

Nova Abordagem no Reforço de Estruturas com Materiais Compósitos

Joaquim Barros, José Sena-Cruz, Salvador Dias, Débora Ferreira e Adriano Fortes

DEC, Universidade do Minho

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se os resultados mais significativos da investigação experimental realizada para avaliar o desempenho de uma técnica de reforço baseada na fixação de laminados de CFRP em ranhuras efectuadas no betão de recobrimento de elementos estruturais. Com esta técnica foram reforçados e ensaiados elementos de pilar e de viga de betão armado com rotura por flexão, e vigas de betão armado com rotura por corte. De modo a caracterizar a ligação betão-adesivo-CFRP procedeu-se à realização de ensaios de aderência.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de polímeros reforçados com fibras (FRP) na reparação e reforço estrutural tem aumentado continuamente nos últimos anos. Para tal não é alheio o facto de, em comparação com materiais tradicionais, os FRP serem mais leves, de mais fácil e rápida aplicação, mais resistentes à agressividade do meio ambiente e possuírem maior resistência à tracção^[1,2].

Os compósitos de FRP têm sido geralmente aplicados nas faces dos elementos a reforçar utilizando-se uma técnica designada correntemente por colagem externa. Estudos efectuados revelam que, geralmente, esta técnica não permite mobilizar a resistência máxima dos FRP, dado ocorrer o seu descolamento precoce. Além disto, os reforços aplicados ficam expostos directamente à acção do fogo, às condições ambientais e a actos de vandalismo.

Na tentativa de evitar estes inconvenientes tem sido desenvolvida uma técnica baseada na inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento das peças a reforçar. Neste trabalho, esta técnica é aplicada com o objectivo de duplicar a capacidade de carga de vigas de betão armado com rotura por flexão, bem como para aumentar a capacidade de carga de elementos de pilar com rotura por flexão.

Com o objectivo de aumentar a eficácia do reforço ao corte com CFRP, De Lorenzis *et al.*^[3] utilizaram varões de CFRP inseridos em ranhuras efectuadas nas faces verticais de vigas de betão armado, tendo-se verificado que esta técnica de reforço permitiu um aumento significativo da capacidade de carga das vigas. Adoptando-se procedimentos de reforço semelhantes mas, em vez de varões, utilizando faixas de laminado de CFRP inseridas em finos rasgos, foi efectuada uma campanha de ensaios de forma a avaliar a eficácia desta técnica no reforço ao corte de vigas de betão armado.

A justificação do bom desempenho da técnica de reforço baseada na inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento passa pela compreensão dos mecanismos de transferência de forças do CFRP para o betão envolvente. Com vista à caracterização da ligação betão-adesivo-CFRP efectuaram-se ensaios de aderência. A influência do comprimento de aderência no comportamento da ligação foi estudada.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL E TÉCNICA DE REFORÇO

A Tabela 1 resume o programa experimental realizado, indicando os seus principais objectivos. Essencialmente, foram efectuados três grupos de ensaios: um grupo de elementos de pilar e de vigas de betão armado com rotura por flexão, um grupo de vigas de betão armado com rotura por corte e um grupo que engloba ensaios de aderência. Os dois primeiros grupos tiveram como objectivo principal avaliar a eficácia da técnica de

reforço em elementos com rotura por flexão e em elementos com rotura por corte, enquanto que o terceiro teve como finalidade caracterizar a ligação betão-adesivo-CFRP.

A técnica de reforço que se propõe neste trabalho baseia-se nos seguintes procedimentos (ver Figura 1):

- Rasgos de 4 a 5 mm de largura e 12 a 15 mm de profundidade são executados na face dos elementos a reforçar;
 - Os rasgos são limpos com a aplicação de ar comprimido;
 - Os CFRP são limpos com acetona;
 - Adesivo epoxi é produzido segundo as recomendações do fabricante;
 - Os rasgos são preenchidos com o adesivo;
 - Adesivo é aplicado nas faces dos CFRP;
 - Os CFRP são introduzidos nos rasgos retirando-se o adesivo em excesso.
- O período de cura do adesivo foi de, pelo menos, cinco dias.

3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Na Tabela 2 apresentam-se os resultados dos ensaios efectuados para caracterizar os betões e os aços utilizados. A resistência média à compressão do betão, f_{cm} , foi obtida por intermédio da realização de ensaios de compressão uniaxial realizados em cilindros. A resistência média à tracção em flexão, $f_{ctm,fl}$, foi obtida por intermédio de ensaios de flexão efectuados segundo as recomendações da RILEM^[4].

Para caracterizar as armaduras utilizadas foram efectuados ensaios de tracção uniaxial segundo a EN 10002-1, sendo cada valor apresentado a média de três ensaios.

De acordo com o fabricante, os constituintes do sistema de manta de CFRP utilizados no reforço ao corte das vigas têm as propriedades indicadas na Tabela 3. As faixas de laminado utilizadas tinham secção transversal de 9.6 mm de largura por 1.45 mm de espessura. Os valores obtidos em ensaios de tracção uniaxial efectuados em provetes de laminado, segundo a ISO 527-5, estão indicados na Tabela 3, onde também se incluem os valores do módulo de Young e da resistência à tracção do adesivo epoxi utilizado, obtidos em ensaios segundo a ISO 527-3.

4. REFORÇO À FLEXÃO DE PILARES

4.1. Série de ensaios

Para avaliar a eficácia da técnica de reforço proposta, em elementos submetidos a compressão axial constante e carga horizontal cíclica (Figura 2), as séries de pilares de betão armado indicadas na Tabela 4 foram ensaiadas. A série SR é composta por pilares não reforçados, a série PR é constituída por pilares que foram reforçados antes de serem ensaiados, e a série CR é composta pelos pilares ensaiados da série SR, reforçados posteriormente e ensaiados novamente^[5].

Na Figura 3 ilustra-se o sistema de ensaio utilizado. O provete era constituído pelo pilar, ligado monoliticamente a uma sapata que, por sua vez, era fixada a um bloco de fundação por intermédio de quatro varões de aço. O pilar era submetido a uma carga vertical constante de 150 kN que introduzia no pilar uma tensão de 3.75 MPa. As forças instaladas eram registadas por células de carga, enquanto os deslocamentos eram lidos por transdutores de deslocamentos (LVDT's), dispostos de acordo com o esquema da Figura 4. Para avaliar as extensões nos CFRP, nestes foram colados extensómetros nos locais indicados na Figura 4. O carregamento era constituído por oito ciclos de deslocamentos desde ± 2.5 mm até ± 20.0 mm, em incrementos de ± 2.5 mm, à velocidade de deformação de 150 $\mu\text{m/s}$.

4.2. Resultados

As forças máximas de compressão e de tracção obtidas nos ensaios estão indicadas nas Tabelas 5 e 6. As diferenças registadas nas forças máximas em pilares das mesmas séries devem-se, fundamentalmente, à variação na resistência do betão destes pilares (foram necessárias duas betonagens para moldar cada provete) e a desalinhamentos das armaduras de aço. Tomando por base de comparação os resultados obtidos na série de pilares não reforçados (série SR), constata-se que o reforço proporcionou um aumento significativo da capacidade de carga dos pilares. Como a percentagem de CFRP foi mantida constante em toda a campanha de ensaios, o aumento da capacidade de carga foi maior nos pilares com menor percentagem de armadura convencional. O aumento de capacidade de carga nos pilares da série PR e da série CR foi similar.

Na Figura 5 apresenta-se a relação típica entre a força horizontal e o deslocamento no LVDT1 (ver Figura 3). Como a presente técnica de reforço não introduz confinamento significativo no betão do pilar, a energia dissipada não varia significativamente, mas o aumento da capacidade de carga é considerável, tal como pode ser também constatado na Figura 6, onde se representa uma envolvente típica do carregamento cíclico.

Na maior parte dos pilares reforçados, valores de extensão próximos da extensão última do CFRP ($\cong 1.1\%$) foram registados em vários CFRP, tendo alguns rompido junto à fenda de rotura do pilar. A título de exemplo, na Figura 7 apresenta-se a relação entre a força horizontal e a extensão no extensómetro Ext6 (ver Figura 4), no pilar P10a_CR. Nos restantes pilares foram registadas relações similares nos extensómetros localizados na zona de rotura do pilar.

5. REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS

5.1. Série de ensaios

Na Figura 8 apresentam-se os dados necessários à caracterização dos modelos das séries de vigas ensaiadas. A área da secção transversal dos CFRP (A_f) aplicados em cada série foi determinada por forma a duplicar a carga de rotura das correspondentes vigas de referência^[6]. A percentagem de estribos utilizada foi a necessária para assegurar rotura por flexão. Na Figura 8, A_s é a área da secção transversal dos varões de aço dispostos na face inferior da viga.

As deformações das vigas foram medidas por LVDT's e as extensões longitudinais nos CFRP foram registadas por três extensómetros colados ao CFRP.

5.2. Resultados

Os diagramas de carga vs deslocamento a meio vão estão representados na Figura 9, e os principais resultados estão incluídos na Tabela 7. Verifica-se que o objectivo de duplicar a carga última das correspondentes vigas de referência foi praticamente alcançado. A carga correspondente ao início da cedência das armaduras de aço, F_{sy} , aumentou de 32% a 47%. O deslocamento correspondente a F_{sy} também aumentou. O aumento na carga de início da fendilhação, F_{cr} , foi bastante significativo. A carga de serviço, F_{serv} (carga para a flecha de $L/400=3.75$ mm, em que L é o vão da viga), também aumentou, tendo sido de 45% o máximo incremento.

As relações entre a carga aplicada e as extensões registadas nos extensómetros estão representadas na Figura 10. Os valores máximos de extensão, incluídos na Tabela 7 ($\epsilon_{f,max}$), variaram de 62% a 91% da extensão última do CFRP ($\epsilon_{f,u} = 1.7\%$).

6. REFORÇO AO CORTE DE VIGAS

6.1. Série de ensaios

Três tipos de técnicas de reforço com CFRP foram utilizados para avaliar a mais eficaz no reforço ao corte de vigas de betão armado^[7]. As séries de vigas testadas (ver Figura 11) eram compostas por uma viga de referência sem qualquer tipo de reforço ao corte (VB10), uma viga com estribos em varão de aço $\phi 6$ afastados de 150 mm nos vãos de corte (VBE-15), uma viga com faixas de duas camadas de manta de CFRP S&P C-Sheet 530 C5-30 (propriedades na Tabela 1), em forma de U, de 25 mm de largura e afastadas 80 mm no vão de corte (VBM-8), uma viga com CFRP inseridos em ranhuras verticais efectuadas no betão de recobrimento das faces verticais da viga, afastados de 100 mm (VBCV-10), e uma viga com CFRP inclinados a 45 (VBCI-15). A quantidade de reforço ao corte foi determinada segundo o ACI Committee 440^[1], de forma a que todas as vigas reforçadas (inclusive a VBE-15) tivessem idêntica resistência e rompessem por corte.

6.2. Resultados

Na Figura 12 apresenta-se a relação entre a carga e o deslocamento a meio vão registada nas vigas ensaiadas. Os principais resultados estão indicados na Tabela 8. Quando comparadas com a viga de referência (VB10), as vigas reforçadas com CFRP atingiram uma carga máxima (F_{max}) 50% a 77% mais elevada. O maior e

o menor aumento foram registados na viga reforçada com CFRP dispostos verticalmente (VBCV-10) e na viga reforçada com faixas de manta de CFRP (VBM-8), respectivamente. Quando comparada com a viga armada com estribos de aço (VBE-15), a viga reforçada com CFRP verticais teve uma carga máxima 9% superior. Considerando como indicador de ductilidade o deslocamento registado sob a carga máxima (δ_p), verificou-se que, quando comparada com a flecha da viga de referência ($\delta_{p,VB10}$), a flecha para a carga máxima das vigas VBE-15, VBCV-10, VBCI-15 e VBM-8 foi 294%, 232%, 119% e 118% superior, respectivamente. Assim, $\delta_{p,VBCV-10}$ é 84% de $\delta_{p,VBE-15}$, revelando que a técnica de reforço adoptada não é somente eficaz em termos de aumentar a capacidade máxima de carga, como também em assegurar maior capacidade deformacional às vigas reforçadas.

7. CARACTERIZAÇÃO DA LIGAÇÃO BETÃO-ADESIVO-CFRP

Com o objectivo de avaliar a influência do comprimento de aderência do CFRP no comportamento da ligação, com adesivo, entre CFRP e betão, foram efectuados ensaios de arranque em flexão, tendo-se utilizado três comprimentos de aderência^[8].

A Figura 13 representa o provete, o carregamento e os instrumentos utilizados na medição de deslocamentos, forças e extensões. No bloco B o laminado era fixo ao betão num comprimento total de 325 mm, enquanto no bloco A o laminado era apenas fixo no comprimento de aderência (L_a).

A influência do comprimento de aderência na relação entre a força de arrancamento e o deslizamento (deslocamento no LVDT2), $F-s_l$, está representada na Figura 14. A influência do comprimento de aderência na relação entre a tensão média de corte e o deslizamento (deslocamento no LVDT2), $\tau-s_l$, está representada na Figura 15. Nas Figuras 14 e 15, cada curva é a resposta média registada em três provetes.

A Tabela 9 inclui os valores médios das principais propriedades avaliadas com base nos resultados obtidos nos ensaios efectuados. Nesta Tabela, F_{max} é a força máxima no laminado, τ_{max} é a tensão máxima de corte, G_f é a energia dissipada no ensaio, representada pela área sob a curva tensão de corte vs deslizamento até um deslizamento de 5 mm. Por sua vez, $\varepsilon_{f,max}$ é a extensão máxima registada no extensómetro colado ao CFRP, $\varepsilon_{f,u}$ é a sua extensão de rotura ($\approx 1.7\%$), e $s_{l,max}$ é o deslizamento correspondente à força máxima aplicada no ensaio.

Da análise das Figuras 14 a 15 e dos resultados incluídos na Tabela 9 constata-se que^[8]:

- Aumentando ao comprimento de aderência do CFRP, a força na faixa de laminado aumenta;
- Aumentando ao comprimento de aderência aumenta o deslizamento na fase pré-pico, dado que existe maior volume de adesivo, sendo este um material com elevada deformabilidade não linear. Assim, quanto maior L_a maior foi o deslizamento no pico;
- O τ_{max} diminui com o aumento do comprimento de aderência do laminado. A tensão máxima de corte é significativamente superior à registada em outras configurações de ensaio de arranque;
- A energia de fractura tem uma tendência para diminuir com o comprimento de aderência do laminado, devido, fundamentalmente, à diminuição da tensão máxima de corte com este comprimento. Contudo, esta diminuição parece tender para uma assíntota, dado o atrito betão-adesivo-CFRP garantir um nível de resistência residual elevado.

8. CONCLUSÕES

No presente trabalho uma nova técnica de reforço foi utilizada para aumentar a capacidade de carga de elementos de pilar e de viga com rotura por flexão, e de viga com rotura por corte. Esta técnica baseia-se na inserção de faixas de laminados de CFRP em ranhuras efectuadas no betão de recobrimento dos elementos a reforçar. Os CFRP são fixos ao betão por intermédio de adesivo epoxi. A ligação betão-adesivo-CFRP foi estudada em termos de avaliar a influência do comprimento de aderência do CFRP nos principais parâmetros que permitem caracterizar esta ligação.

Dos resultados obtidos verificou-se que a técnica proposta é mais eficaz que as baseadas na colagem externa de CFRP, dado que a precocidade da descolagem do CFRP é retardada, sendo mesmo evitada em muitos casos, resultando níveis de deformação mais elevados nos CFRP e aumentos mais significativos na capacidade de carga dos elementos reforçados. Nos elementos de viga, além do aumento da capacidade de carga, também se registou um aumento significativo da sua capacidade deformacional no momento da sua rotura, indicador da eficácia da presente técnica em termos de ductilidade.

Os ensaios de arranque em flexão revelaram que as tensões média de corte alcançadas são significativamente superiores às registadas com técnicas baseadas na colagem exterior. Verificou-se que a força de arranque aumentou com o comprimento de aderência.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas que gentilmente forneceram os materiais usados na campanha experimental: S&P, Bettor MBT Portugal, Secil, Nordesfer, Ferseque, Casais, Solusel, VSL e Unibetão (Braga). Ao CEMACON, agradece-se a colaboração prestada nos ensaios de caracterização dos laminados de CFRP e do adesivo. O primeiro autor agradece à bolsa SPRH/BSAB/291/2002-Pocti da FCT e FSE.

10. REFERÊNCIAS

1. ACI Committee 440, “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*”, ACI, 2002.
2. CEB-FIB, “*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. International Federation for Structural Concrete*”, 2001.
3. De Lorenzis L, Nanni A, La Tegola A, “*Flexural and shear strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods*”, 3th Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Canada, 2000, pp. 521-528.
4. RILEM Draft Recommendation 50-FMC, “*Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bending tests on notched beams*”, Materials and Structures, 1985.
5. Ferreira DRSM. Pilares de Betão Armado Reforçados com Laminados de Fibras de Carbono. Tese de Mestrado, Universidade do Minho, 2000.
6. Fortes AS, Barros JAO, Padaratz IJ, “*Vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento*”, Relatório 02-DEC/E-13, Universidade do Minho, 2002.
7. Barros, JAO, Dias, SJE “*Shear strengthening of reinforced concrete beams with laminate strips of CFRP*”, International Conference Composites in Constructions - CCC2003, 2003, Italy, pp. 289-294.
8. Sena-Cruz JM, Barros JAO, “*Bond behavior of carbon laminate strips into concrete by pullout-bending tests. Bond in Concrete - from the research to standards*”, International Symposium, 2002, Hungry, pp. 614-621.

Tabela 1. Programa experimental

Grupo de ensaio	Elementos com rotura por flexão		Elementos com rotura por corte	Ensaio de arranque em flexão
Tipo de elemento	Pilares de betão armado	Vigas de betão armado		Vigas de betão
Tipo de ensaio	Ensaio cíclico	Ensaio monotónico		
Topologia do carregamento	Carga axial de compressão constante e carregamento cíclico horizontal de amplitude crescente	Quatro pontos de carga		
Objectivos	Avaliar a influência da percentagem da armadura longitudinal, ρ_{sl} ¹		Comparação do desempenho das técnicas de reforço ao corte com CFRP	Comportamento da ligação betão-adesivo-CFRP
Variáveis do programa experimental	Percentagem de armadura longitudinal	Percentagem de armadura longitudinal	Técnica de reforço ao corte	Comprimento de aderência

¹ ρ_{sl} = Relação entre a área da secção transversal dos varões da armadura longitudinal (A_s) e a área da secção transversal de betão (A_c).

Tabela 2. Propriedades do betão e do aço

Grupo de ensaio	Tipo de elemento	Betão		Aço		
		f_{cm}^1 [MPa]	$f_{cm,fl}^1$ [MPa]	ϕ_s [mm]	f_{sy} [MPa]	f_{su} [MPa]
Elementos com rotura por flexão	Pilares de betão armado	16.7 (28)	2.6 (28)	6	352	533
				10	323	457
				12	365	519
	Vigas de betão armado	46.1 (90)	–	6	–	750
				8	–	500
Elementos com rotura por corte	Vigas de betão armado	56.2 (105)	–	6 ²	540	694
				6 ³	618	691
				10	464	581
Ensaio de arranque em flexão	Vigas de betão	34.9	5.9	–	–	–

¹ Os valores entre parêntesis curvos representam a idade, em dias, quando os provetes foram ensaiados; ² Armadura transversal;

³ Armadura longitudinal.

Tabela 3. Propriedades dos constituintes dos sistemas de CFRP

Sistema de CFRP			Principais propriedades				
Tipo	Material		Resistência à tração [MPa]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Extensão última (%)	Espessura (mm)	
	Tipo	Designação					
Manta curada “in situ” ¹	Primário	MBrace Primário	12	0.7	3.0	–	
	Resina	MBrace Saturante	54	3	2.5	–	
	Manta	S&P C-Sheet 530	3000	390	0.8	0.167	
Laminado Pré-fabricado ²	Adesivo	MBrace Adesivo	16-22	5	–	–	
	Laminado	S&P laminates CFK 150/2000	(i)	1741	153	1.1	9.6
			(ii)	2740	158	1.7	
			(iii)	2286	166	1.3	

¹ De acordo com o fabricante; ² Resultados experimentais.

(i) Aplicado nos pilares com rotura por flexão; (ii) Aplicado nas vigas de betão armado com rotura por flexão e nas vigas de betão dos ensaios de arranque por flexão; (iii) Aplicado nas vigas de betão armado com rotura por corte.

Tabela 4. Designações atribuídas aos elementos de pilar

Armadura longitudinal	Séries		
	SR ¹	PR ²	CR ³
4φ10 ($A_{sl} = 314 \text{ mm}^2$)	P10a_SR	P10a_PR	P10a_CR
	P10b_SR	P10b_PR	P10b_CR
4φ12 ($A_{sl} = 452 \text{ mm}^2$)	P12a_SR	P12a_PR	P12a_CR
	P12b_SR	P12b_PR	P12b_CR

¹ Não reforçado; ² Reforçado antes de ser ensaiado;

³ Elementos de pilar da série SR que foram reforçados após terem sido ensaiados.

Tabela 5. Forças máximas obtidas nas séries PR (reforçados antes de serem ensaiados)

Tipo de força	Série PR			
	P10a_PR (111)	P10b_PR (113)	P12a_PR (110)	P12b_PR (115)
Tracção [kN]	37.14	40.63	44.13	39.81
Compressão [kN]	-38.54	-37.96	-43.66	-36.64

Nota: Os valores entres parêntesis curvos representam a idade do pilar à data do ensaio.

Tabela 6. Forças máximas obtidas nos pilares das séries SR (não reforçados) e CR (reforçados após terem sido previamente ensaiados)

Tipo de força	Séries	P10a_	P10b_	P12a_	P12b_
Tração	SR [kN]	16.67 (86)	21.78 (85)	26.35 (85)	29.31 (85)
	CR [kN]	37.96 (146)	41.38 (130)	34.11 (150)	45.54 (154)
	Aumento [%]	127.70	89.99	29.45	55.37
Compressão	SR [kN]	-19.76 (86)	-24.07 (85)	-30.52 (85)	-32.27 (85)
	CR [kN]	-34.11 (146)	-43.1 (130)	-37.03 (150)	-41.58 (154)
	Aumento [%]	72.62	79.06	21.33	28.85

Nota: Os valores entres parêntesis curvos representam a idade do pilar, em dias, à data do ensaio.

Tabela 7. Principais resultados registados nas séries de vigas reforçadas à flexão

Séries	Viga	F_{cr} [kN]	$\frac{F_{cr}(VR)}{F_{cr}(V)}$ ¹	F_{serv} [kN]	$\frac{F_{serv}(VR)}{F_{serv}(V)}$	F_{sy} [kN]	$\frac{F_{sy}(VR)}{F_{sy}(V)}$	F_{max} [kN]	$\frac{F_{max}(VR)}{F_{max}(V)}$	$\varepsilon_{f,max}$ (%)
S1	V1	8.5	1.26	18.6	1.22	24.5	1.32	28.2	1.78	–
	V1R1	10.7		22.7		32.31		50.3 ²		1.55
S2	V2	8.1	1.52	21.7	1.45	37.5	1.39	41.0	1.91	–
	V2R2	12.3		31.4		52.28		78.5		1.28
S3	V3	7.9	1.51	23.8	1.38	40.0	1.36	41.3	1.98	–
	V3R2	11.9		32.8		54.52		81.9		1.28
S4	V4	8.1	1.74	32.3	1.25	46.9	1.47	48.5	1.96	–
	V4R3	14.1		40.4		69.11		94.9		1.06

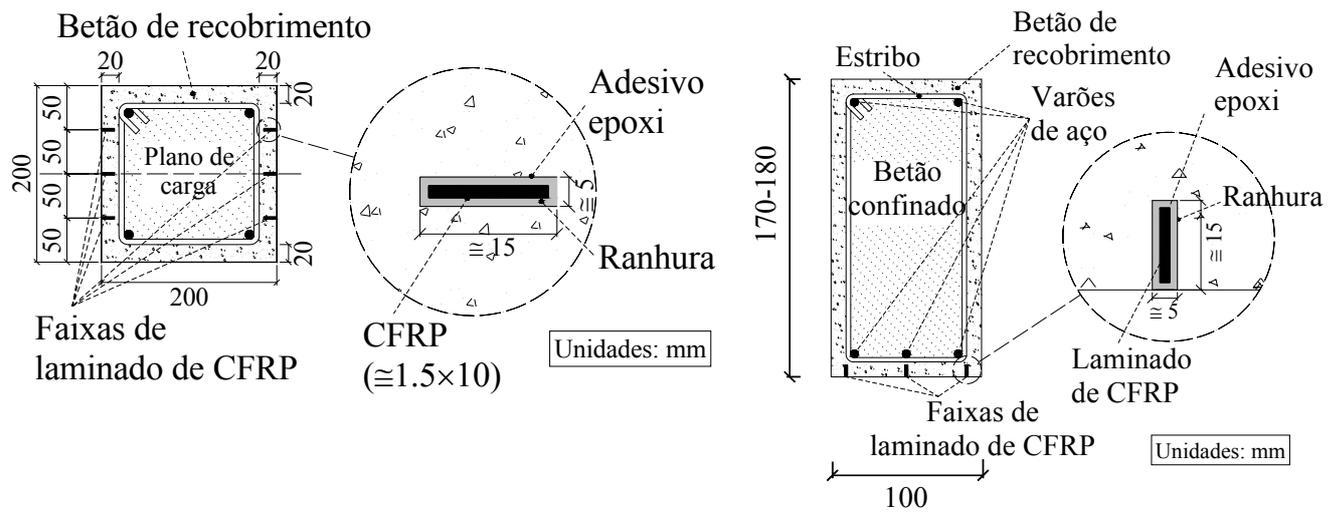
¹VR - Viga reforçada; V - Viga de referência; ² O ensaio foi cancelado quando a carga era de 50.3 kN e a flecha era superior a 25mm.

Tabela 8. Principais resultados obtidos nas séries de vigas reforçadas ao corte

Viga	Sistema de reforço ao corte	F_{max} [kN]	$\frac{F_{max}}{F_{max,VB10}}$	$\frac{F_{max}}{F_{max,VBE-15}}$	δ_p [mm]	$\frac{\delta_p}{\delta_{p,VB10}}$	$\frac{\delta_p}{\delta_{p,VBE-15}}$
VB10	–	74.02	1.00	0.61	1.92	1.00	0.25
VBE-15	Estribos em varão de aço	120.64	1.63	1.00	7.57	3.94	1.00
VBM-8	Faixas de manta de CFRP	111.14	1.50	0.92	4.18	2.18	0.55
VBCV-10	CFRP verticais	131.22	1.77	1.09	6.37	3.32	0.84
VBCI-15	CFRP inclinados	120.44	1.63	1.00	4.21	2.19	0.56

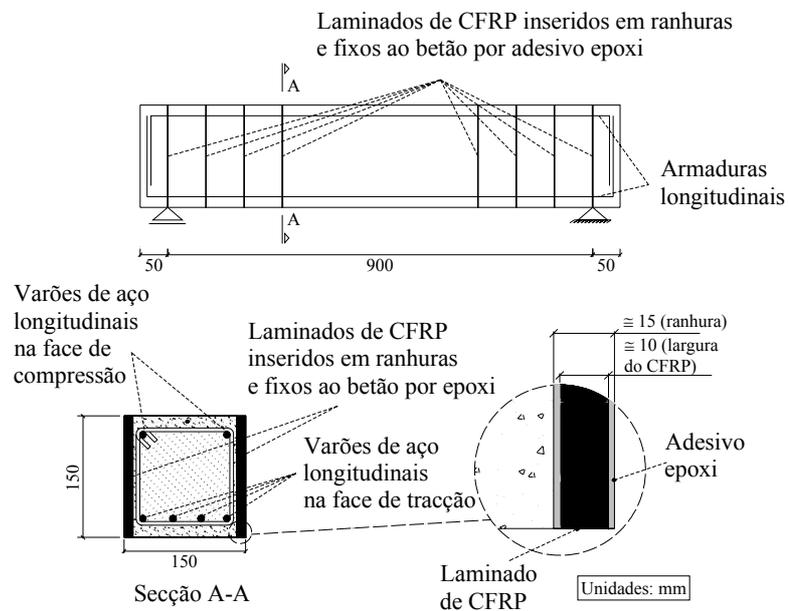
Tabela 9. Valores das principais grandezas avaliadas nos ensaios de arranque em flexão

Grandeza	<i>La40</i>	<i>La60</i>	<i>La80</i>
F_{max} [kN]	15	22.8	22.4
τ_{max} [MPa]	17.5	17.7	13.0
G_f [MPa×mm]	48.3	43.9	38.4
$\varepsilon_{f,max}/\varepsilon_{f,u}$	42.1	64	62.1
$s_{l,max}$ [mm]	0.3	0.5	0.7



(a)

(b)



(c)

Figura 1. Técnica de reforço aplicada em: (a) pilares com rotura por flexão; (b) vigas com rotura por flexão; (c) vigas com rotura por corte

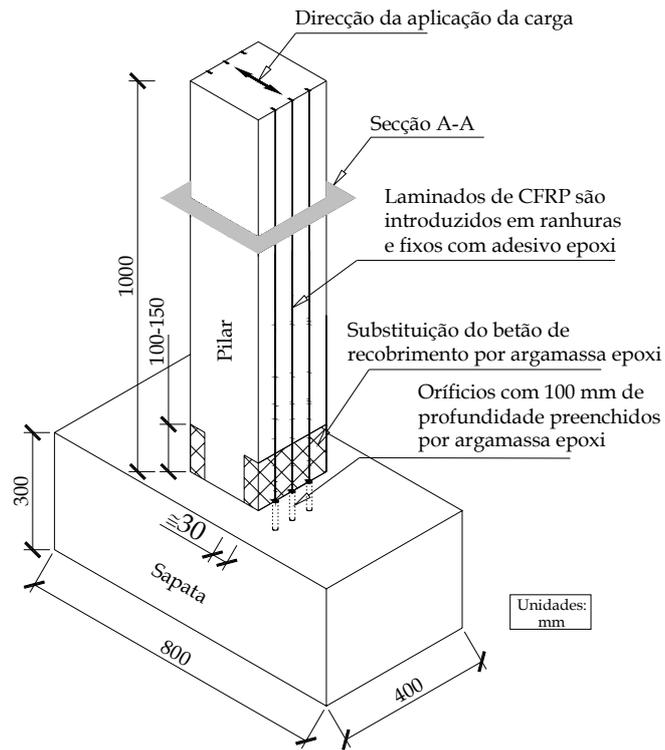


Figura 2. Técnica de reforço aplicada nos pilares (Secção A-A na Figura 1a)

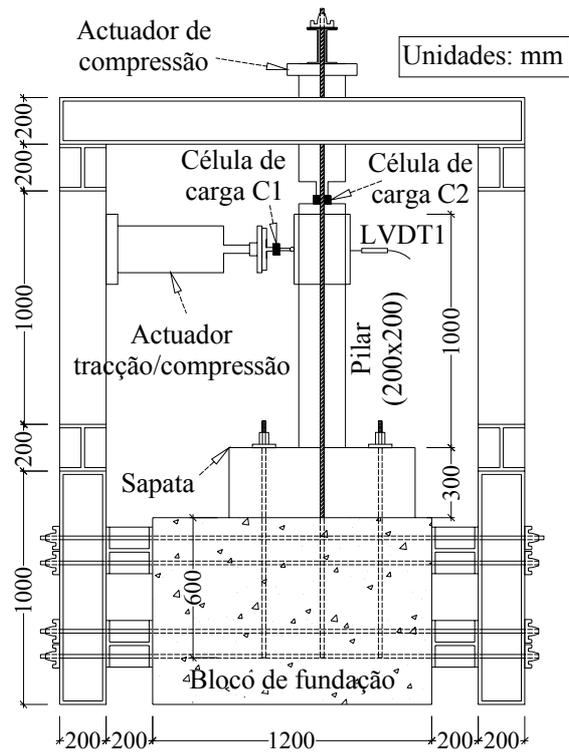


Figura 3. Sistema de ensaio

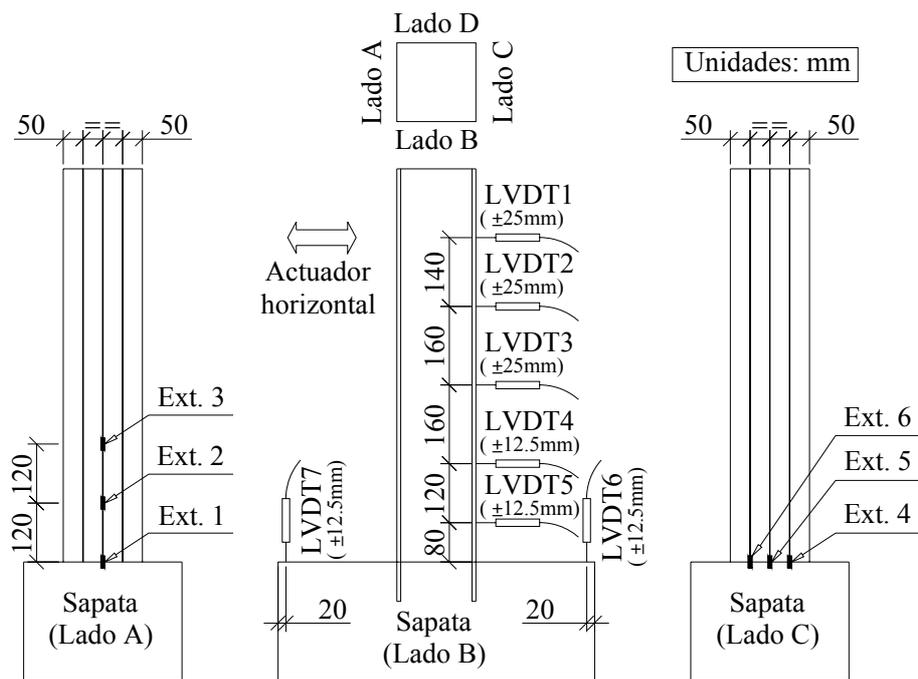


Figura 4. Localização dos transdutores de deslocamentos (LVDT's) e dos extensómetros (Ext.)

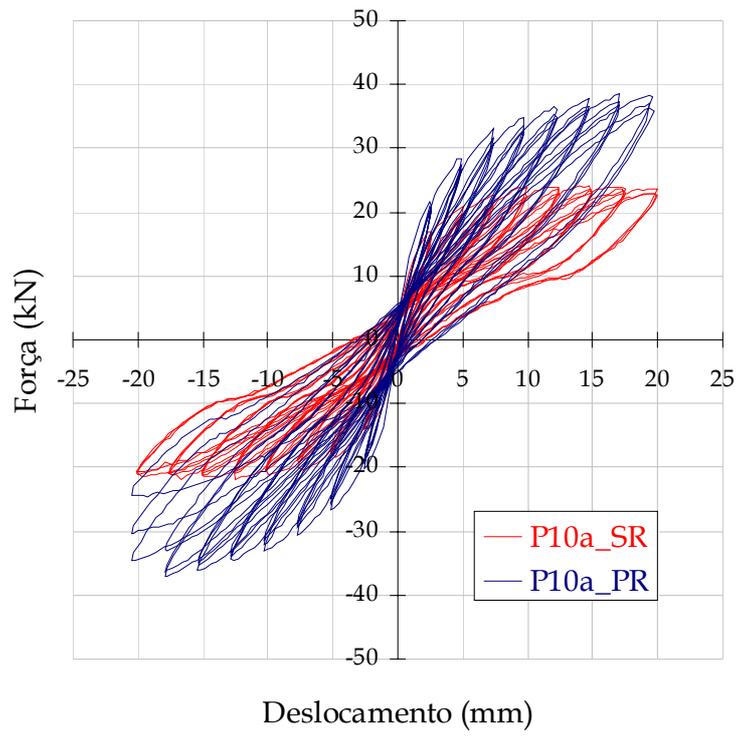


Figura 5. Resposta força-deslocamento (no LVDT1) para o pilar P10a

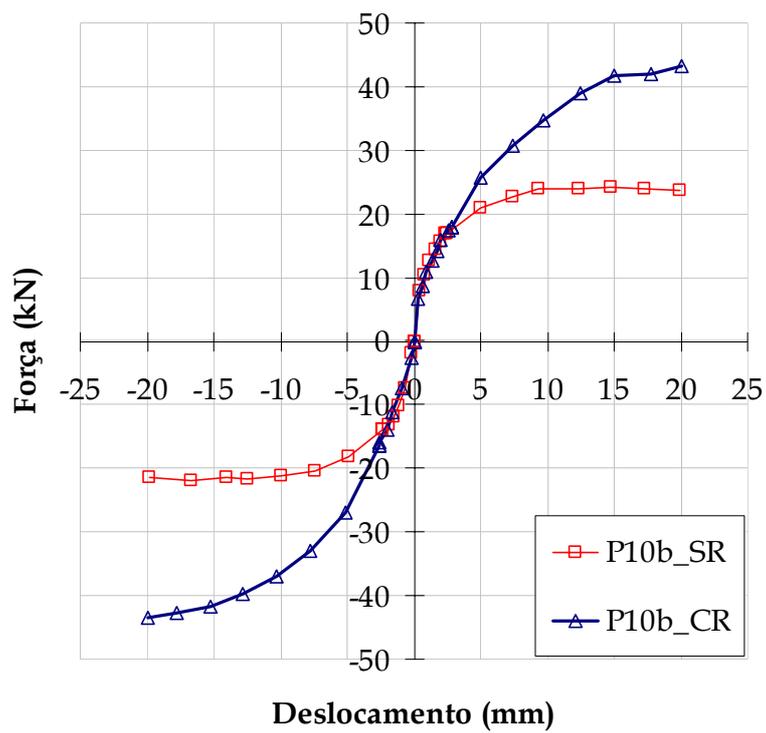


Figura 6. Envolvente força-deslocamento (no LVDT 1) de todos os carregamentos cíclicos no pilar P10b

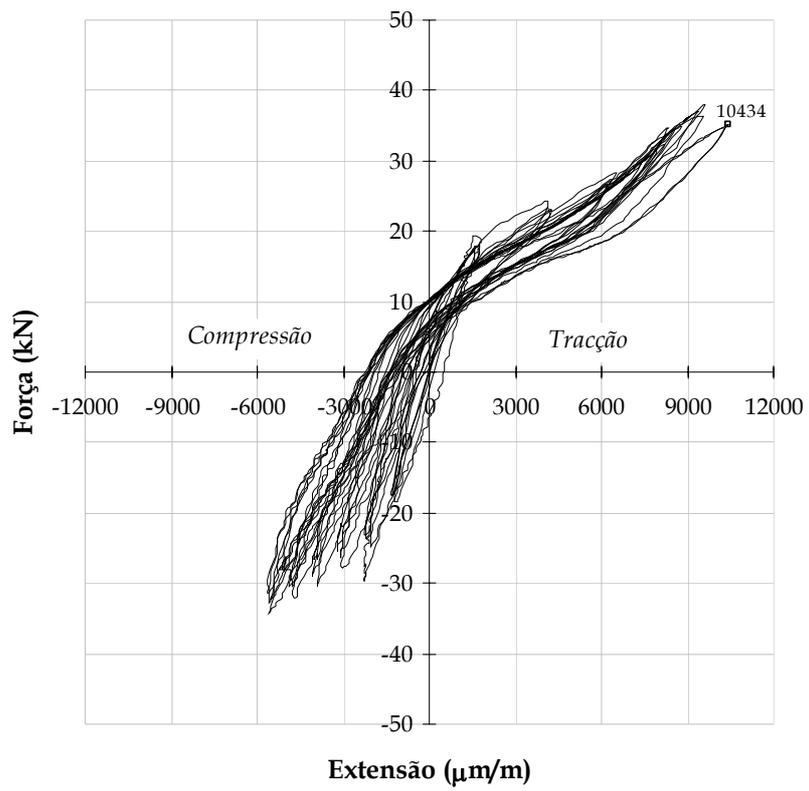
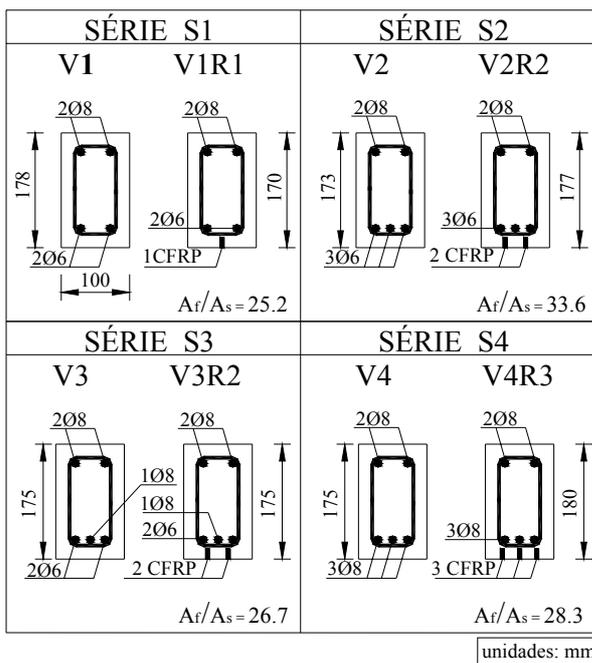
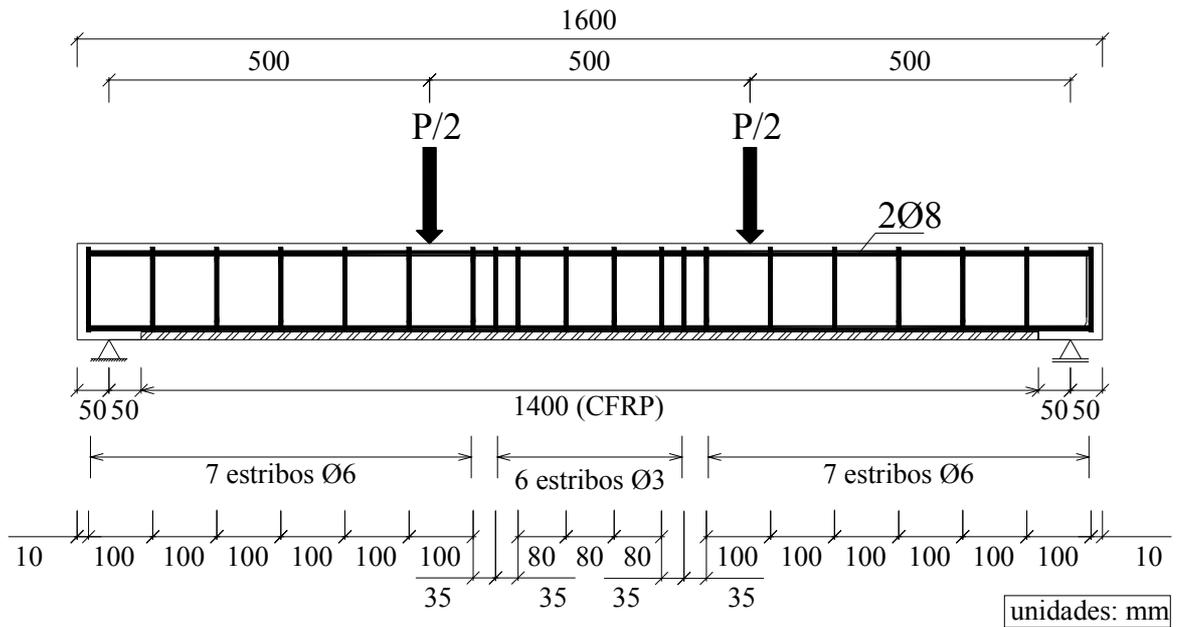
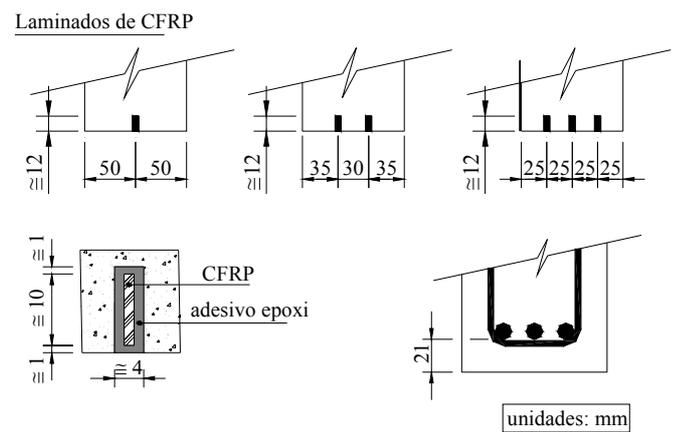


Figura 7. Relação entre a força e a extensão no extensómetro Ext. 6 (ver Figura 4) no pilar P10a_CR



(b)

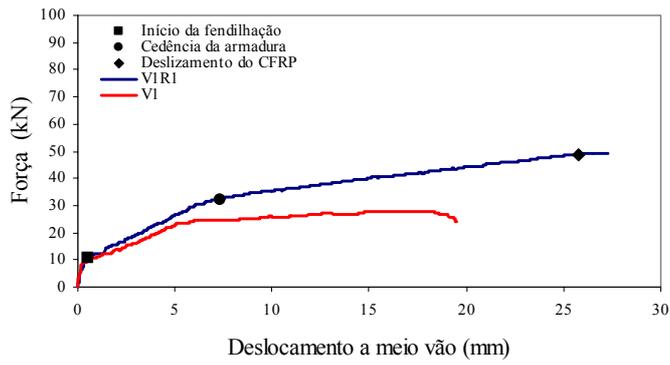
(a)



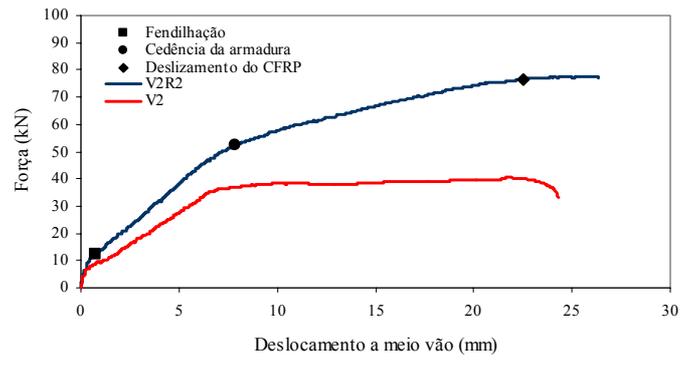
(c)

Figura 8. Séries de vigas com rotura por flexão: (a) tipo de carregamento e distribuição das armaduras, (b)

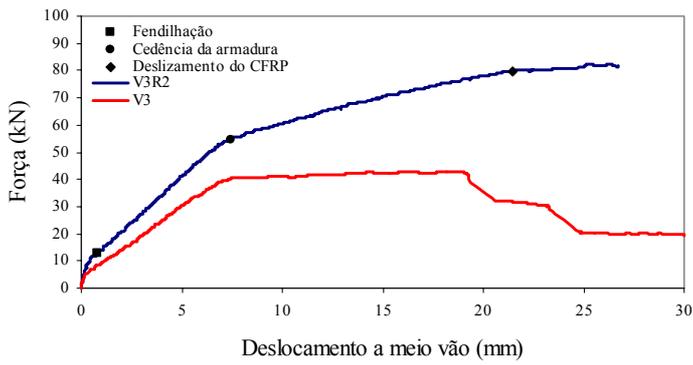
secções transversais, (c) pormenor do reforço



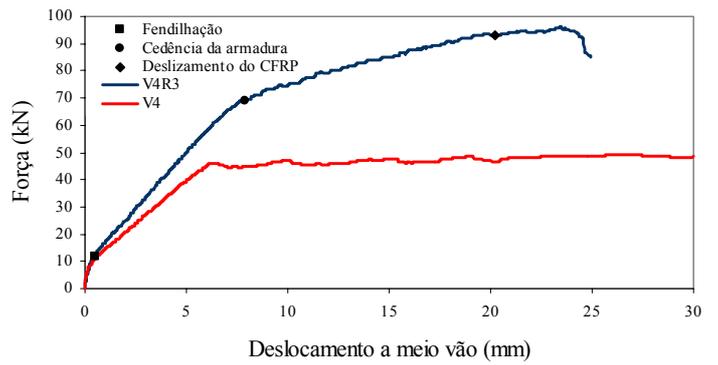
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9. Diagramas carga vs deslocamento a meio vão. Séries: (a) S1, (b) S2, (c) S3 e (d) S4

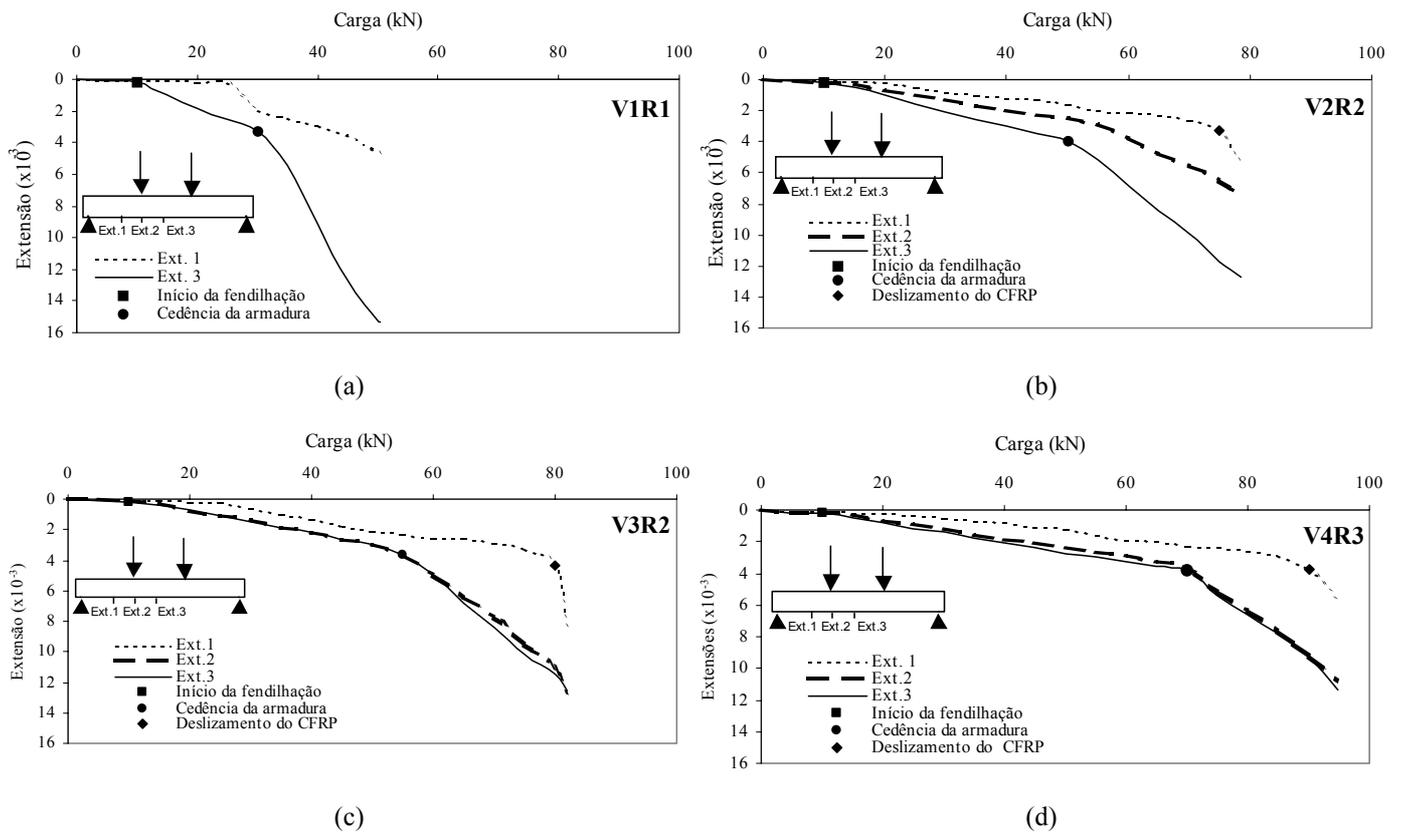


Figura 10. Diagramas carga vs extensão nos laminados. Séries: (a) V1R1, (b) V2R2, (c) V3R2 e (d) V4R3

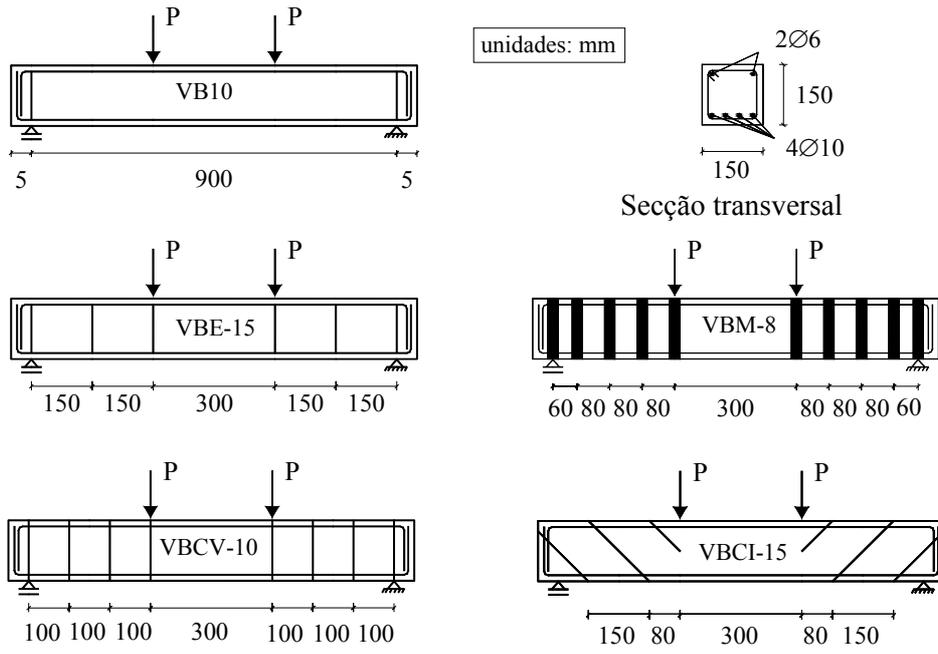


Figura 11. Série de vigas com rotura por corte

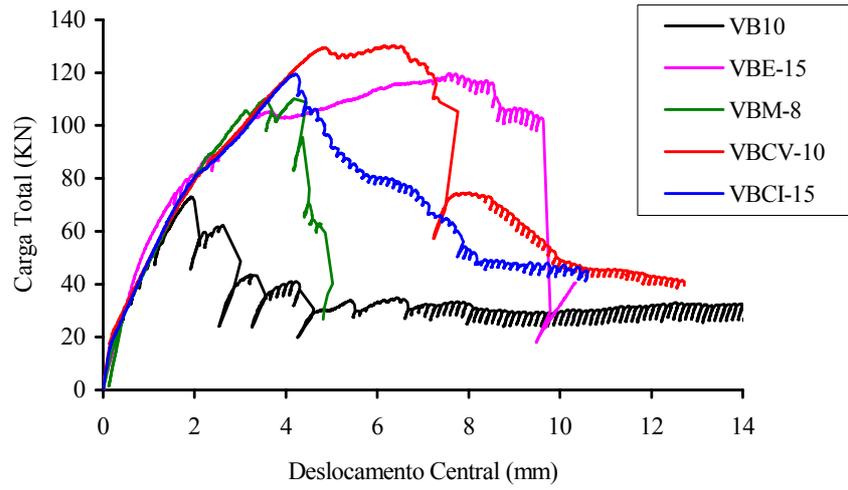


Figura 12. Relação carga total vs deslocamento central para as vigas com rotura por corte

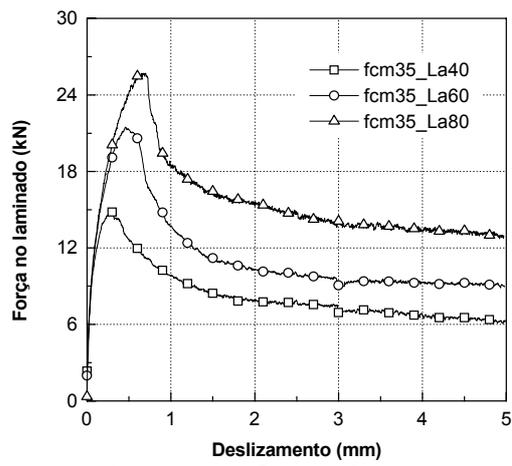


Figura 14. Influência do comprimento de aderência (L_a) na relação força de arrancamento vs deslizamento

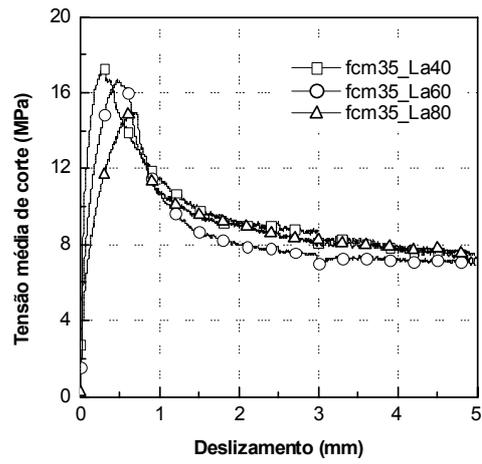


Figura 15. Influência do comprimento de aderência (L_a) na relação tensão média de corte vs deslizamento