COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM CHAPAS DE AÇO COLADAS

Luiz Antonio Vieira Carneiro[1], Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro[2]

[1]Universidade Federal Fluminense, Niterói/RJ, Brasil (luizcarneiro@id.uff.br)
[2]Universidade Federal Fluminense, Niterói/RJ, Brasil

Resumo: Este trabalho tem por objetivo apresentar o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com o uso da técnica chapas de aço coladas, conforme resultados de alguns estudos experimentais. Constatou-se que a espessura, a configuração, o sistema de ancoragem e a concentração de tensões nas extremidades das chapas de aço, a taxa de armadura interna e condição de carregamento das vigas e a espessura e rigidez da cola são alguns dos parâmetros mais influentes no comportamento destas vigas.

Palavras-chave: Vigas; concreto armado; reforço; chapas de aço

INTRODUÇÃO

A técnica de reforço é um serviço estrutural no qual há o estabelecimento de características mecânicas superiores às iniciais em um elemento estrutural, isto é, a capacidade resistente deste elemento é aumentada.

A aplicação da técnica de reforço requer materiais com características especiais e varia de acordo com a extensão da região afetada no elemento estrutural a ser reforçado.

Dentre as técnicas de reforço mais utilizadas, destacam-se a adição de chapas de aço coladas com resina epóxica, a protensão exterior, o encamisamento de armaduras com concreto ou argamassa aplicados de forma convencional ou projetados, e a adição de novos elementos estruturais aos existentes.

A técnica de reforço de vigas de concreto armado com o uso de chapas de aço coladas com resina epóxica é uma das técnicas mais aplicadas para a melhoria do seu desempenho estrutural, aumentando suas resistência e rigidez e diminuindo suas flechas, rotações e aberturas de fissuras.

Essa técnica é considerada, segundo Swamy *et al.* (1989), como uma técnica prática, simples e rápida, alterando muito pouco as dimensões de vigas em uso e podendo ser aplicada nas suas faces de tração, compressão e laterais.

As principais desvantagens da técnica de reforço por meio do emprego de chapas de aço coladas, segundo Carneiro (1998), podem ser a impossibilidade de se visualizar fissuras da região sob a chapa colada, o impedimento de se detectar deterioração por corrosão na face interna, a tendência de descolamento dos bordos devido à concentração de tensões, a baixa resistência ao fogo da chapa, sendo necessária a proteção da mesma por meio de um revestimento isolante à base de amianto ou vermiculita.

Segundo o CEB (1983), os principais requisitos para que a técnica de chapa de aço colada apresente resultados satisfatórios são: a perfeita aderência entre concreto, resina e chapa, com tratamentos superficiais especiais para o concreto (escarificação da sua superfície, remoção de seus pedaços soltos, gorduras ou óleo e poeira) e a chapa de aço (remoção de seus produtos de oxidação, aplicação de tricloroetileno para retirar sua graxa e óleo); espessuras máximas da camada de resina epóxica e da chapa de aço de 1,5 mm e 3,0 mm, respectivamente; aplicação de uma pressão leve e uniforme na colagem da chapa de aço contra o concreto, por no mínimo 24 horas, dependendo do tipo da cola e da temperatura do ambiente; e proteção da região reforçada contra as mudanças de temperatura e, especialmente, contra fogo.

Para que seja evitado o desperdício de material e não se impeça a total visualização da formação das fissuras, além da redução de concentração de tensões, recomenda-se a utilização de chapas coladas em tiras ao invés do uso de chapas contínuas.

Este trabalho apresenta os resultados e as principais conclusões de estudos experimentais sobre o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com o uso da técnica de chapas de aço coladas.

Essas vigas foram, em sua maioria, submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos. Em algumas das vigas, o ensaio de flexão foi feito em três pontos. Alguns dos parâmetros variados nos ensaios foram o tipo, a configuração, o comprimento colado e taxa da armadura de reforço, a taxa de armadura interna das vigas, e a espessura e a rigidez da cola.

MATERIAL E MÉTODOS

Swamy *et al*. (1987) estudaram experimentalmente o comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com chapas de aço coladas, em termos de carga de fissuração, tipo de fissuração, deformações, cargas de serviço e de ruptura.

O programa experimental englobou ensaios de flexão em 24 vigas de seção retangular de 155 mm x 255 mm x 2500 mm de dimensões, sendo 22 vigas com reforço e 2 vigas sem reforço.

Os parâmetros variados foram a espessura da cola (1,5 mm, 3 mm, 6 mm ou 2 mm a 8 mm), a espessura das chapas de aço (1,5 mm, 3 mm ou 6 mm), o número de camadas de reforço (1 ou 2), o tipo de reforço (chapas em L ou não), e a condição de carregamento (pré-fissurada ou não).

As vigas 211 a 215 tinham chapas em L no meio do vão e embaixo das cargas concentradas. As vigas 222 a 224 foram pré-fissuradas (50% da carga de ruptura P_u - vigas 222 e 224 e 90% de P_u - viga 223) e descarregadas antes do reforço. A viga 221 tinha entalhe na face tracionada embaixo de cada carga concentrada.

O concreto possuía resistência à compressão variando de 63,3 MPa a 73,0 MPa.

As barras da armadura longitudinal e os estribos apresentaram resistência ao escoamento igual a 470 MPa e 250 MPa, respectivamente.

Para as chapas de aço, sua resistência ao escoamento era 236 MPa (chapa de 1,5 mm), 258 MPa (chapa de 3 mm), e 248 MPa (chapa de 6 mm). A cola (resina epóxica) tinha resistência à tração igual a 15 MPa e módulo de elasticidade variando de 1,7 GPa a 2,1 GPa.

A Figura 1 mostra o esquema estrutural, o detalhamento das armaduras interna e de reforço e a instrumentação das vigas ensaiadas por Swamy *et al*. (1987).

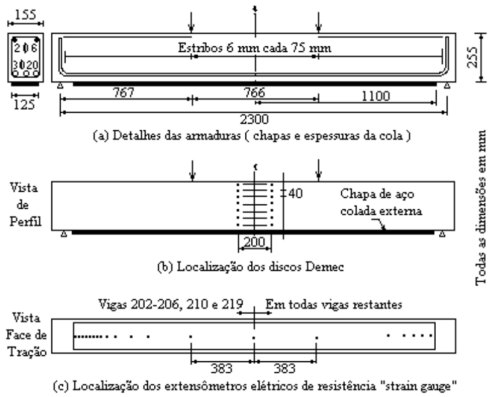


Figura 1. Dados sobre as vigas ensaiadas por Swamy *et al*. (1987).

Jones *et al*. (1988) investigaram o problema da ancoragem nas extremidades de chapas de aço coladas nas faces tracionadas de vigas de concreto armado por meio de diferentes sistemas.

O programa experimental constou de 8 vigas de seção retangular de 155 mm x 255 mm x 2500 mm de dimensões, sendo uma sem reforço (viga F01) e 7 reforçadas com chapas de aço coladas com resina epóxica de 1,5 mm de espessura (vigas F31 a F37). Todas foram projetadas para possuir a mesma resistência teórica, sem haver ruptura por separação da chapa. Os parâmetros variados foram a espessura da chapa de aço (3 mm, 6 mm, variável de 2 mm a 6 mm) e o sistema de ancoragem (chumbador ou chapa em L)

O esquema estrutural, o detalhamento das armaduras interna e de reforço e a instrumentação das vigas ensaiadas por Jones *et al*. (1988) podem ser vistos na Figuras 2 a 4.

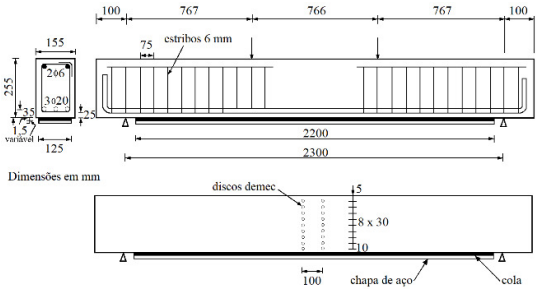


Figura 2. Dados sobre as vigas ensaiadas por Jones *et al*. (1988).

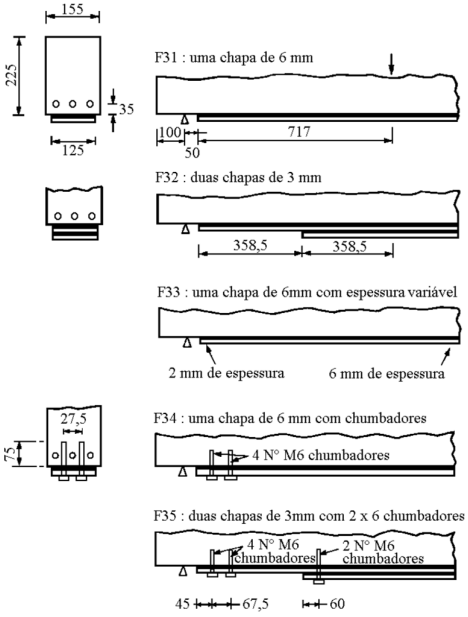


Figura 3. Dados sobre as vigas reforçadas F31 a F35 ensaiadas por Jones *et al*. (1988).

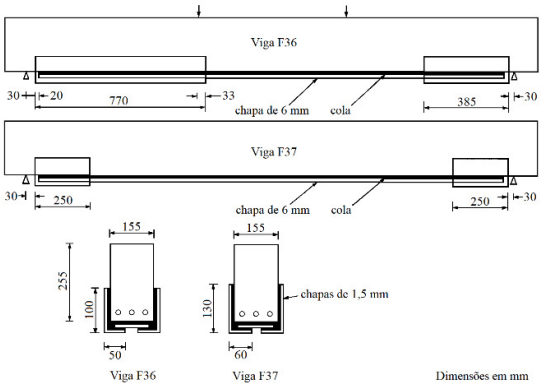


Figura 4. Dados sobre as vigas reforçadas F36 e F37 ensaiadas por Jones *et al*. (1988).

O concreto utilizado apresentou resistência média à compressão de 53,6 MPa, a partir de ensaio de compressão axial em cubos de concreto.

A resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade das barras da armadura principal eram iguais a 430 MPa e 200 GPa, enquanto para os estribos, 324 MPa e 200 GPa.

A chapa de aço de 3 mm tinha resistência ao escoamento e módulo de elasticidade iguais a 263 MPa e 200 GPa, enquanto a chapa de aço de 6 mm, 246 MPa e 200 GPa.

Swamy *et al*. (1989) avaliaram a técnica de reforço à flexão com chapas de aço coladas de 1,5 mm de espessura em vigas pré-fissuradas sob cargas de até 70% da sua capacidade resistente à flexão.

O programa experimental constou dos ensaios de 9 vigas de seção retangular de 155 mm x 255 mm x 2500 mm dimensões, sendo 2 sem reforço e 7 com reforço. Os parâmetros variados foram a espessura da cola (1,5 mm ou 3 mm), a condição da viga antes do reforço (fissurada ou não e carregada ou não).

Na Figura 5 podem ser vistos o esquema estrutural, o detalhamento das armaduras interna e de reforço e a instrumentação das vigas ensaiadas por Swamy *et al*. (1989).

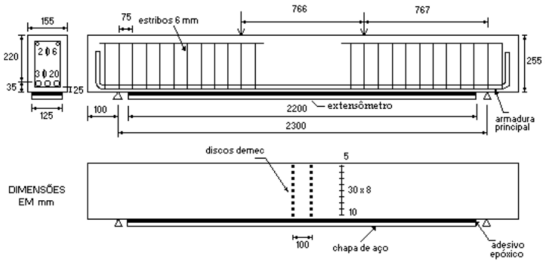


Figura 5. Dados sobre as vigas ensaiadas por Swamy *et al*. (1989).

As vigas das séries I e II foram ensaiadas até a ruptura, partindo-se do carregamento nulo, e as vigas da série III foram mantidas sob carregamento constante durante a colagem da chapa e o período de cura da resina epóxica, e, então, carregadas até a ruptura.

A Tabela 1 mostra a espessura da cola t_b, a percentagem da carga de ruptura P_u da viga F01 utilizada na fissuração do concreto e a condição de carregamento na colagem do reforço de cada uma das vigas ensaiadas por Swamy *et al*. (1989). As vigas F01 e F02 não foram reforçadas, mas a viga F02 tinha uma camada de 3 mm de cola ao longo da sua face inferior. Dentre as vigas reforçadas, somente a viga F11 não foi pré-fissurada.

Tabela 1. Dados sobre as vigas ensaiadas por Swamy *et al*. (1989).

Série	Viga	t_b (mm)	% da P_u da viga F01	Colagem do reforço
I	F01	-	-	-
	F02	3	-	-
	F11	1,5	-	-
II	F12	1,5	30	após descarga da viga
	F13	1,5	50	
	F14	1,5	70	
III	F22	1,5	30	com a carga aplicada na viga
	F23	1,5	50	
	F24	1,5	70	

A resistência do concreto à compressão foi em torno de 50 MPa, aos 28 dias.

A resistência ao escoamento das barras da armadura principal era igual a 430 MPa, enquanto para os estribos, 325 MPa. A chapa de aço possuía tensão de escoamento de 245 MPa.

Jones e Swamy (1995) apresentaram resultados de ensaios de vigas reforçadas à flexão com chapas de aço coladas.

Os parâmetros variados foram a espessura, o número e comprimento das chapas, e a espessura e rigidez da cola.

Para investigar o efeito da espessura da chapa, foram ensaiadas duas séries de vigas: cinco vigas subarmadas (URB) e três vigas superarmadas (ORB). Todas as vigas possuíam chapas coladas na sua face tracionada, com exceção da viga ORB3, que possuía chapa colada na face de compressão. Em cada série, a geometria da seção e a largura da chapa foram mantidas constantes.

No estudo do número de comprimento das chapas (chapas múltiplas e sobrepostas), foram ensaiadas seis vigas de seção retangular de 100 mm x 150 mm x 1200 mm de dimensões, biapoiadas com carga concentrada no meio do vão livre de 1100 mm.

A viga 1 sem chapa colada foi tomada como referência, a viga 2 possuía uma chapa colada simples

de 80 x 1,6 mm, e a viga 3, idêntica à viga 2, foi pré-carregada, pré-fissurada e descarregada antes de ser reforçada, como ilustrado na Figura 6.

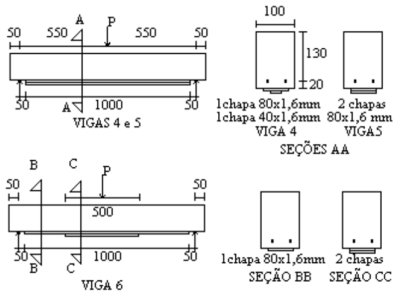


Figura 6. Dados sobre as vigas ensaiadas por Jones e Swamy (1995).

Swamy *et al*. (1995) avaliaram o comportamento estrutural de vigas de 155 mm x 255 mm x 2500 mm de dimensões reforçadas à flexão com chapas de aço coladas (v. Figura 7) e expostas em área industrial poluída e rompidas em laboratório.

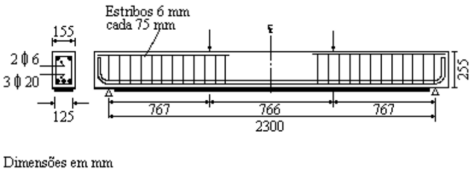


Figura 7. Dados sobre as vigas ensaiadas por Swamy *et al*. (1995).

O programa experimental consistiu no ensaio de 13 vigas (103 a 116) reforçadas sem carregamento e 8 vigas (117 a 124) reforçadas sob carregamento e colocadas ao meio ambiente durante um período de exposição de 11 a 12 anos, sem serem submetidas à manutenção e limpeza.

Os parâmetros investigados foram a espessura da cola (3 mm, 6 mm ou 2 mm até 8 mm), o número de chapas de aço (1 ou 2), a configuração das chapas e a condição de carregamento.

A resistência do concreto à compressão aos 28 dias variou de 63 MPa a 73 MPa.

As barras de aço longitudinais possuíam tensão de escoamento de 425 MPa e as chapas de aço 236 MPa.

As chapas de aço, com 1,5 mm de espessura e 236 MPa de resistência ao escoamento, foram coladas na face de tração de cada viga, após uma preparação cuidadosa das superfícies do concreto e da própria chapa. A resina epóxica possuía resistência à tração variando de 15 MPa a 17 MPa.

Freitas (1997) realizou um estudo sobre o comportamento estrutural de vigas reforçadas ao cisalhamento, aplicando-se a técnica de estribos de chapa de aço colados com resina epóxica.

Ensaiaram-se duas vigas biapoiadas, de seção retangular de 150 mm x 450 mm x 4500 mm de dimensões (v. Figura 8), fissuradas antes da execução do reforço, sendo uma reforçada com carregamento (viga V2) e outra reforçada sem carregamento (viga V5).

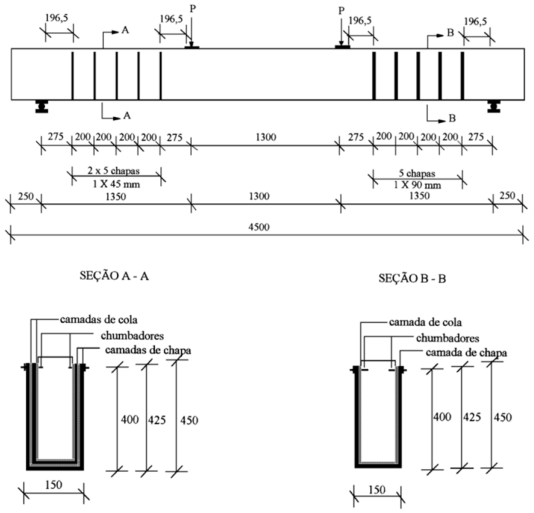


Figura 8. Dados (dimensões em mm) sobre as vigas ensaiadas por Freitas (1997).

A resistência média do concreto à compressão foi 37,7 MPa.

As barras longitudinais (2 ϕ16 mm + 3 ϕ 20 mm nas vigas V2 e V5) e os estribos (2 x ϕ 5 mm c. 200 mm na viga V2 e ϕ 5 mm c. 100 mm na viga V5) internos de aço foram do tipo CA-50.

As chapas de aço de 1 mm de espessura tinham tensões de escoamento e de ruptura de 333 MPa e 385 MPa, respectivamente.

A cola utilizada foi a resina epóxica SIKADUR-31 com resistência à compressão de 60 MPa.

A Tabela 2 apresenta as armaduras interna e externa, e a condição de carregamento das vigas ensaiadas.

Tabela 2. Dados sobre as vigas ensaiadas por Swamy *et al*. (1989).

Viga	A_s (mm^2)	A_{sw} (mm^2/mm)	Estribos de chapa de aço	Carga no reforço (kN)
V2	1345	0,392	lado esquerdo 2 x (45 mm x 1 mm) c. 200 mm lado direito 1 x (90 mm x 1 mm) c. 200 mm	50
V5	1345	0,196	lado esquerdo 2 x (45 mm x 1 mm) c. 200 mm lado direito 1 x (90 mm x 1 mm) c. 200 mm	0

OBS: A_s = armadura longitudinal interna; A_{sw} = armadura transversal interna.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de Swamy *et al*. (1987) mostraram que, para uma espessura de chapa t_p a mais fina possível, as cargas de fissuração P_r foram maiores com o aumento da espessura da cola t_b. Além disto, substituindo-se uma chapa espessa por chapas finas equivalentes ou chapas sobrepostas, o valor da carga de fissuração não foi afetado. A Figura 9 mostra a relação entre a carga de fissuração e as espessuras da cola e da chapa.

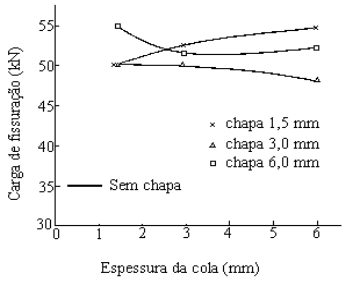


Figura 9. Relação entre carga de fissuração e espessuras da cola e chapa (Swamy *et al*., 1987).

A ação mista concreto-cola-chapa foi preservada até a ruptura das vigas, reduzindo-se todas suas deformações. A ruptura das vigas não ocorreu nas interfaces chapa-cola ou cola-concreto, mas invariavelmente no cobrimento do concreto. A Figura 10 mostra a influência da rigidez à flexão da viga na flecha no meio do vão.

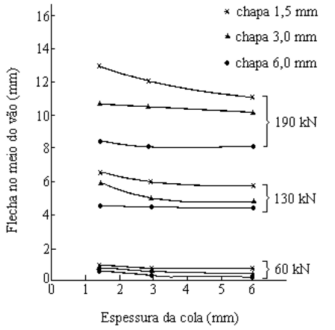


Figura 10. Influência da rigidez à flexão da viga na flecha no meio do vão (Swamy *et al*., 1987).

Também, devido à colagem de chapas, houve reduções da flecha medida no meio do vão da viga ensaiada (v. Figura 11), da deformação do aço interno e das aberturas de fissuras. A redução nas aberturas de fissuras e na flecha foi maior com o aumento das espessuras da chapa e da cola. As vigas com chapas sobrepostas mostraram o mesmo comportamento e foram ligeiramente mais rígidas que as vigas com chapas simples.

Com relação a cargas de ruptura P_u (v. Tabela 3), os resultados mostraram que as vigas com chapas de 1,5 mm e 3 mm de espessura suportaram cargas de 10% a 16% maiores que a carga de ruptura da viga de controle, enquanto as vigas com chapas de 6 mm mostraram um decréscimo de 5 a 16%.

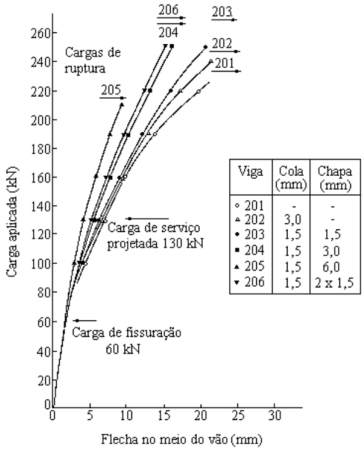


Figura 11. Efeito das espessuras da chapa e da cola na flecha no meio do vão (Swamy *et al*., 1987).

Tabela 3. Dados do reforço e cargas experimentais das vigas ensaiadas por Swamy *et al*. (1987).

Viga	f_c (MPa)	t_b (mm)	t_p (mm)	n	P_r (kN)	P_u (kN)
201	63,9	-	-	-	35,0	232
202	70,9	3	-	-	39,9	245
203	63,3	1,5	1,5	1	50,1	270
204	66,4	1,5	3	1	50,1	270
205	70,2	1,5	6	1	54,8	213
206	68,8	1,5	1,5	2	55,0	220
207	70,2	3	1,5	1	55,0	262
208	68,0	3	3	1	49,0	264
209	72,2	3	6	1	52,4	220
210	70,3	3	6	1	50,1	215
211	72,0	3	1,5	1	54,8	253
212	63,9	3	1,5	1	47,0	248
213	67,2	3	1,5	2	50,1	253
214	69,2	3	1,5	2	50,1	253
215	71,5	3	3	1	49,8	250
216	68,4	6	1,5	1	54,0	262
217	68,6	6	3	1	48,0	257
218	71,5	6	6	1	51,4	194
219	73,0	6	6	1	55,0	220
220	68,2	2-8	1,5	1	54,8	263
221	65,9	3	1,5	1	54,8	268
222	65,2	3	1,5	1	51,1	268
223	72,0	3	1,5	1	53,0	264
224	71,1	3	3	1	47,2	250

OBS: n = número de chapas de aço

Verificou-se que todas as vigas ensaiadas apresentaram índices de segurança adequados na ruptura, isto é, as relações entre carga de ruptura e

carga de serviço foram superiores ao índice de segurança de projeto, tomado como 1,6, mesmo para situações adversas, como concentrações de tensões na cola, e seções críticas onde houve chapas sobrepostas e extensa pré-fissuração.

As resistências à flexão das vigas reforçadas com chapas de aço coladas foram previstas satisfatoriamente pela norma inglesa para cálculo de estruturas de concreto, com exceção das vigas com chapas de 6 mm, que apresentaram ruptura prematura, não desenvolvendo sua resistência à flexão, apesar das chapas terem contribuído para o controle de fissuração e para a diminuição da deformação em serviço.

Todas as vigas com chapas de 1,5 mm apresentaram ruptura à flexão, com o escoamento dos aços da armadura interna e da chapa. As vigas com chapas de 3 mm em uma e duas camadas romperam pela ação combinada de flexão e cisalhamento na ligação concreto-reforço e quase alcançaram a capacidade resistente à flexão. Todas as vigas com chapas de 6 mm apresentaram ruptura por fendilhamento do concreto ao longo da armadura interna, soltando seu cobrimento e alcançando somente em torno de 70% de sua resistência teórica à flexão.

Finalmente, foi concluído que houve um limite para a espessura da chapa para a viga reforçada apresentar ruptura dúctil (escoamento das armadura interna e chapa colada). Garantindo-se a ação mista concreto-cola-chapa até a ruptura, dois fatores influenciaram a limitação da espessura da chapa: a relação entre largura da viga e espessura da chapa menor que 50, e a altura da linha neutra menor que 40% da altura útil da viga. Com isto, a técnica de colagem de chapa de aço mostrou-se um eficiente e econômico método de reforço estrutural.

Os resultados experimentais de Jones *et al.* (1988) mostraram que o detalhamento da ancoragem das chapas influiu consideravelmente na resistência, no modo de ruptura (v. Tabela 4) e na ductilidade (próxima à carga de ruptura) das vigas ensaiadas, mas não nas flechas para cargas de serviço (v. Figura 12).

De acordo com a Tabela 2, o uso de chumbadores não evitou o descolamento da chapa, mas impediu a sua completa separação e aumentou a resistência da viga F35 em até 8,1% com relação à da viga sem reforço (viga F01). As chapas com ancoragem em "L" surtiram melhor efeito nas vigas reforçadas, permitindo o escoamento das chapas e o aumento da resistência em até 35,8% com relação à da viga de controle não reforçada.

Verificou-se que existem forças de descolamento e concentrações de tensões cisalhantes nas extremidades das chapas coladas com um valor limite em torno de $\sqrt{2} \times f_{ct,sp}$, sendo $f_{ct,sp}$ a resistência do concreto à tração indireta na compressão diametral.

Tabela 4. Dados do reforço e cargas experimentais das vigas ensaiadas por Jones *et al.* (1988).

Viga	P_u (kN)	% acima da P_u da viga F31	% acima da P_u da viga F01	Modo de ruptura
F31	182	-	-13,3	D
F32	208	14,3	-1,0	D da chapa mais interna
F33	191	4,9	-9,1	D
F34	221	21,4	5,2	D e C
F35	227	24,7	8,1	D e C
F36	285	56,6	35,8	Y e C
F37	283	55,5	34,8	Y e C

OBS: D = descolamento da chapa; C = esmagamento do concreto; Y = escoamento da chapa.

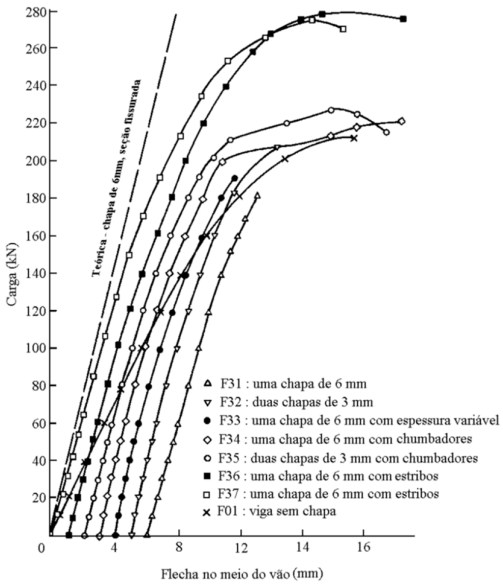


Figura 12. - Curvas carga x flecha no meio do vão das vigas ensaiadas por Jones *et al.* (1988).

Os ensaios realizados por Swamy *et al.* (1989) mostraram que todas as vigas ensaiadas romperam à flexão, ou seja, houve esmagamento do concreto na zona comprimida após o escoamento da armadura interna (para as vigas F01 e F02) ou após o escoamento das armaduras interna e de reforço (para as vigas restantes).

Concluiu-se que a camada de cola à base de resina epóxica foi capaz de assegurar o aumento de resistência, conforme se vê na Tabela 5 e rigidez das vigas reforçadas, não sendo apenas um agente de transferência de tensões.

Além disso, as chapas de aço foram capazes de restringir a abertura das fissuras e de permitir a transferência de altas tensões entre as fissuras, resultando em ganhos de resistência e rigidez e em um melhor desempenho do concreto na zona tracionada.

Tabela 5. Cargas de fissuração P_r e de ruptura P_u das vigas ensaiadas por Swamy *et al*. (1989).

Série	Viga	t_b (mm)	P_r (kN)	P_u (kN)
	F01	-	30,0	210,0
I	F02	3	30,0	214,2
	F11	1,5	40,0	239,0
	F12	1,5	30,0	232,0
II	F13	1,5	30,0	230,0
	F14	1,5	30,0	240,0
	F22	1,5	30,0	232,2
III	F23	1,5	30,0	233,0
	F24	1,5	30,0	232,3

Finalmente, foi concluído que o reforço das vigas pré-fissuradas sob carga aplicada mostrou-se eficiente, apesar de seus valores de deformação e aberturas de fissuras ligeiramente maiores que aqueles das vigas não fissuradas.

Os resultados de Jones e Swamy (1995) mostraram que, com relação à viga sem reforço ORB1, a viga ORB2, com chapa de 6 mm colada na face tracionada, apresentou redução da flecha de 40%, contra 30% da viga ORB3, com mesma chapa na face comprimida. Em termos de abertura de fissuras, na viga ORB2 a redução foi 60%, e na viga ORB3 não houve redução.

Concluiu-se que, para as vigas subarmadas (v. Tabela 6), a espessura limite para um modo de ruptura dúctil (escoamento da chapa) e um aumento de resistência considerável foi 3 mm.

Tabela 6. Resultados das vigas subarmadas ensaiadas por Jones e Swamy (1995).

Viga	t_p (mm)	P_u (kN)	Ganho de P_u (%)	Modo de ruptura
URB1	-	28,1	-	YS
URB2	1,5	40,0	42	YP
URB3	3	55,0	96	YP
URB4	6	57,5	105	D
URB5	10	53,1	89	D

OBS: YS = escoamento da armadura interna; YP = escoamento da chapa; D = descolamento da chapa.

Para as vigas superarmadas (v. Tabela 7), o aumento de resistência foi apenas 22% para a viga ORB3, que possuía chapa colada na face comprimida.

Tabela 7. Resultados das vigas superarmadas ensaiadas por Jones e Swamy (1995).

Viga	t_p (mm)	P_u (kN)	Ganho de P_u (%)	Modo de ruptura
ORB1	-	67,5	-	C
ORB2	6	97,5	44	D
ORB3	6	82,2	22	C e B

OBS: C = esmagamento do concreto; D = descolamento da chapa; B = flambagem da chapa.

As reduções verificadas nos valores de flechas e aberturas de fissuras das vigas reforçadas por Jones e Swamy (1995) podem ser vistas nas Figuras 13 e 14.

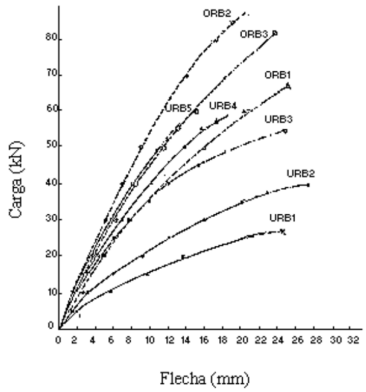


Figura 13. Curvas carga x flecha no meio do vão das vigas ensaiadas por Jones e Swamy (1995).

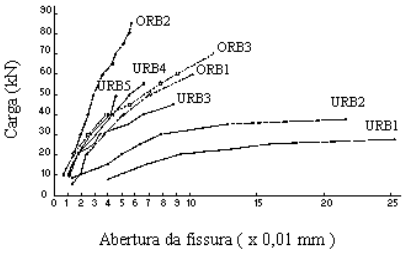


Figura 14. Curvas carga x abertura de fissura das vigas ensaiadas por Jones e Swamy (1995).

A Figura 15 apresenta os gráficos de carga x flecha das vigas 1 a 6, sendo neles possível verificar o efeito que as chapas coladas promovem em termos de desenvolvimento de flechas.

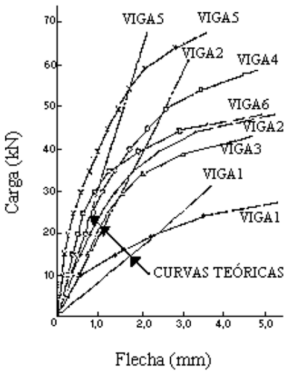


Figura 15. Curvas carga x flecha das vigas 1 a 6 ensaiadas por Jones e Swamy (1995).

Como mostra a Tabela 8, todas as vigas, exceto a viga 5 que apresentou ruptura por separação da chapa, romperam de forma dúctil (escoamento da chapa). O aumento da área da chapa (128 mm^2 a 256 mm^2) resultou no aumento da resistência, mas com redução da ductilidade.

Tabela 8. Resultados das vigas 1 a 6 ensaiadas por Jones e Swamy (1995).

Viga	A_p (mm^2)	P_r (kN)	P_u (kN)	Ganho de P_u (%)	modo de ruptura
1	-	15	29,4	-	YS
2	128	30	49,0	67	YP
3	128	25	45,0	53	YP
4	192	30	60,0	104	YP
5	256	40	68,0	131	D
6	128	35	49,7	69	YP

OBS: YS = escoamento da armadura interna; YP = escoamento da chapa; D = descolamento da chapa.

Na pesquisa da influência da cola no comportamento de vigas reforçadas, os resultados mostraram que a espessura da camada de cola pouco influiu nos resultados de flecha (v. Figura 16), fissuração e resistência das vigas ensaiadas.

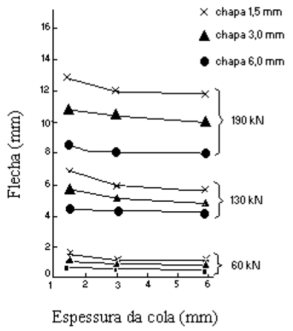


Figura 16. - Curvas flecha x espessura da cola das vigas ensaiadas por Jones e Swamy (1995).

Usando-se duas colas com módulo de elasticidade de 9,9 GPa e 0,92 GPa, verificou-se que a cola mais rígida acarretou menores flechas, e, para a carga de serviço, menores aberturas de fissuras. Com a cola menos rígida, a carga de ruptura e a ductilidade foram ligeiramente maiores, pois, possivelmente, ocorreu uma redistribuição de tensões nas zonas de ancoragem, locais de concentração de tensões.

Os resultados dos ensaios de Swamy *et al.* (1995) encontram-se na Tabela 9 e os modos de ruptura observados nas vigas ensaiadas são mostrados na Figura 17.

Apesar de não ter havido manutenção durante o período de 11 a 12 anos de exposição, as condições gerais e o desempenho das vigas reforçadas foram muito satisfatórios. Para cargas de serviço, as vigas ensaiadas após o período de exposição apresentaram flechas e aberturas de fissuras similares ou menores que os valores obtidos na viga reforçada de controle.

Verificou-se que as cargas de ruptura das vigas reforçadas, após o período de exposição, foram entre 1% a 29% maiores que a carga de ruptura da viga de controle.

Tabela 9. Dados do reforço e cargas experimentais das vigas ensaiadas por Swamy *et al.* (1995).

Viga	t_b (mm)	n	P_u (kN)	Modo de ruptura
103	2-8	1	271	F
104	3	1	295	F
105	3	1	294	S
106	3	1	298	F
107	3	2	289	S
109	3	1	255	F e RCC
110	6	1	285	F
111	2-8	1	290	F
112	3	1	266	S
113	3	1	308	F
114	3	1	255	RLA e S
115	3	1	327	C
116	3	1	266	RCC e S
117	3	1	318	F
118	6	1	310	F
119	2-8	1	297	F
120	3	1	302	F
121	3	1	284	RLA e RCC
122	3	1	253	RLA e RCC
123	3	2	295	RCF/RLCM e S
124	3	2	272	RCF/RLCM e S
201	-	-	232	F
202	3	-	245	F

OBS: F = flexão; S = cisalhamento; RCC = ruptura da cola por coesão; RLA = ruptura da ligação por adesão; RCF = ruptura do cobrimento de concreto por fendilhamento; RLCM = ruptura da ligação de chapas múltiplas.

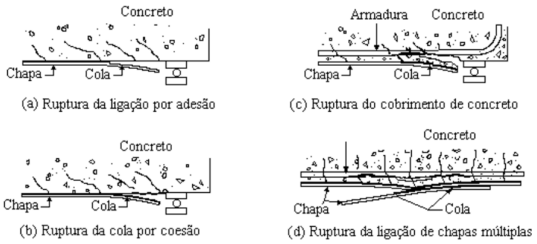


Figura 17. – Modos de ruptura observados nas vigas ensaiadas por Swamy *et al.* (1995).

As vigas com chapas contínuas não apresentaram efeito adverso devido à exposição e, em média, suportaram cargas 10% maiores que as cargas teóricas.

As vigas com chapas emendadas em uma ou mais posições apresentaram alguma corrosão entre as chapas e ruptura por cisalhamento ou da ligação das chapas emendadas. Contudo, a carga de ruptura foi reduzida em apenas 3% a 4% com relação à carga teórica de ruptura.

As vigas com chapas sobrepostas apresentaram, em alguns casos, corrosão entre as chapas e redução na carga de ruptura entre 5% a 6% com relação à viga de controle, por causa da reduzida relação entre a largura da chapa e a espessura da chapa.

Foi concluído também que a extensão da corrosão resultante da exposição e seus efeitos no desempenho estrutural variaram nitidamente com a configuração da chapa colada, recomendando-se o uso de chapas ancoradas em forma de "U".

CONCLUSÃO

Constatou-se que a maioria dos estudos existentes sobre técnicas de reforço se refere à colagem de chapas de aço nas faces tracionada e laterais de vigas de concreto armado.

Os autores desses estudos concluíram que há um aumento da capacidade resistente (à flexão ou ao cisalhamento) e da rigidez, um controle da fissuração e uma diminuição dos valores de flechas, de aberturas de fissuras e de deformação do aço interno.

O problema de concentração de tensões nas extremidades da chapa colada é atenuado por exemplo com o uso de uma cola mais flexível, de uma chapa com espessura pequena e situando estas extremidades o mais próximo possível do apoio da viga.

O uso de chumbadores impediu a completa separação das chapas coladas, mas não evitou o descolamento destas nos seus bordos.

REFERÊNCIAS

Carneiro, L. A. V.. Reforço à flexão e ao cisalhamento de vigas de concreto armado, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 196 p., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.

Comité Euro-International du Béton, CEB. Assessment on concrete structures and design procedures for upgrading, Bulletin d'Information n. 162, pp. 288, Lausanne, London, 1983.

Freitas, L. B. de. Reforço de vigas de concreto armado ao esforço cortante com chapas de aço coladas. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 149 p., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.

Jones, R.; Swamy, R. N.. Plate bonding - what can it do to your beams?, Construction Repair, pp. 43-47, May-Jun., 1995.

Jones, R.; Swamy, R. N.; Charif, A.. Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates, The Structural Engineer, v. 66, n. 5/1, pp. 85-94, Mar., 1988.

Swamy, R. N.; Hobbs, B.; Roberts, M.. Structural behaviour of externally bonded, steel plated RC beams after long-term exposure, The Structural Engineer, v. 73, n. 16/15, pp. 255-261, Aug., 1995.

Swamy, R. N.; Jones, R.; Bloxham, J. W.. Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plates, The Structural Engineer, v. 65, n. 2, pp. 59-68, Feb., 1987.

Swamy, R. N.; Jones, R., Charif, A.. The effect of external plate reinforcement on the strengthening of structurally damaged RC beams, The Structural Engineer, v. 67, n. 3/7, pp. 45-56, Feb., 1989.