes com a mesma deformação inicial na armadura da viga e diferentes taxas de armadura da viga, PVxy-0,5-2 e PVxy-1,0-2 por exemplo, as curvas obtidas são em sua maioria paralelas. Isso indica que independente da força $F_{s,viga}$ para espécimes com a mesma deformação inicial na armadura da viga, a expansão no nó apresenta os mesmos incrementos de valores.

As cargas de escoamento teóricas $F_{s,viga}$ são alcançadas próximas à ruptura dos espécimes por todos os extensômetros dos espécimes PVxy-0,5-1, PVxy-0,5-2 e PVxy-1,0-1. No espécime PVxy-1,0-2, somente os SG-05, SG-09 e SG-22, localizados no lado da excentricidade na carga do pilar, atingem essa carga.

Apesar da ruptura dos espécimes PVxy-1,0-1 e PVxy-1,0-2 está localizada no pilar superior, a análise dos dados revela que devido a força $F_{s,viga}$ ter ultrapassado o valor da força de escoamento de 58,2 kN da barra, a ruptura no nó estaria próxima. O espécime PVxy-1,0-1, por apresentar um maior número de extensômetros nesta condição, estava mais próximo dessa ruptura do que o PVxy-1,0-2.

No espécime PVxy-0,5-2, todas as curvas têm comportamento semelhante, porém o SG-10 apresenta uma curva menos inclinada. Esse comportamento no nó se deve a pouca influência da força provocada pelo binário do momento na viga e pela baixa taxa de armadura na mesma.

No PVxy-1,0-1 até a carga aplicada no pilar superior de 800kN: as curvas dos extensômetros da interface pilar-viga, SG-05 e 22, são semelhantes; os extensômetros da interface pilar-viga, SG-05, 06 e 22, têm acréscimos de força maior do que os extensômetros do nó, SG-09, 10 e 26; os extensômetros dentro do nó tem comportamento semelhante.

Após a força aplicada atingir 800kN, momento em que a armadura comprimida do pilar atinge a deformação de escoamento, conforme indica o F_{y13} visto na Tabela 5.3, o SG-09 apresenta um grande acréscimo de força até a carga do pilar atingir 1000kN e a curva do SG-09 se sobrepõe à do SG-05.

No PVxy-1,0-2, após o carregamento das vigas, as curvas dos extensômetros no lado da excentricidade, SG-05, 09 e 22, iniciam em um mesmo ponto, enquanto os demais extensômetros iniciam em um outro mesmo

ponto, só que com valor maior. No entanto, até 800kN o SG-09 apresenta um maior incremento na força, pois as forças nas vigas afetam o confinamento na parte tracionada do nó. Após essa carga, os extensômetros SG-05 e 22 apresentam uma maior inclinação da curva até se encontrar com a curva do SG-09 próximo a carga de ruptura.

Armadura positiva

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam as curvas da força aplicada no pilar – acréscimo de deformação $\Delta\varepsilon_s$, resultante da aplicação de carga no pilar após o carregamento da viga. Os extensômetros monitorados são o SG-07, 08 e 24 (interface viga-pilar) e os extensômetros SG-11, 12 e 28 (região dentro do nó).

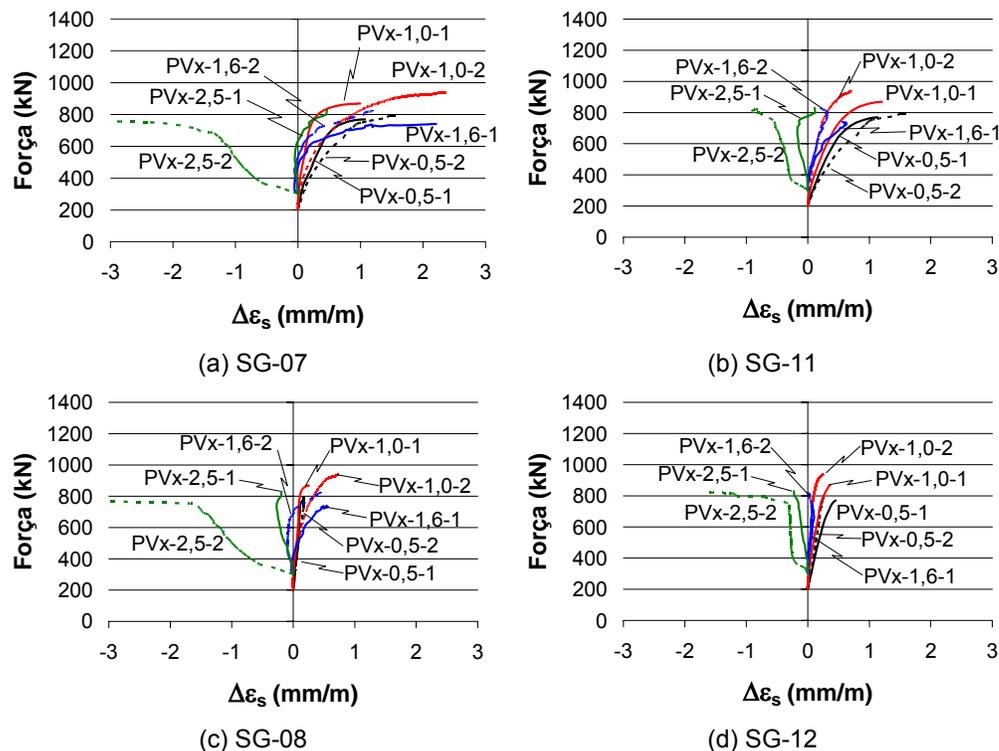


Figura 5.10 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal positiva da viga após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVx: (a) SG-07; (b) SG-11; (c) SG-08; (d) SG-12.

Nos espécimes PVx, quanto menor a força de compressão gerada pelo momento aplicado na viga, maior é a expansão do nó. Essa expansão é maior no lado em que a força excêntrica é aplicada no pilar e apresenta incrementos maiores após a armadura de compressão do pilar atingir o valor da deformação de escoamento da barra de aço.

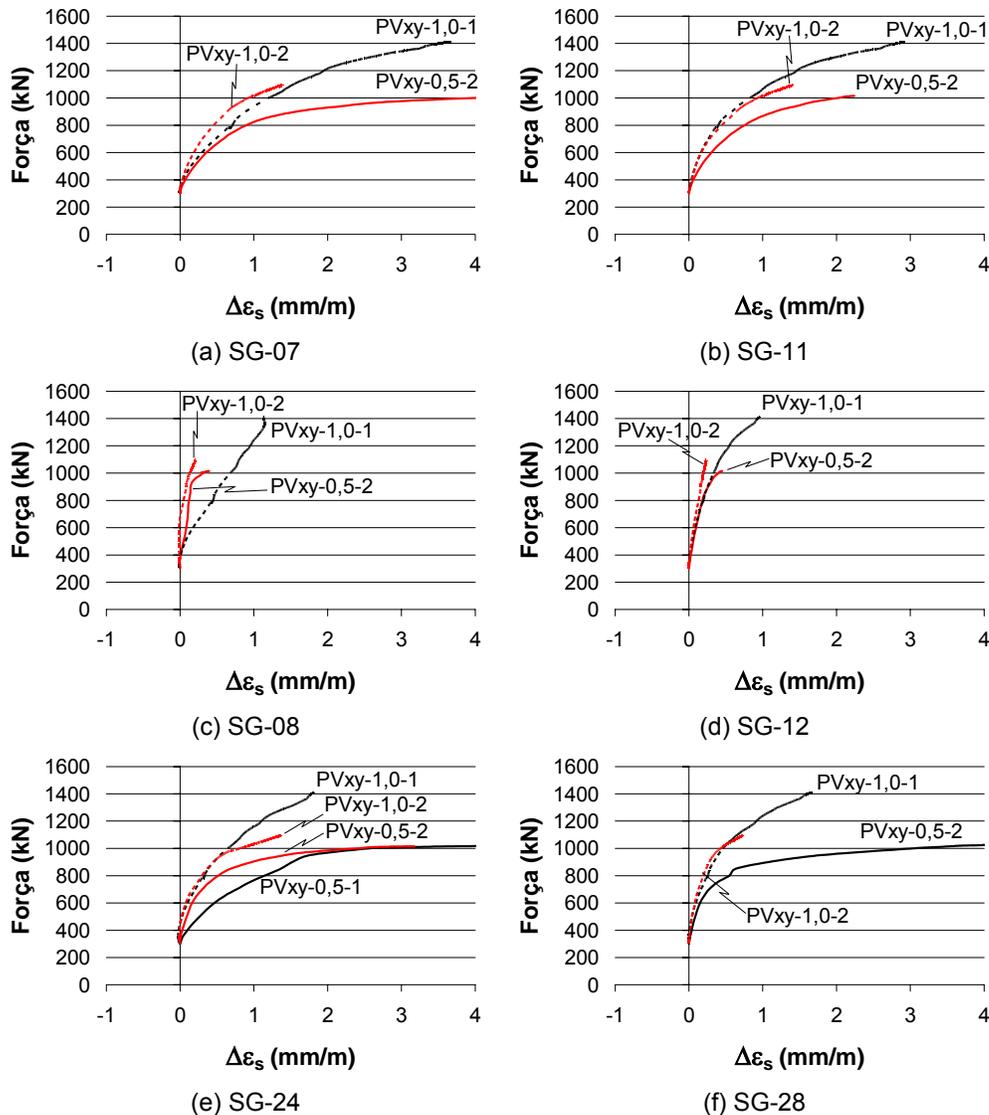


Figura 5.11 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal positiva da viga após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVxy: (a) SG-07; (b) SG-11; (c) SG-08; (d) SG-12; (e) SG-24 e (f) SG-28.

Comparando um espécime PVxy com $\rho = 0,5\%$ com outro com $\rho = 1,0\%$, para uma mesma deformação na armadura, o primeiro apresenta um incremento de deformação maior. Essa diferença tende a ser maior para os extensômetros SG-07, 11 e 24 (lado da aplicação da carga excêntrica no pilar) e quando a deformação inicial do espécime é de $\varepsilon_s = 1,0\text{mm/m}$, em comparação ao de $\varepsilon_s = 2,0\text{mm/m}$.

Os espécimes com a mesma taxa de armadura da viga e com diferentes deformações iniciais dessa armadura, com exceção do SG-08 quando $\rho = 1,0\%$ e o SG-24 quando $\rho = 0,5\%$, apresentam curvas muito próximas.

Para os espécimes com deformação inicial de $\varepsilon_s=1,0\text{mm/m}$ os extensômetros da interface viga-pilar, SG-07, 08 e 24, apresentam maior incremento de deformação do que os da região dentro do nó, SG-11, 12 e 28, sendo estes paralelos. No caso de $\varepsilon_s=2,0\text{mm/m}$, esses incrementos de deformação são iguais.

5.3.2.2. Armadura longitudinal do pilar

A Figura 5.12 apresenta a posição dos extensômetros na armadura longitudinal do pilar. A curva força–acréscimo de deformação $\Delta\varepsilon_s$, obtido nesses extensômetros é visto nas Figuras 5.13 e 5.14 para os espécimes PVx e PVxy, respectivamente.

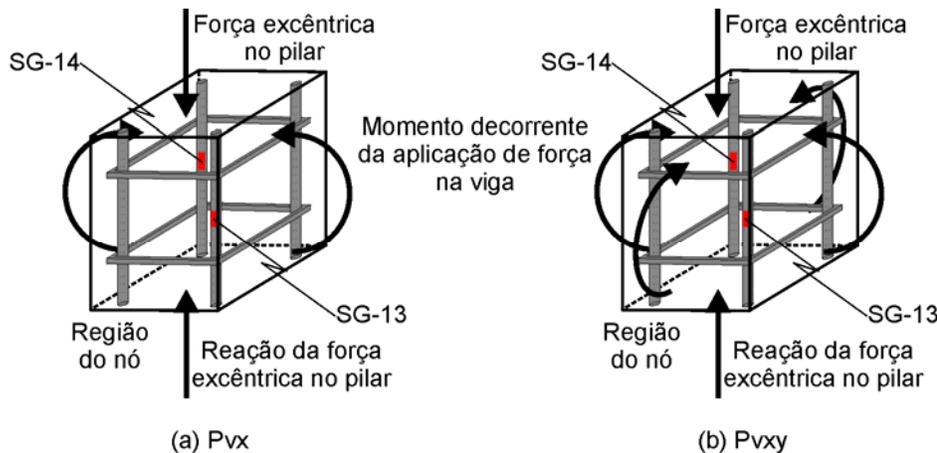


Figura 5.12 – Posição dos extensômetros na armadura longitudinal do pilar.

Conforme visto na Tabela 5.1, sob cargas equivalentes a 84%, 78%, 78%, 72% e 80% da carga de ruptura, os espécimes PVx-1,0-1, PVx-1,0-2, PVx-1,6-2, PVx-2,5-1 e PVx-2,5-2 apresentam o valor da deformação do SG-13 igual à deformação de escoamento da barra. Uma vez que a face do nó no sentido da carga excêntrica no pilar não é confinada por viga, os valores da força em que o SG-13 indica o escoamento da barra são próximos ao da carga de ruptura e não apresenta variação com o aumento da armadura de flexão da viga, conforme visto na Figura 5.13 (a).

Na Figura 5.13 (b) dois grupos apresentam as curvas do SG-14 paralelas até a força aplicada no pilar atingir a força em que o SG-13 indica o escoamento da barra. O primeiro grupo é formado pelos espécimes PVx-0,5-1, PVx-1,0-1 e PVx-2,5-1 e o segundo pelos espécimes PVx-0,5-2, PVx-1,0-2, PVx-1,6-2 e PVx-2,5-2. Após o SG-13 atingir o escoamento da barra, com exceção dos PVx-0,5-

1, PVx-1,0-1 e PVx-1,0-2, todos os demais espécimes começam a reduzir o valor do incremento de deformação de compressão do SG-14 até que esses incrementos se tornam incrementos de tração.

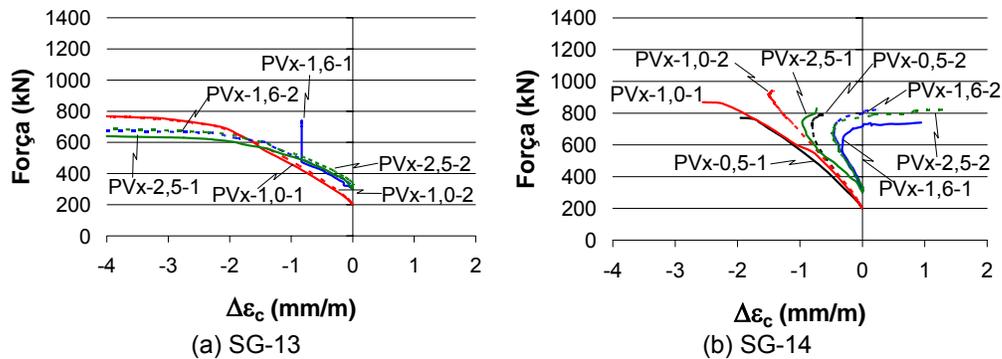


Figura 5.13 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal do pilar após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVx: (a) SG-13; (b) SG-14.

Na Figura 5.14 (a) o SG-13 dos espécimes PVxy-0,5-1, PVxy-0,5-2, PVxy-1,0-1 e PVxy-1,0-2 escoam com 69%, 63%, 60% e 85% da carga de ruptura dos mesmos, respectivamente. Na Figura 5.14 (b) somente o PVxy-1,0-1 apresenta patamar de escoamento no SG-14 para o valor da força aplicada inferior a carga de ruptura. Esse fato indica que o nó como um todo suporta deformações maiores do que os espécimes PVx antes da ruptura, devido ao confinamento proporcionado pelas vigas.

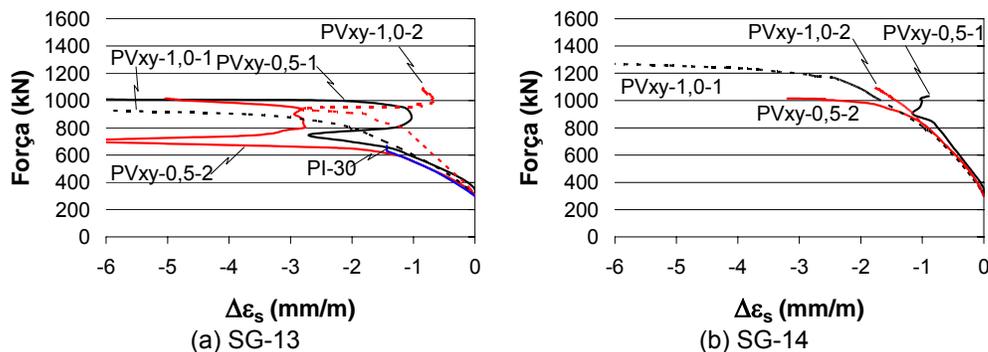


Figura 5.14 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal do pilar após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVxy: (a) SG-13; (b) SG-14.

Nos espécimes PVxy a ruptura no nó teve como característica o aumento da deformação do SG-14 após o escoamento do SG-13, sem que necessariamente o SG-14 atingisse a deformação de escoamento. A inclinação da reta do SG-14 após esse ponto é maior para os espécimes com viga com $\rho = 0,5\%$ do que nos espécimes com $\rho = 1,0\%$, contudo antes desse ponto todos os espécimes apresentam valores próximos.

No PVxy-1,0-1 o SG-13 e SG-14 apresentam deformações superiores a de escoamento e no PVxy-1,0-2 o SG-14 segue o mesmo comportamento do PVxy-1,0-1 até a ruptura prematura no pilar.

5.3.2.3. Estribos no nó

A posição dos extensômetros nos estribos do nó é observada na Figura 5.15. As curvas força–acrésimo de deformação $\Delta\varepsilon_s$ desses extensômetros nos espécimes PVx e PVxy são apresentados nas Figuras 5.16 e 5.17, respectivamente. Em ambos os espécimes os estribos começam a ser solicitados após a força aplicada no pilar provocar o escoamento da armadura longitudinal do pilar.

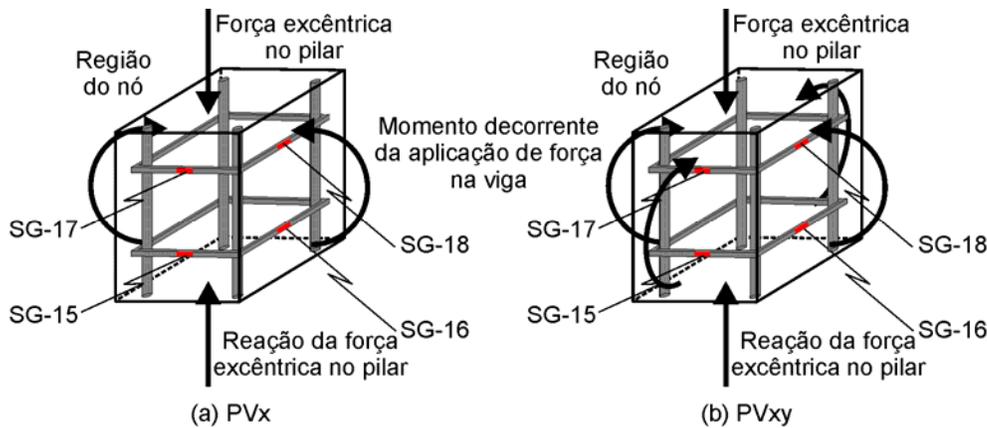


Figura 5.15 – Posição dos extensômetros dos estribos no nó.

Nos espécimes PVx, os extensômetros SG-15 e SG-17 apresentam os maiores acréscimos de deformação até a armadura longitudinal do pilar atingir a deformação de escoamento. Nesses dois extensômetros, na maioria dos casos, não há diferença entre as curvas dos espécimes com deformação inicial da armadura tracionada da viga de 1mm/m e 2mm/m.

Os extensômetros SG-16 e SG-18 apresentam curvas parecidas até o momento em que a armadura longitudinal do pilar atinge a deformação de escoamento. Contudo, o SG-18 apresenta os menores valores do acréscimo de deformação entre todos os extensômetros, pois a área do nó comprimida pelo momento aplicado na viga atua nessa região. Os espécimes com deformação inicial na armadura da viga de 1mm/m apresentam maiores incrementos de deformação, pois a força de compressão gerada pelo momento aplicado na viga é menor do que a obtida para a deformação inicial de 2mm/m.

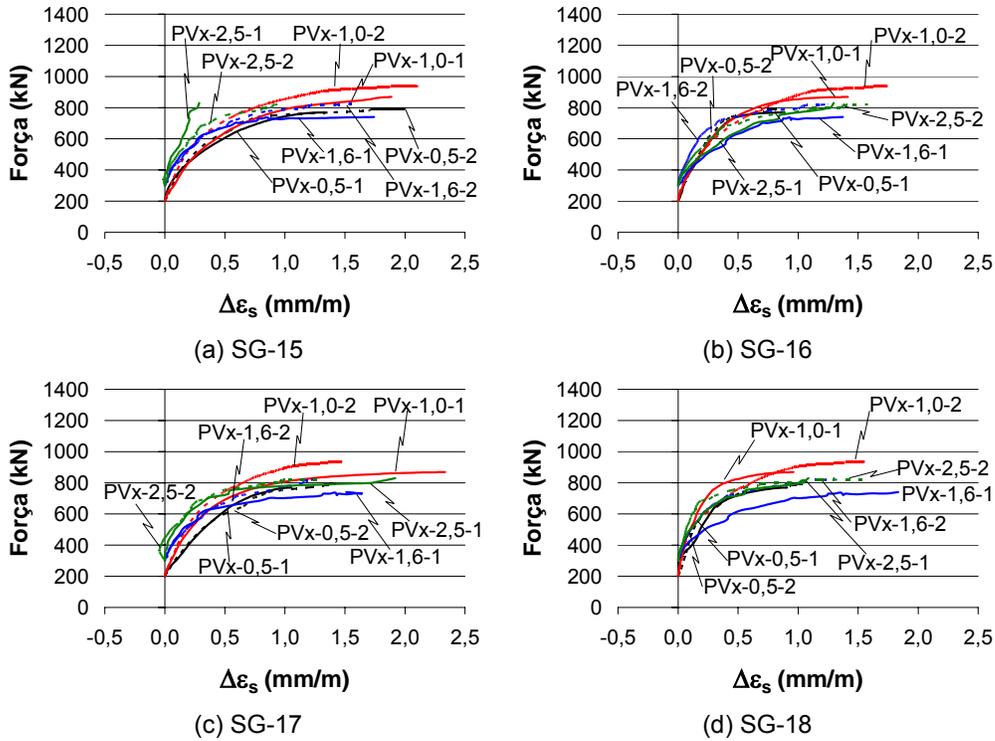


Figura 5.16 – Curvas força–deformação dos estribos após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVx: (a) SG-15; (b) SG-16; (c) SG-17; (d) SG-18.

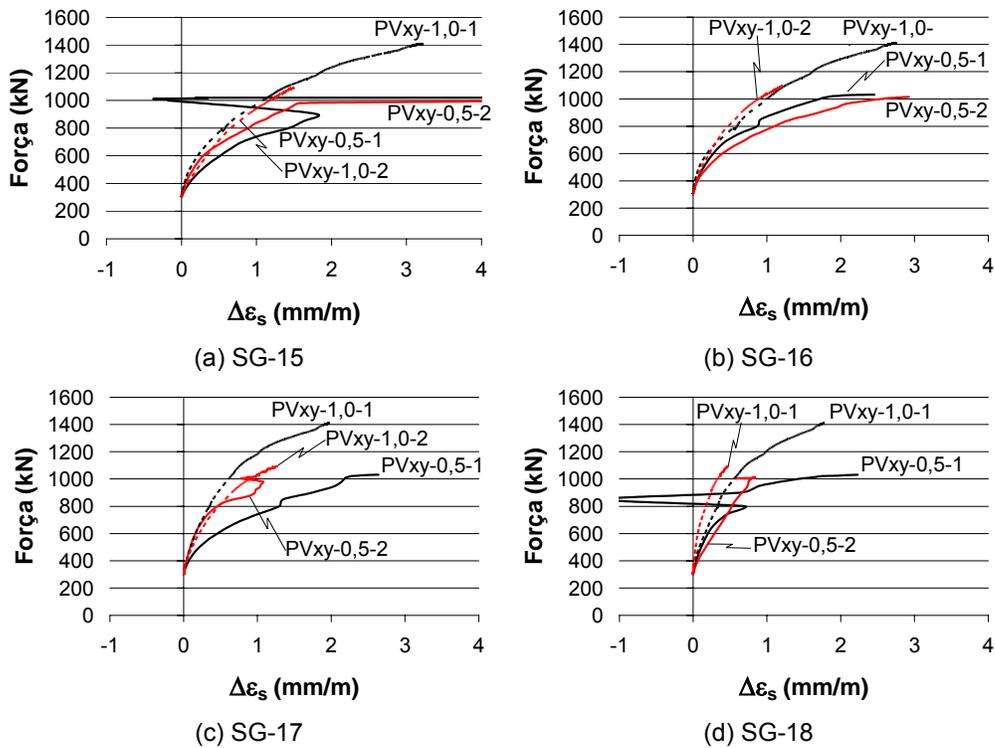


Figura 5.17 – Curvas força–deformação dos estribos após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVxy: (a) SG-15; (b) SG-16; (c) SG-17; (d) SG-18.

Nos espécimes PVxy, os extensômetros SG-15 e SG-16 apresentam maiores incrementos de deformação do que o SG-17 e SG-18, respectivamente, porque os primeiros estão localizados na parte tracionada do nó enquanto os outros estão na parte comprimida.

Com exceção do SG-17, nos demais extensômetros observa-se que os espécimes PVxy com viga com $\rho = 1,0\%$ apresentam menor incremento de deformação. Isso acontece por possuírem uma maior taxa de armadura longitudinal da viga atravessando o nó, diminuindo assim as tensões transversais resistidas pelos estribos nessa região. Outra justificativa é a maior força de compressão imposta na parte comprimida do nó.

O espécime PVxy-1,0-1 alcançou valores de incrementos de deformação de tração de 3,2 mm/m e 2,9 mm/m nos extensômetros SG-15 e SG-16, respectivamente, o que expõe que a parte tracionada do nó estaria submetida a um grande nível de expansão lateral.

De uma forma geral, os estribos só começam a ser solicitados quando a armadura de compressão do pilar atinge o escoamento. Se os gráficos do PVx e PVxy forem apresentados na mesma escala, sobrepondo um ao outro o resultado é que os incrementos de deformação no estribo têm valores próximos até o escoamento da armadura mais comprimida do pilar. Depois desse ponto os incrementos de deformação para um mesmo intervalo de carregamento são menores nos espécimes PVxy devido ao confinamento pelas vigas.

5.4.Deslocamentos

A posição dos transdutores de deslocamento utilizada na análise é apresentada na Figura 5.18.

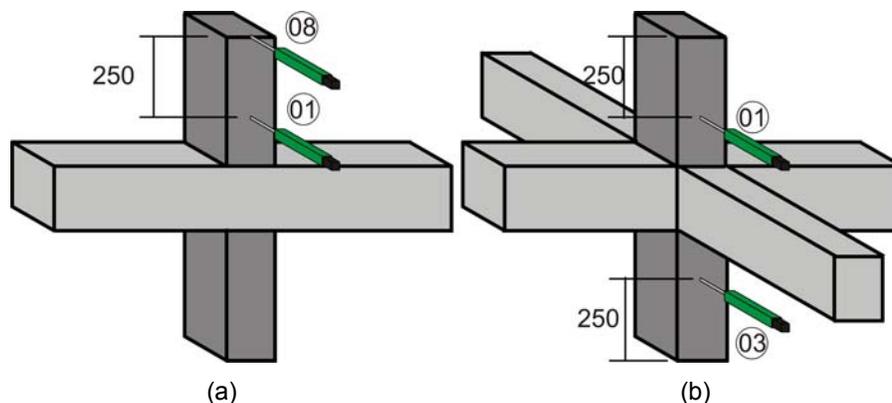


Figura 5.18 – Posicionamento dos transdutores de deslocamentos (medidas em mm): (a) Pilar com viga em uma direção, (b) Pilar com viga nas duas direções.

As Figuras 5.19 e 5.20 apresentam os gráficos da força aplicada no pilar-acréscimo do deslocamento lateral do pilar $\Delta\delta$, resultante da aplicação de carga no pilar após o carregamento da viga, nos espécimes PVx e PVxy, respectivamente. Os valores dos acréscimos dos deslocamentos nos transdutores de deslocamento TDs 2 e 3 nos espécimes com viga em uma direção não são apresentadas, pois os seus valores apresentaram pouca variação.

Os TDs 1 e 8 são usadas para monitorar os espécimes PVx e o TD 1 e TD 3 monitoram os espécimes PVxy. Os TDs 1 e 3 estavam localizadas respectivamente a 750mm e 250mm da extremidade inferior do pilar, já o TD 8 estava posicionada no ponto de aplicação da força no pilar.

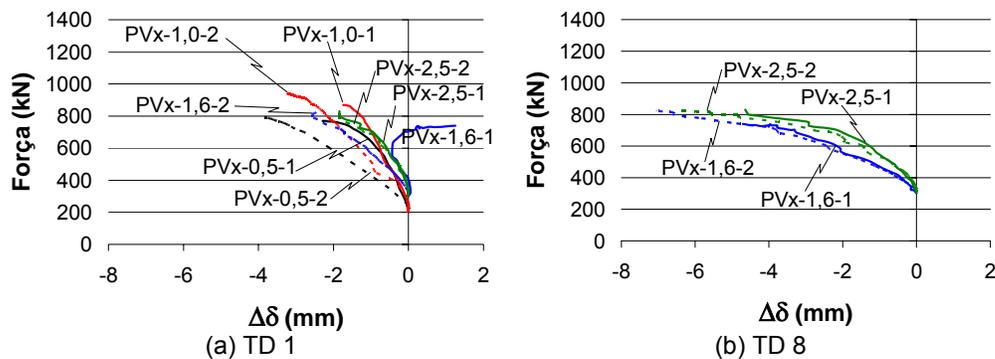


Figura 5.19 – Curvas força–deslocamento lateral das réguas lineares de deslocamento nos espécimes com vigas em uma direção: (a) TD 1; (b) TD 8.

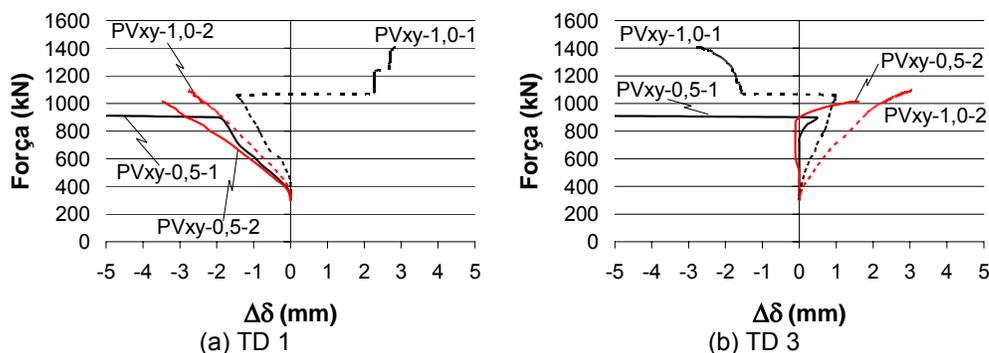


Figura 5.20 – Curvas força–deslocamento lateral das réguas lineares de deslocamento nos espécimes com vigas nas duas direções: (a) TD 1; (b) TD 3.

Na maioria dos casos o TD 1 apresenta os maiores valores do acréscimo de deslocamento nos espécimes com deformação inicial igual a 2mm/m. Somente nos espécimes com a viga com $\rho = 1,6\%$ e com $\rho = 2,5\%$, há uma maior inclinação da curva após a armadura longitudinal do pilar alcançar a

deformação de escoamento, sendo que o PVx-1,6-1 é o único TD que muda de sentido após esse ponto.

O TD 8 não apresenta diferença entre os valores obtidos nos espécimes com deformação inicial de 1mm/m e 2mm/m. Apesar de todas as curvas estarem próxima, o acréscimo de deslocamento é menor nos espécimes com vigas com $\rho = 2,5\%$.

Na Figura 5.20 o TD 1 apresenta acréscimo de deslocamento maior nos espécimes PVxy-0,5-1 e PVxy-0,5-2, do que nos seus respectivos pares PVxy-1,0-1 e PVxy-1,0-2. No TD 3 não há acréscimos significativos no deslocamento dos espécimes PVxy-0,5-1 e PVxy-0,5-2 até a carga de 800 kN, enquanto no PVxy-1,0-1 e PVxy-1,0-2 os acréscimos do TD 3 são simétricos ao TD 1. Em ambos os TDs o PVxy-1,0-2 apresenta maior acréscimo de deslocamento em comparação ao PVxy-1,0-1.

O fato de que entre os espécimes PVx somente os TDs 1 e 8 apresentam alguma variação nos seus valores durante o ensaio indica que com o esmagamento do concreto no lado mais comprimido do nó, somente o pilar superior rotaciona. Esse fato também é observado nos espécimes PVxy-0,5-1 e PVxy-0,5-2, que também apresentam ruptura no nó.

5.5.Comparação entre as resistências efetivas experimentais e estimadas

O procedimento utilizado para estimar a resistência efetiva dos espécimes consiste em achar a posição da linha neutra com base nos valores da força $F_{u,pil.sup.}$ aplicada no pilar superior no momento da ruptura e da excentricidade inicial somada à de segunda ordem, e_{total} . Ao analisar as tensões que estão atuando na seção do pilar se obtém a resistência efetiva no teste $f_{ce,Teste}$.

Nos espécimes que romperam no nó adotou-se que $e_c=e_{cu}=0,0035$ e quando a ruptura ocorreu no pilar superior utilizou-se $e_c=e_{cu}=0,0025$, visto que a deformação última para concretos com alta resistência é menor do que em concretos com resistência normal. O valor adotado do coeficiente α_1 é igual a 1,00 visto que o ensaio é de curta duração e a diferença entre a resistência à compressão dos corpos de prova e do espécime é desprezível.

Os valores da resistência efetiva obtidos experimentalmente são apresentados na Tabela 5.5, junto aos valores da resistência à compressão do concreto utilizado no pilar e na viga, dos dados utilizados nos cálculos e do modo

de ruptura M. R.. Os cálculos das resistências efetivas dos espécimes realizados pelo programa Maple 10 são apresentados no Anexo G.

Tabela 5.5 – Dados da resistência efetiva obtida nos testes.

Nome	$f_{c,pil.sup.}$ (MPa)	$f_{c,viga}$ (MPa)	e_{total} (mm)	$F_{u,pil.sup.}$ (kN)	M (kN.m)	x (mm)	$f_{ce,Teste}$ (MPa)	M. R.
PVx-0,5-1	71,1	32,7	18	780,8	14,1	147	38,0	Nó
PVx-0,5-2	71,1	32,7	22	792,5	17,4	137	42,0	Nó
PVx-1,0-1	79,4	33,8	19	868,1	16,5	144	44,0	Nó
PVx-1,0-2	79,4	33,8	22	937,8	20,6	136	51,2	Nó
PVx-1,6-1	79,6	32,1	25	740,3	18,5	129	41,7	Nó
PVx-1,6-2	79,6	32,1	24	824,6	19,8	131	46,3	Nó
PVx-2,5-1	79,6	32,1	20	830,2	16,6	141	42,8	Nó
PVx-2,5-2	79,6	32,1	22	821,5	18,1	136	44,1	Nó
PVxy-0,5-1	71,1	30,3	18*	1032,0	18,6	146	52,6	Nó
PVxy-0,5-2	71,1	30,3	21	1014,6	21,3	138	55,0	Nó
PVxy-1,0-1	81,9	31,7	10	1408,5	14,1	165	73,8	Pilar
PVxy-1,0-2	81,9	31,7	22	1093,1	24,0	135	63,0	Pilar

*Valor estimado devido à retirada dos transdutores de deslocamento na carga de 900kN.

Os valores experimentais da resistência efetiva de todos os espécimes são comparados com os valores encontrados ao utilizar os métodos de cálculo de Bianchini *et al* (1960), CEB-FIP (1990), CSA23.3-94 (1994), Siao (1994) e Freire (2003). Os métodos de Shu e Hawkins (1992), Subramanian (2006) e Quirke *et al.* (2006) são utilizados somente para os espécimes com viga em uma direção.

Todos os dados referentes à comparação entre os métodos de cálculo são apresentados na Tabela 5.6.

A Figura 5.21 apresenta os valores médios da razão $f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$ entre a resistência efetiva experimental e teórica.

Os métodos de cálculo de Bianchini *et al* (1960) e CSA23.3-94 (1994) levam em consideração os valores da resistência à compressão do concreto do pilar e da viga. Estes métodos, com exceção dos espécimes PVxy para o método de Bianchini *et al* (1960), apresentam os maiores valores da razão $f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$.

Os métodos que levam em consideração a influência da armadura que atravessa o nó são o da norma CEB-FIP (1990) e de Siao (1994). Nestes métodos os valores da razão $f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$ são inferiores a 1,0 e somente a norma CEB-FIP (1990) estima os valores experimentais dos espécimes PVxy de forma mais precisa.

Nos demais métodos, com exceção do método de Quirke *et al.* (2006), praticamente todos os valores encontrados para $f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$ são próximos a 1,0. Sendo que o método de Freire (2003) é o único a ser utilizado nos pilares internos (PVxy) e de borda (PVx).

Tabela 5.6 – Dados obtidos dos métodos de cálculo para pilar com viga em uma direção.

Nome		Bianchini <i>et al.</i> (1960)	CEB-FIP (1990)	Shu e Hawkins (1992)	CSA23.3-94 (1994)	Siao (1994)	Freire (2003)	Subramanian (2006)	Quirke <i>et al.</i> (2006)
PVx-0,5-1	$f_{ce,mét.cálc}$ (MPa)	32,7	47,0	42,5	32,7	45,9	44,3	40,1	46,6
	$f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$	1,16	0,81	0,90	1,16	0,83	0,86	0,95	0,81
PVx-0,5-2	$f_{ce,mét.cálc}$ (MPa)	32,7	47,0	42,5	32,7	45,9	44,3	40,1	46,6
	$f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$	1,28	0,89	0,99	1,28	0,92	0,95	1,05	0,90
PVx-1,0-1	$f_{ce,mét.cálc}$ (MPa)	33,8	52,1	46,0	33,8	54,5	47,8	42,2	49,4
	$f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$	1,30	0,84	0,96	1,30	0,81	0,92	1,04	0,89
PVx-1,0-2	$f_{ce,mét.cálc}$ (MPa)	33,8	52,1	46,0	33,8	54,5	47,8	42,2	49,4
	$f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$	1,52	0,98	1,11	1,52	0,94	1,07	1,21	1,04
PVx-1,6-1	$f_{ce,mét.cálc}$ (MPa)	32,1	55,8	44,1	32,1	64,4	45,8	40,3	47,2
	$f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$	1,30	0,75	0,94	1,30	0,65	0,91	1,03	0,88
PVx-1,6-2	$f_{ce,mét.cálc}$ (MPa)	32,1	55,8	44,1	32,1	64,4	45,8	40,3	47,2
	$f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$	1,44	0,83	1,05	1,44	0,72	1,01	1,15	0,98
PVx-2,5-1	$f_{ce,mét.cálc}$ (MPa)	32,1	63,6	44,1	32,1	80,1	45,8	40,3	47,2
	$f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$	1,33	0,68	0,97	1,33	0,53	0,93	1,06	0,91
PVx-2,5-2	$f_{ce,mét.cálc}$ (MPa)	32,1	63,6	44,1	32,1	80,1	45,8	40,3	47,2
	$f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$	1,37	0,70	1,00	1,37	0,55	0,96	1,09	0,94
PVxy-0,5-1	$f_{ce,mét.cálc}$ (MPa)	64,7	54,8	–	49,6	65,1	53,8	–	–
	$f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$	0,81	0,96	–	1,06	0,81	0,98	–	–
PVxy-0,5-2	$f_{ce,mét.cálc}$ (MPa)	64,7	54,8	–	49,6	65,1	53,8	–	–
	$f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$	0,85	1,00	–	1,11	0,85	1,02	–	–
PVxy-1,0-1	$f_{ce,mét.cálc}$ (MPa)	73,3	71,4	–	53,8	81,9	58,1	–	–
	$f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$	1,01	1,03	–	1,37	0,90	1,27	–	–
PVxy-1,0-2	$f_{ce,mét.cálc}$ (MPa)	73,3	71,4	–	53,8	81,9	58,1	–	–
	$f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$	0,86	0,88	–	1,17	0,77	1,08	–	–
PVx	Máximo	1,52	0,98	1,11	1,52	0,94	1,07	1,21	1,04
	Mínimo	1,16	0,68	0,90	1,16	0,53	0,86	0,95	0,81
	Média	1,34	0,81	0,99	1,34	0,74	0,95	1,07	0,92
	Coef. Var.	8,0	12,6	6,8	8,0	21,0	6,9	7,4	7,3
PVxy	Máximo	1,01	1,03	–	1,37	0,90	1,27	–	–
	Mínimo	0,81	0,88	–	1,06	0,77	0,98	–	–
	Média	1,11	0,97	–	1,18	0,83	1,09	–	–
	Coef. Var.	9,7	6,8	–	11,6	6,8	11,8	–	–
Todos	Máximo	1,53	1,03	–	1,52	0,94	1,27	–	–
	Mínimo	0,81	0,68	–	1,06	0,53	0,86	–	–
	Média	1,19	0,86	–	1,29	0,77	1,00	–	–
	Coef. Var.	20,6	13,7	–	10,6	17,5	10,9	–	–

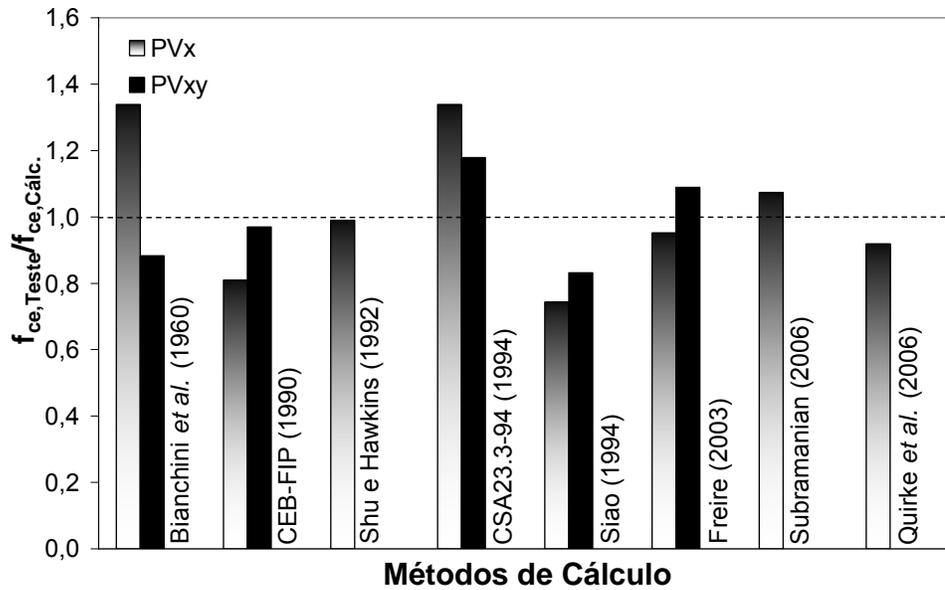


Figura 5.21 – Gráfico dos valores de $f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$ considerando a carga de ruptura igual a $F_{u,pil.sup.}$.

Ao adotar que nos casos onde a ruptura ocorre no nó, a carga de ruptura é igual ao valor da força de reação $F_{u,pil.inf.}$, que atua no pilar inferior, a estimativa da resistência efetiva $f_{ce,Teste}$ passa a ser mais conservativa. A Tabela 5.7 apresenta os valores calculados dessas resistências efetivas e a Figura 5.22 apresenta os valores médios da razão $f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$ entre a resistência efetiva experimental e teórica considerando a carga de ruptura igual a $F_{u,pil.inf.}$.

Tabela 5.7 – Dados da resistência efetiva obtida nos testes considerando a carga de ruptura igual a $F_{u,pil.inf.}$.

Nome	$f_{c,pil.sup.}$ (MPa)	$f_{c,viga}$ (MPa)	e_{total} (mm)	$F_{u,pil.inf.}$ (kN)	M (kN.m)	x (mm)	$f_{ce,Teste}$ (MPa)	M. R.
PVx-0,5-1	71,1	32,7	18	745,4	14,1	145	36,6	Nó
PVx-0,5-2	71,1	32,7	22	739,2	17,4	133	40,1	Nó
PVx-1,0-1	79,4	33,8	19	816,8	16,5	141	42,0	Nó
PVx-1,0-2	79,4	33,8	22	857,5	20,6	131	48,4	Nó
PVx-1,6-1	79,6	32,1	25	648,0	18,5	122	38,3	Nó
PVx-1,6-2	79,6	32,1	24	649,9	19,8	118	40,1	Nó
PVx-2,5-1	79,6	32,1	20	693,6	16,6	132	37,6	Nó
PVx-2,5-2	79,6	32,1	22	515,1	18,1	109	34,0	Nó
PVxy-0,5-1	71,1	30,3	18*	977,3	18,6	143	50,7	Nó
PVxy-0,5-2	71,1	30,3	21	906,1	21,3	132	51,0	Nó

*Valor estimado devido à retirada dos transdutores de deslocamento na carga de 900kN no pilar superior.

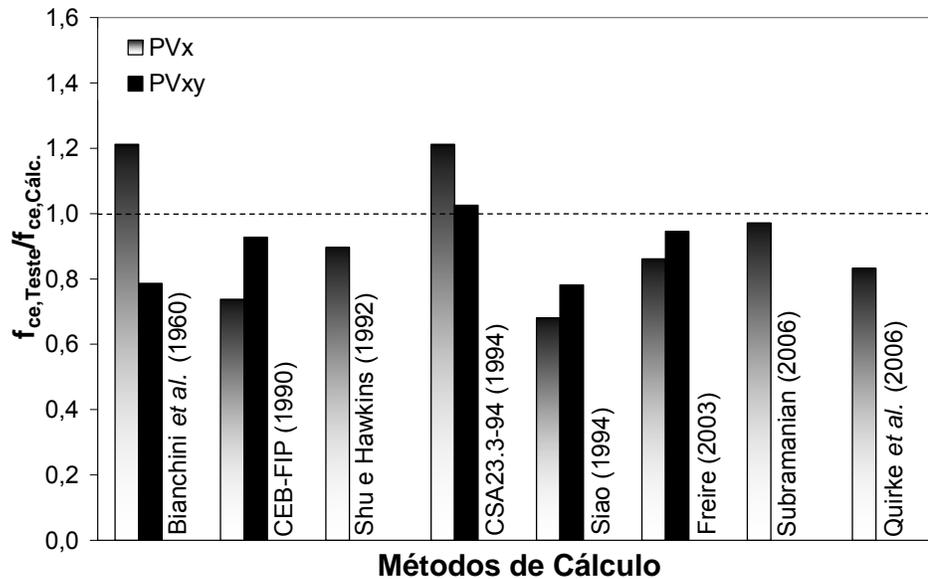


Figura 5.22 – Gráfico dos valores de $f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc.}$ considerando a carga de ruptura igual a $F_{u,pil.inf.}$.

Os métodos de cálculo apresentados na Figura 5.22 seguem a mesmo comportamento da razão $f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc.}$ visto na Figura 5.21, porém com valores da razão $f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc.}$ reduzidos em aproximadamente 0,1.

5.6.Considerações quanto ao estado limite último teórico

Em todos os pilares ensaiados, os domínios de deformação correspondentes ao estado limite último foram os domínios 4 ou 5 tal como definidos na NBR6118:2003. No domínio 5 a deformação no ponto localizado a $3h/7$ da face mais comprimida da seção é limitada ao valor de 2‰.

Com os valores dos pares de extensômetros do aço ou do concreto situados no nó, em lados opostos e equidistantes do eixo do pilar, a deformação a 64mm ($150 \times 3/7 = 64$) da face mais comprimida pode ser calculada por semelhança de triângulos. Quando esta deformação é igual a 2‰, o espécime alcançou o seu estado limite último e a força F_{ELU} aplicada no pilar neste instante é encontrado.

O procedimento utilizado para estimar a resistência efetiva dos espécimes no estado limite último, $f_{ce,ELU}$, consiste em achar a posição da linha neutra com base nos valores da força F_{ELU} que representa a excentricidade inicial somada à de segunda ordem.

A distribuição de tensões no concreto é considerada como um retângulo de altura $0,8 \cdot x$ (onde x é a profundidade da linha neutra), com a tensão igual a

$f_{ce,ELU}$. As forças nas armaduras longitudinais do pilar são obtidas a partir da deformação específica da barra.

As Figuras 5.23 e 5.24 apresentam os gráficos da comparação entre a resistência efetiva calculada na ruptura (utilizada nos métodos de cálculo da literatura) e a resistência efetiva dos espécimes no estado limite último para os espécimes PVx e PVxy, respectivamente. O programa Maple 10 foi utilizado para o cálculo da resistência efetiva no estado limite último, conforme mostrado no Anexo H. Em alguns casos, na ruptura a resistência efetiva chega a ser duas vezes o valor da resistência no estado limite último.

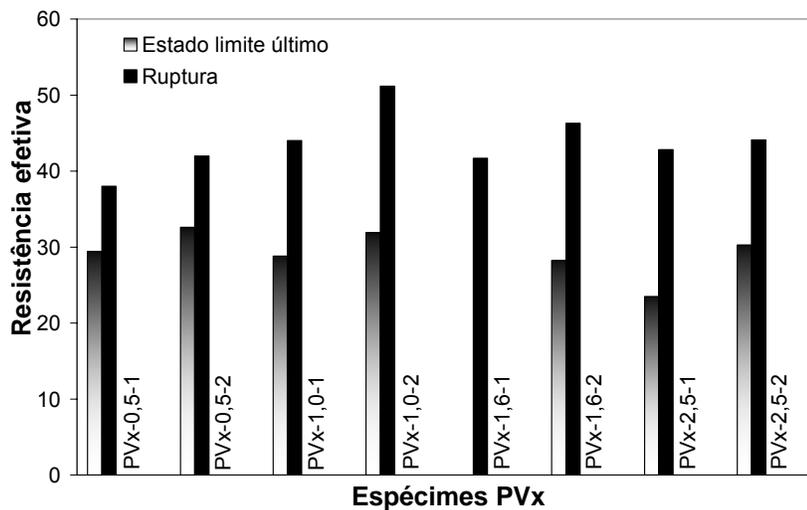


Figura 5.23 – Gráfico comparativo entre as resistências efetivas no estado limite último e na ruptura dos espécimes PVx.

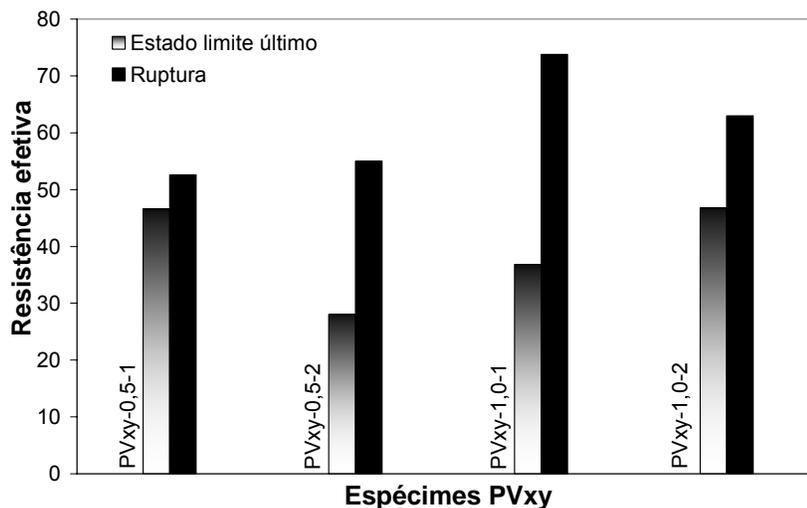


Figura 5.24 – Gráfico comparativo entre as resistências efetivas no estado limite último e na ruptura dos espécimes PVxy.

A Figura 5.25 apresenta os valores médios da razão $f_{ce,ELU}/f_{ce,mét.cálc.}$ entre a resistência efetiva no estado limite último e teórica.

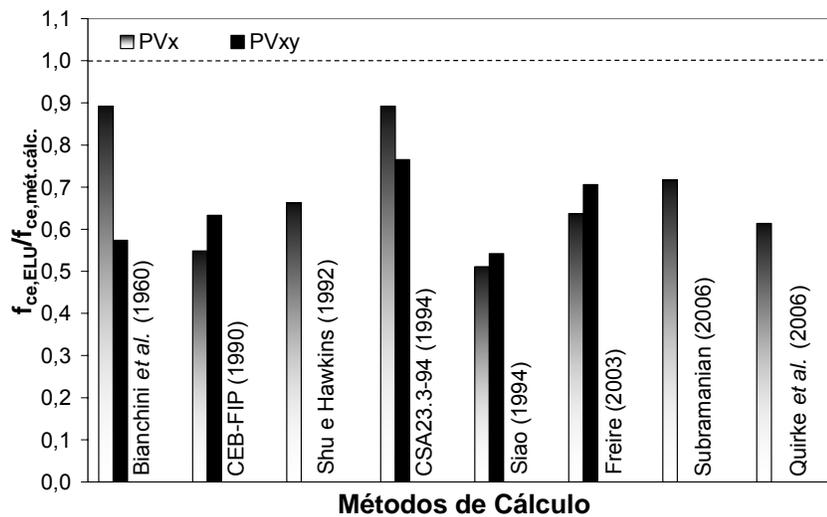


Figura 5.25 – Gráfico dos valores de $f_{ce,ELU}/f_{ce,mét.cálc.}$.

Os métodos de cálculo de Bianchini *et al.* (1960) e CSA23.3-94 (1994) utilizados nos espécimes PVx apresentaram valores da relação $f_{ce,ELU}/f_{ce,mét.cálc.}$ mais próximos a 1. Isso se deve ao fato de adotarem o valor da resistência efetiva a resistência à compressão do concreto da viga, contudo a resistência efetiva no estado limite último foi inferior a esse valor. Nos demais métodos os valores médios da relação $f_{ce,ELU}/f_{ce,mét.cálc.}$ ficaram abaixo de 0,72.