

VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS POR MEIO DE ENCAMISAMENTO

REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED USING JACKETING USING JACKETING

Paula Miranda da Silva¹, Andréa Prado Abreu Reis Liserre², Áureo Ferreira da Silva³

Recebido em 27 de outubro de 2012; recebido para revisão em 01 de novembro de 2012; aceito em 03 de novembro de 2012; disponível on-line em 06 de novembro de 2012.



PALAVRAS CHAVES:

Vigas;
Peças compostas;
Flexão;
Reforço;
Conectores de cisalhamento.

RESUMO: Toda estrutura deve ser concebida para ter um desempenho satisfatório durante sua vida útil atendendo aos requisitos para os quais foi projetada. Quando seu desempenho se torna insatisfatório geralmente é possível realizar uma intervenção de forma a reabilitar a estrutura. O reforço estrutural tem a característica de reabilitar a estrutura aumentando sua capacidade portante original. Entre as várias técnicas de intervenção existentes, optou-se por estudar a técnica do encamisamento, que corresponde ao aumento da seção transversal de concreto com ou sem adição de armadura. Neste trabalho, priorizou-se o estudo de vigas encamisadas parcialmente adicionando-se uma camada de concreto à face comprimida. Para garantir a ligação entre os concretos do reforço e do substrato, foram utilizados conectores de cisalhamento. O aumento da seção de concreto e a disposição dos conectores se deram ao longo de todo o comprimento longitudinal da peça. Para analisar o comportamento das vigas reforçadas, foram realizados duas séries de ensaios. Na primeira série, a variável estudada foi o tipo de conector de cisalhamento que era mais eficiente no combate ao deslocamento entre os concretos. Na segunda série de ensaios adotou-se um único tipo de conector tipo, e a partir daí, as variáveis de estudo foram: a influência da taxa de conector, a influência da pré-fissuração, e a influência da armadura de confinamento na região do reforço. O tratamento de superfície adotado foi o apicoamento manual sem uso de ponte de aderência. Os resultados dos ensaios indicaram que a presença de um conector de cisalhamento tipo "I", formado por uma barra nervurada reta, conseguiu evitar a perda da aderência entre o concreto novo e o substrato, impedindo o deslocamento parcial entre estes materiais. Entretanto, para que a estrutura reforçada funcionasse adequadamente, era necessário não apenas o uso dos conectores de cisalhamento, mas a correta disposição deste ao longo da peça, bem como o uso de armaduras adicionais responsáveis pelo confinamento do concreto dependendo da espessura de concreto de reforço adicionada. A resistência das peças reforçadas usando a técnica proposta indicaram bons resultados, visto que tanto nas peças pré-fissuradas quanto nas não pré-fissuradas antes da execução da intervenção, foi observado um ganho de resistência significativo em relação a viga original antes do reforço.

* Contato com os autores:

¹ e-mail : paulaengenheira@hotmail.com (P. M. da Silva)

Mestre em Engenharia Civil pelo Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás

² e-mail : andrea.liserre@gmail.com (A. P. A. R. Liserre)

Professora Dsc. da Escola de Engenharia Civil – Universidade Federal de Goiás (EEC/UFG)

³ e-mail : aureo.ferreira@ig.com.br (A. F. da Silva)

Mestrando do Curso de Mestrado em Engenharia Civil - Escola de Engenharia Civil – Universidade Federal de Goiás (CMEC-EEC-UFG)

1. INTRODUÇÃO

Toda estrutura deve ser executada para ter desempenho satisfatório conforme as finalidades de uso para a qual foi projetada. A NBR 6118:2003, em seu item 6.1, explicita que as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas para que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto, e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, as mesmas conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil. Entretanto, mesmo o concreto sendo considerado um material durável, em alguns casos ocorre problemas patológicos que deterioram as estruturas. As causas da deterioração são as mais diversas: envelhecimento natural da estrutura, falhas involuntárias e casos de imperícia, erros de execução, erros de projeto, utilização inadequada, entre outros fatores.

O estágio em que cada edificação, em função do grau de deterioração, atinge níveis de desempenho insatisfatório varia de acordo com o tipo de estrutura. Algumas delas, por falhas de projeto ou de execução, já iniciam suas vidas úteis de forma insatisfatória, enquanto outras chegam ao final ainda mostrando um bom desempenho. Por outro lado, o fato de uma estrutura apresentar-se com desempenho insatisfatório não significa que ela esteja necessariamente condenada. A avaliação desta situação é, talvez, o objetivo maior da Patologia das Construções, posto que essa seja a ocasião que requer imediata intervenção técnica, de forma que ainda seja possível reabilitar a estrutura.

A NBR 6118 (2003), em seu item 25.3, indica que se for constatada alguma não-conformidade de parte ou do todo da estrutura, o engenheiro responsável pela obra deve avaliar a situação e adotar uma das seguintes alternativas: determinar as restrições de uso da estrutura; providenciar o projeto de reforço ou decidir pela demolição parcial ou total da estrutura. Contudo, devido às particularidades presentes em cada problema patológico detectado, e em cada estrutura construída, ainda não há uma normalização técnica destinada exclusivamente ao projeto e execução de reforço de estruturas de concreto armado no Brasil. Isso faz com que os engenheiros responsáveis pelo projeto de um reforço estrutural ainda utilizem técnicas baseadas na experiência empírica acumulada, pois não existe uma metodologia de análise do comportamento estrutural de peças reabilitadas, nem diretrizes que orientem o projetista durante o processo de redimensionamento e reprojeto.

Existem várias técnicas de reabilitação de estruturas de concreto armado, dentre elas pode-se

citar: a protensão externa, a adição de chapas ou perfis metálicos, o uso de materiais compósitos tais como fibras de carbono, a adição de concreto com ou sem aço à seção transversal do elemento, dentre outras. Essa última técnica, também conhecida por encamisamento da seção, é relativamente simples, pois usa os materiais mais comuns da construção civil, que são o aço e o concreto. Isso faz com que o custo da reabilitação seja bastante competitivo quando comparado a outras técnicas de reabilitação estrutural, sendo uma das mais utilizadas no Brasil. Apesar disso, ainda existem vários fatores que merecem ser investigados para avaliar melhor o comportamento de elementos estruturais reabilitados usando este tipo de intervenção. No caso do reforço de vigas por encamisamento, geralmente adiciona-se uma nova camada de concreto com ou sem barras de aço na face tracionada ou na face comprimida, logo o reforço envolverá apenas parcialmente a seção original da estrutura existente. Entretanto, nada impede que o encamisamento seja feito em todo o contorno do elemento estrutural (encamisamento total). A Figura 1 ilustra fotos de vigas reforçadas pela técnica do encamisamento.

Vigas reforçadas por encamisamento são, na verdade, peças compostas, pois são formadas pelo contato entre dois concretos moldados em idades diferentes, e que possuem características distintas. Quando se reforça um elemento estrutural usando esta técnica, uma das maiores preocupações é garantir uma aderência adequada entre o reforço (concreto novo) e o concreto original da peça (substrato) para evitar o deslizamento entre as partes, só assim a peça irá trabalhar monoliticamente. Um recurso muito utilizado para garantir a monoliticidade é a adoção de pinos que atravessam a interface dos dois concretos, os quais passam a resistir aos esforços de cisalhamento que ali se desenvolvem. Esses pinos podem ser representados por estribos prolongados, chumbadores, ou pequenas barras coladas com resinas (Figura 2).

Apesar desta técnica ser bastante utilizada, ainda há lacunas de conhecimento no que se refere ao conhecimento do comportamento de peças reforçadas por esta técnica em relação, por exemplo, a forma de determinar a quantidade de aço da armadura de costura. Diante deste cenário, estabeleceu-se como objetivo principal deste trabalho, a avaliação do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas por adição de uma camada de concreto à face comprimida, usando conectores de cisalhamento para melhorar a aderência entre o concreto antigo (substrato) e o novo concreto adicionado. Para isso, foram analisados os seguintes parâmetros:

- influência do tipo de conector de cisalhamento na aderência entre concretos moldados em idades distintas;
- influência da taxa de conectores de cisalhamento posicionados ao longo da junta, na aderência entre os concretos do substrato e do reforço;
- influência do nível de pré-fissuração existente antes da execução do reforço no comportamento final da peça reabilitada;
- influência de uma armadura de confinamento na região do reforço.



(a) Viga reforçada apenas na região tracionada.
Fonte: SANTOS, E.W.F. (2006).



(b) Viga reforçada em todo contorno (encamisamento total).

Figura 1: Fotos de vigas reforçadas por encamisamento parcial e encamisamento total.

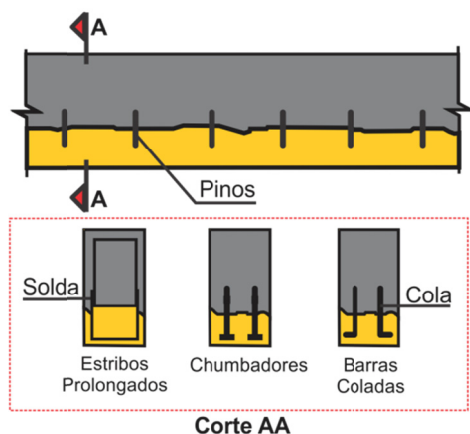


Figura 2: Pinos de ligação entre concretos.
Fonte: (Piancastelli, 2005).

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desenvolvido foi composto por duas séries de ensaios, no qual se levou à ruptura um total de onze vigas retangulares biapoiadas de concreto armado, sendo duas monolíticas e nove reforçadas. A nomenclatura e as principais características dessas vigas encontram-se na Tabela 1.

As vigas possuíam comprimento de 2000 mm, vão teórico de 1800 mm e seção transversal com largura de 120 mm. Nas vigas monolíticas, a altura da seção transversal dependia do tipo de peça de referência que representavam. No caso da viga monolítica de referência que representava a estrutura antes do reforço, a altura era de 250 mm. Já para a viga monolítica de referência que representava a peça após o reforço, a altura era de 400 mm. Todas vigas a serem reforçadas possuíam altura de 250 mm antes da intervenção e, após o reforço, a altura passava para 400 mm, pois se acrescentava uma camada de 150 mm de concreto à face comprimida.

Todas as vigas possuíam armadura longitudinal tracionada composta por duas barras de 16 mm de diâmetro, armadura transversal composta por estribos de dois ramos de 6.3mm de diâmetro espaçados a cada 125 mm, e porta-estribos de 5.0mm de diâmetro. Nas vigas VRI3, VRAF3, VRI1B, VRI1C, VRI2B e VRI2C foram colocadas armaduras de confinamento na camada de 150 mm onde seria adicionado o concreto do reforço. Na viga reforçada com conector "U" invertido (VRU3) não se usou armadura de confinamento, pois essa função já era exercida pelo próprio conector devido à geometria deste. Esta armadura também não foi usada nas vigas VRI1A e VRI2A a fim de se avaliar a real influência desta armadura na resistência final da peça. A Figura 3 apresenta as seções transversais e os detalhes das armaduras das vigas ensaiadas.

Na 1ª série, foram ensaiadas duas vigas monolíticas de referência (VM25 e VM40) e três vigas reforçadas (VRI3, VRU3 e VRAF3) que se diferenciavam apenas em função do tipo de conector de cisalhamento usado. Com estes ensaios se analisou a influência do tipo do conector na aderência entre os concretos do substrato e do reforço. Os três tipos de conectores usados respectivamente nas vigas VRI3, VRU3 e VRAF3 tinham as seguintes características: os do tipo "I" e "U" invertido eram formados por barra de aço nervurada CA-50, e o do tipo "AF" era um parafuso de expansão mecânica do tipo "parabolt" da marca Âncora Sistemas de Fixação, com diâmetro de 8.0 mm, do mesmo tipo dos usados por Sahb (2008) e Risso (2008).

Para avaliar a eficiência destes conectores na resistência ao cisalhamento da junta formada entre o concreto do substrato e do reforço, utilizou-se a mesma

área de aço de conectores ($a_{sc} = 5 \text{ cm}^2/\text{m}$) nas três vigas reforçadas da 1ª série. As características desses

conectores estão na Tabela 2, e a Figura 4 apresenta fotos destes dispositivos.

Tabela 1: Nomenclatura e características das vigas ensaiadas

Série	Viga	Descrição
1ª	VM25*	Viga monolítica de seção 120 mm x 250 mm, não fissurada
	VM40*	Viga monolítica de seção 120 mm x 400 mm, não fissurada
	VRI3*	Viga reforçada com conector "I", $a_{sc} = 5,00 \text{ cm}^2/\text{m}$, com armadura de confinamento, não fissurada
	VRU3*	Viga reforçada com conector "U", $a_{sc} = 5,00 \text{ cm}^2/\text{m}$, com armadura de confinamento, não fissurada
	VRAF3*	Viga reforçada com conector "AF", $a_{sc} = 5,00 \text{ cm}^2/\text{m}$, com armadura de confinamento, não fissurada.
2ª	VRI1A*	Viga reforçada sem conector sem armadura de confinamento, não fissurada
	VRI1B*	Viga reforçada sem conector com armadura de confinamento, fissurada
	VRI1C**	Viga reforçada sem conectores com armadura de confinamento, fissurada.
	VRI2A*	Viga reforçada com conectores, $a_{sc} = 1,25 \text{ cm}^2/\text{m}$, sem armadura de confinamento, não fissurada
	VRI2B*	Viga reforçada com conectores, $a_{sc} = 1,25 \text{ cm}^2/\text{m}$, com armadura de confinamento, fissurada.
	VRI2C**	Viga reforçada com conectores, $a_{sc} = 1,25 \text{ cm}^2/\text{m}$, com armadura de confinamento, fissurada.

Obs.:

* : Vigas ensaiadas usando o esquema estático tipo "a" ilustrado na Figura 1.a

** : Vigas ensaiadas usando o esquema estático tipo "b" ilustrado na Figura 1.b

a_{sc} : área de aço de conectores de cisalhamento.

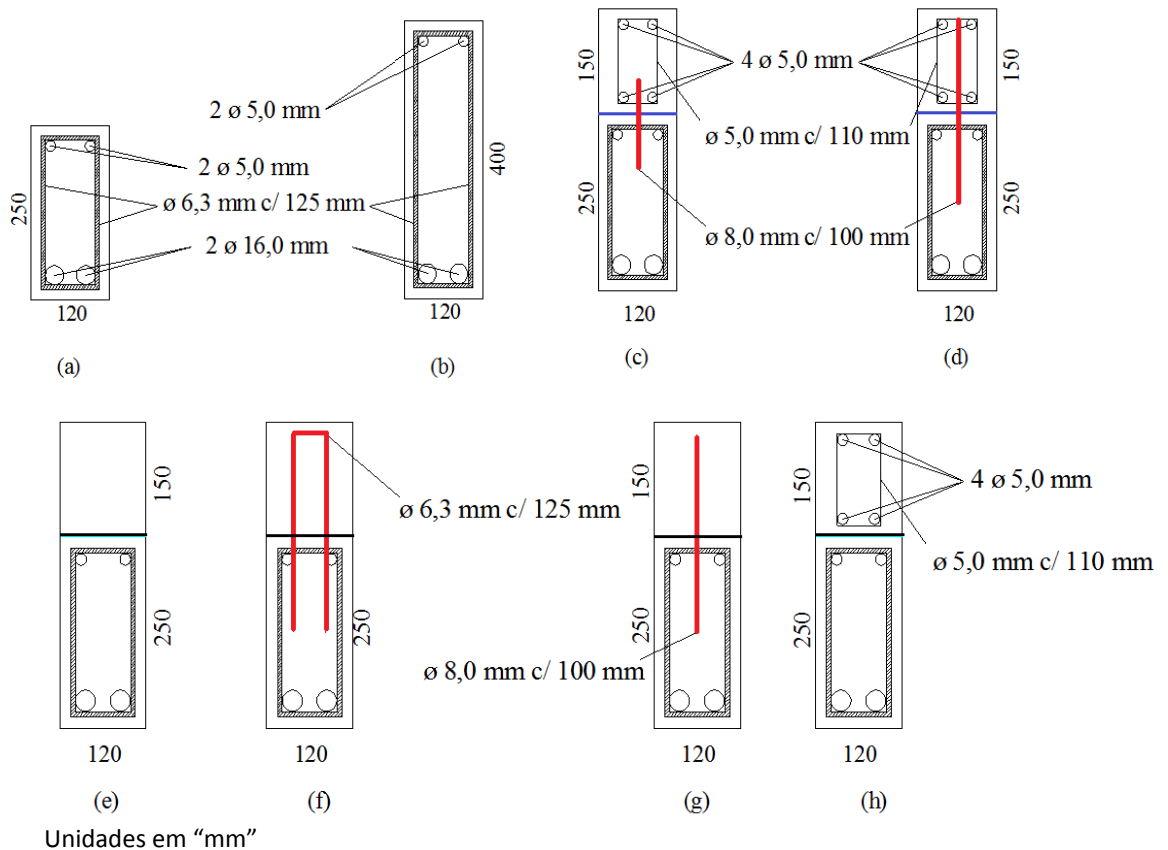


Figura 3: Seção transversal e detalhamento das vigas: (a) VM25 e todas as vigas antes do reforço; (b) VM40; (c) VRAF3; (d) VRI3; (e) VRI1A; (f) VRU3; (g) VRI2A; (h) VRI1B e VRI1C.

Tabela 2: Características dos conectores de cisalhamento utilizados

Tipo de conector	\varnothing_c (mm)	a_{sc} (cm ² /m)			L_{sub} (cm)	L_{ref} (cm)
"AF"	8.0 a cada 10 cm	5,0	-	-	7,0	3,5
"U"	6.3 a cada 12,5 cm	5,0	-	-	12,5	13,5
"I"	8.0 c/ espaçamento variável	5,0	1,25	0,0	12,5	13,5

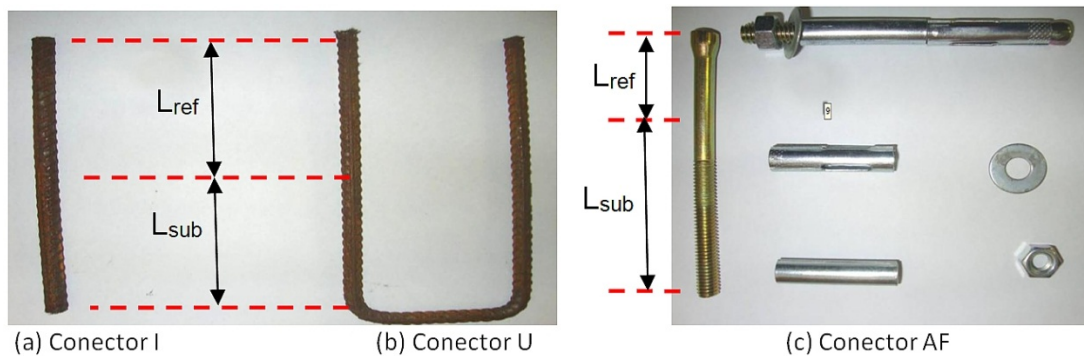
Legenda:

\varnothing_c = diâmetro do conector

a_{sc} = área de aço dos conectores

L_{sub} = comprimento do trecho do conector inserido dentro do substrato

L_{ref} = comprimento do trecho do conector inserido dentro do reforço

**Figura 4:** Fotos detalhadas dos conectores de cisalhamento utilizados (a_{sc})

Na 2ª série foram ensaiadas seis vigas (VRI1A, VRI1B, VRI1C, VRI2A, VRI2B e VRI2C), todas reforçadas. Quatro estavam pré-fissuradas antes da execução do reforço, e duas não utilizaram armadura para confinar o concreto adicionado à face comprimida. Estas peças também se diferenciavam em função das áreas de aço de conectores de cisalhamento tipo "I" utilizada, que foram de a_{sc} igual a: 5 cm²/m, a 1,25 cm²/m ou sem a_{sc} .

Para reforçar as vigas, inicialmente fez-se a escarificação manual da face comprimida usando-se ponteira e martelo, e fez-se os furos para fixar os conectores de cisalhamento com furadeira elétrica. Em seguida, a superfície rugosa foi limpa e escovada para remover todo pó e material solto e os conectores de

cisalhamento foram fixados preenchendo-se os furos com resina epóxi, conforme ilustra a Figura 5. Logo após, posicionava-se a armadura de confinamento na face comprimida das peças que possuíam esta armadura, e procedia-se a concretagem da camada de 150 mm de espessura do reforço.

As vigas VRI1B, VRI2B, VRI1C e VRI2C foram colocadas no pórtico de reação e carregadas antes de executar o reforço até próximo da carga de escoamento da armadura longitudinal de tração para gerar uma pré-fissuração. Desta forma era possível avaliar a influência deste parâmetro na resistência final. Em seguida, tais peças foram descarregadas e só então o reforço foi executado.

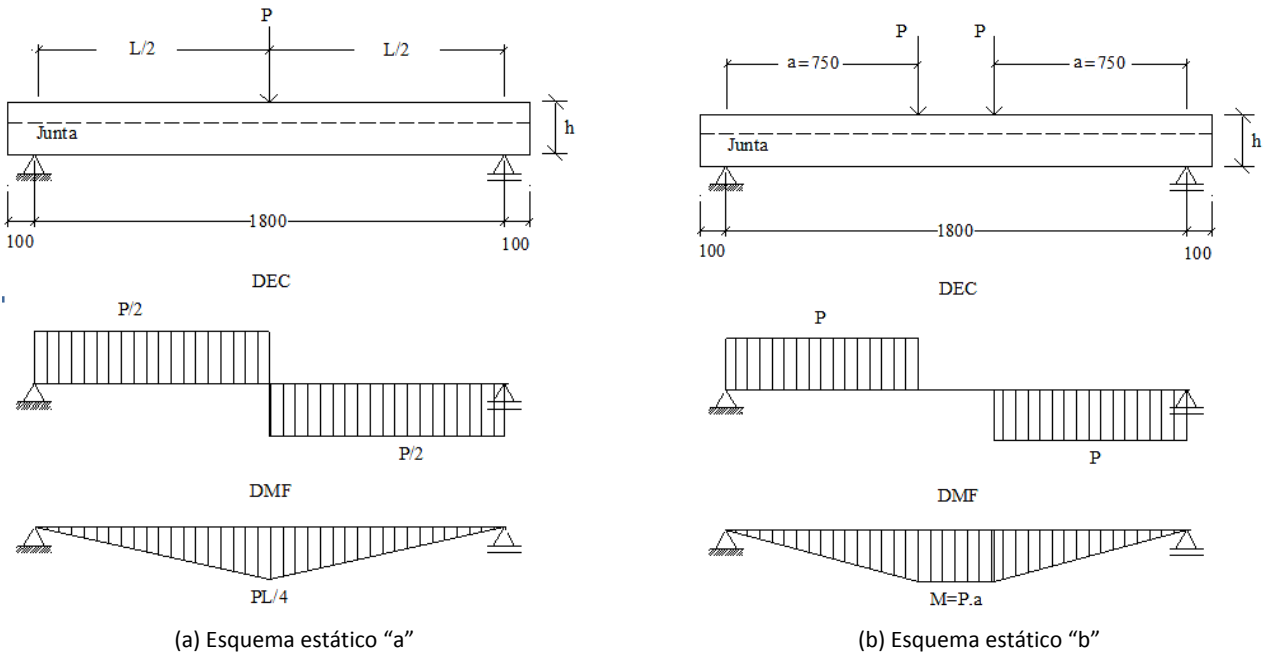
**Figura 5:** (a) aspecto da superfície escarificada, (b) aplicação de resina epóxi em um conector "I", (c) armadura de confinamento posicionada em uma viga.

Após o concreto do reforço atingir uma resistência à compressão próxima à do substrato, as peças foram posicionadas no pórtico de reação e carregadas até atingir a ruptura, utilizando-se um dos esquemas estáticos ilustrados na Figura 6. Com exceção das vigas VRI1B e VRI1C, nas quais se aplicou duas cargas concentradas equidistantes dos apoios (esquema estático “b”), todas as demais vigas foram ensaiadas aplicando-se uma única carga concentrada no meio do vão (esquema estático “a”). Esta alteração foi utilizada na tentativa de aumentar as tensões tangenciais atuantes na região da junta, e forçar uma eventual ruptura prematura por falhas de aderência entre os concretos do substrato e do reforço.

Para monitorar o comportamento das vigas foram colados extensômetros elétricos para medir as deformações da armadura longitudinal de tração, dos estribos, da armadura de confinamento, dos conectores de cisalhamento, e do concreto. A Figura 7 apresenta

a instrumentação, no qual os extensômetros da armadura foram denominados de EA, e os extensômetros do concreto foram denominados de EC. Também foram monitorados os deslocamentos verticais (flechas) e horizontais (deslizamentos ao longo da junta entre substrato e reforço), usando relógios comparadores, conforme indica a Figura 8. Os relógios fixados ao longo da linha pontilhada monitoravam o deslizamento ao longo da junta.

Em casos reais de reforço por encamisamento, os engenheiros geralmente apresentam dificuldades de moldar e adensar o novo concreto devido à falta de acessibilidade ao local do reforço. Em virtude disso, optou-se por utilizar concreto auto-adensável (CAA) com brita “0” na confecção do concreto do reforço das vigas estudadas, visto que a avaliação do desempenho deste material em casos de reabilitação de estruturas é extremamente interessante para o meio técnico.

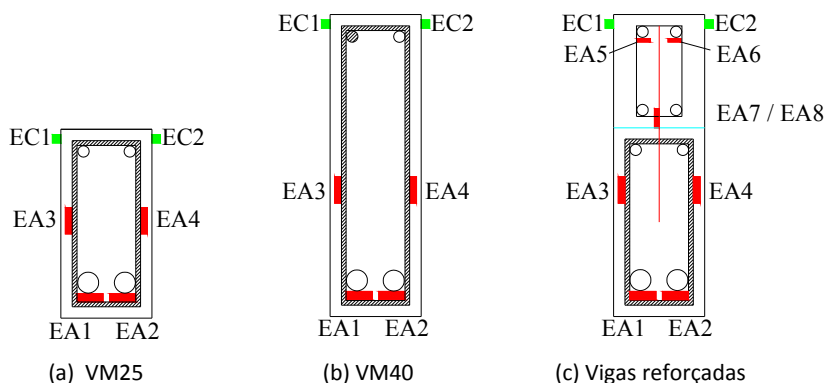


(a) Esquema estático “a”

(b) Esquema estático “b”

Legenda: DEC: Diagrama de Esforços cortantes; DMF: Diagrama de Momento Fletor.

Figura 6: Esquemas estáticos adotados nos ensaios (dimensões em mm).



(a) VM25

(b) VM40

(c) Vigas reforçadas

Figura 7: Posição dos extensômetros na armadura e no concreto.

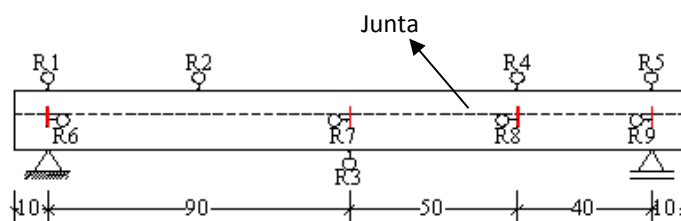


Figura 8: Posição dos relógios digitais comparadores (unidades em cm).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A resistência à compressão (f_{cj}) dos concretos do substrato e do reforço obtidas por corpos-de-prova cilíndricos 15 cm x 30 cm ensaiados no dia do ensaio das vigas estão na Tabela 3. A evolução dos módulos de elasticidade em função da idade do concreto, também obtida por corpos-de-prova, está ilustrada na Figura 9.

Comparando os resultados desta tabela com os deste gráfico percebe-se que apesar das vigas apresentarem diferenças de resistência à compressão

entre os concretos do reforço e do substrato, os módulos de elasticidade de ambos os materiais eram próximos. Portanto, constata-se que o uso do CAA com brita “0” para executar esta intervenção trouxe vantagens porque se minimizava a probabilidade de surgirem deformações diferenciais na região da junta, e conseqüentemente, minimizava-se o aparecimento de fissuras horizontais neste local. Além disso, o CAA por ser um material que possui alto teor de finos, provavelmente proporcionou uma melhor aderência ao concreto do substrato.

Tabela 3: Resistência à compressão dos concretos das vigas na data do ensaio

Série	Peça	Idade no ensaio (dias)		f_{cj} (MPa)		Traço	
		Substrato	Reforço	Substrato	Reforço	Substrato	Reforço
1ª	VM25	182	-	39,8	-	T1	-
	VR3I	179	79	39,7	45,4	T1	T2
	VR3U	186	86	39,9	45,7	T1	T2
	VRAF	186	86	39,9	45,7	T1	T2
	VM40	184	-	39,8	-	T1	-
2ª	VRI1A	359	53	42,8	41,3	T1	T1B
	VRI2A	358	52	42,8	41,2	T1	T1B
	VRI2B	360	54	42,8	41,3	T1	T1B
	VRI1B	357	51	49,4	41,1	T1A	T1B
	VRI1C	360	54	49,4	41,3	T1A	T1B
	VRI2C	361	55	49,4	41,4	T1A	T1B

Obs.: Tipos de traços: T1 refere-se à concretagem do dia 25/01/10 (substrato)

T2 refere-se à concretagem do dia 06/05/10 (reforço)

T1A refere-se à concretagem do dia 05/06/10 (substrato)

T1B refere-se à concretagem do dia 27/11/10 (reforço)

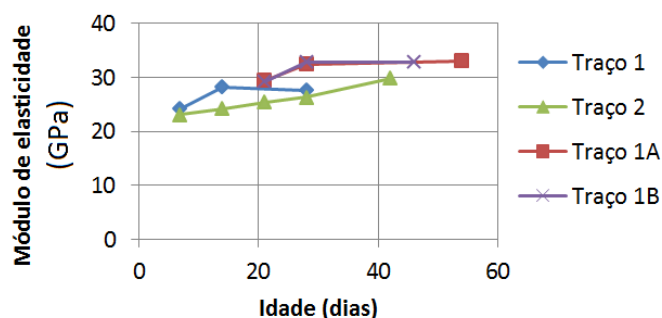


Figura 9: Evolução do módulo de elasticidade x idade para os traços usados.

A Tabela 4 apresenta o modo de ruptura das vigas ensaiadas, o momento atuante no instante da ruptura (M_u) e a relação entre os momentos de ruptura das vigas reforçadas e das vigas monolíticas VM25 e VM40. Optou-se por apresentar o valor do momento e não da força última aplicada, pois como foram usados dois esquemas de ensaio distintos, não seria possível compara diretamente os valores das forças de ruptura

entre as peças. Contudo, pelo fato das peças terem sido dimensionadas para romper por escoamento da armadura tracionada, todas deveriam romper teoricamente para o mesmo valor de momento fletor atuante, independentemente da posição da carga aplicada. Logo, considerou-se aceitável a comparação da resistência da peça usando o momento fletor.

Tabela 4: Momento de ruptura e modos de ruptura

Peça	M_u (kN.m)	M_u/M_u_{VM25}	M_u/M_u_{VM40}	Modo de ruptura
VM25	54,0	-	-	Escoamento do aço tracionado
VM40	96,3	1,8	-	Escoamento do aço tracionado
VRI3	111,6	2,1	1,2	Escoamento do aço tracionado
VRU3	101,3	2,0	1,1	Perda parcial de aderência e escoamento do aço
VRAF3	108,0	2,0	1,1	Perda parcial de aderência e escoamento do aço
VRI1A	76,5	1,4	0,8	Perda parcial de aderência e escoamento do aço
VRI1B	110,0	2,0	1,1	Perda parcial de aderência e escoamento do aço
VRI1C	102,0	1,9	1,1	Perda parcial de aderência e escoamento do aço
VRI2A	99,0	1,8	1,0	Escoamento do aço tracionado
VRI2B	108,0	2,0	1,1	Escoamento do aço tracionado
VRI2C	102,0	1,9	1,1	Escoamento do aço tracionado

Pela Tabela 4 percebe-se que todas as vigas reforçadas apresentaram aumento real de capacidade portante em relação à viga VM25, que representava a viga antes da execução da reabilitação. A maioria das vigas reforçadas praticamente dobrou de resistência, a única exceção foi a viga VRI1A, na qual o aumento da resistência foi de apenas 40%. Isso provavelmente ocorreu porque a VRI1A não utilizava conectores de cisalhamento nem armadura de confinamento, o que prejudicou seu monolitismo, e permitiu a ocorrência de uma ruptura prematura por perda parcial de aderência ao longo da junta.

Os resultados indicaram que, com exceção da viga VRI1A, todas as demais apresentaram capacidades portante superiores a da viga VM40, indicando que as peças

reforçadas realmente trabalharam como se fossem peças monolíticas mesmo depois de passarem pela intervenção apresentada neste trabalho.

Os resultados dos ensaios das vigas reforçadas da 1ª série indicaram que o conector tipo “I” foi o mais eficiente para impedir a perda de aderência entre o concreto do substrato e o concreto do reforço. Isso porque as vigas VRU3 e VRAF3, executadas usando conectores tipo “U” e “AF”, apresentaram indícios de deslocamento entre o concreto do reforço e do substrato aproximadamente à 1/4 do vão. Já a viga VRI3, que usava conector tipo “I”, não apresentou nenhuma fissura na região da junta, sugerindo que este conector conseguiu impedir o deslizamento entre estes dois

matérias. A Figura 10 apresenta o esquema de fissuração de algumas vigas, e a elipse vermelha indica o local em que ocorreu o deslocamento localizado entre os concretos do substrato e do reforço.

Constatado que o conector “I” era o mais eficiente, este foi utilizado nas vigas da 2ª série de ensaios. Nesta série, foi analisada a influência da taxa de conectores na resistência ao cisalhamento da junta entre concreto novo e concreto antigo.

As fissuras horizontais que indicavam perda parcial da aderência entre os concretos só surgiram nas vigas que não tinham conectores de cisalhamento tipo “I” ($a_{sc} = 0,0 \text{ cm}^2/\text{m}$), ou nas peças que usavam outros tipos de conectores de cisalhamento (conectores “AF” e “U”). No caso das peças que usaram conector tipo “I”, as que apresentaram maior perda parcial da aderência foram as VR1A, VRI1B e VRI1C, indicando que a ausência da armadura de costura coloca em risco o desempenho da peça reabilitada, uma vez que existe a possibilidade de ocorrer ruptura prematura na região da junta.

Entretanto, comparando-se a VRI1A com as vigas VRI1B e VRI1C, que não tinham conectores de cisalhamento, mas que possuíam armadura de confinamento, percebeu-se a que a armadura de confinamento foi essencial para o bom funcionamento da intervenção analisada. Acredita-se que esta armadura tenha, de alguma forma, retardado o aparecimento das

fissuras na região da junta, fazendo com que a capacidade portante não fosse muito prejudicada porque a perda de aderência das vigas VRI1B e VRI1C ocorreu praticamente ao mesmo tempo em que a armadura longitudinal iniciava seu escoamento. De qualquer forma, este fato confirma a importância do tipo e da taxa de conector usado no projeto do reforço para garantir uma boa monoliticidade da estrutura reabilitada.

No caso deste trabalho, percebeu-se que ao acrescentar uma camada de 150 mm de concreto à face comprimida de uma viga, gerando um aumento de 60% na altura de sua seção transversal, o ganho de resistência ao momento fletor obtido foi de praticamente 100%. Entretanto, para obter este ganho de resistência foi preciso garantir a monoliticidade das peças após a intervenção utilizando tanto uma armadura de confinamento na camada de concreto adicionada, quanto uma armadura de costura (conectores de cisalhamento) para melhorar a transferência de esforço entre o concreto novo e o concreto antigo da peça.

As deformações do aço e do concreto obtidas pelos extensômetros confirmaram o escoamento das barras de aço tracionadas (ver Figura 11) e mostraram que o concreto da fibra mais comprimida não chegou a esmagar (ver Figura 12), confirmando os modos de ruptura observados visualmente nos ensaios.

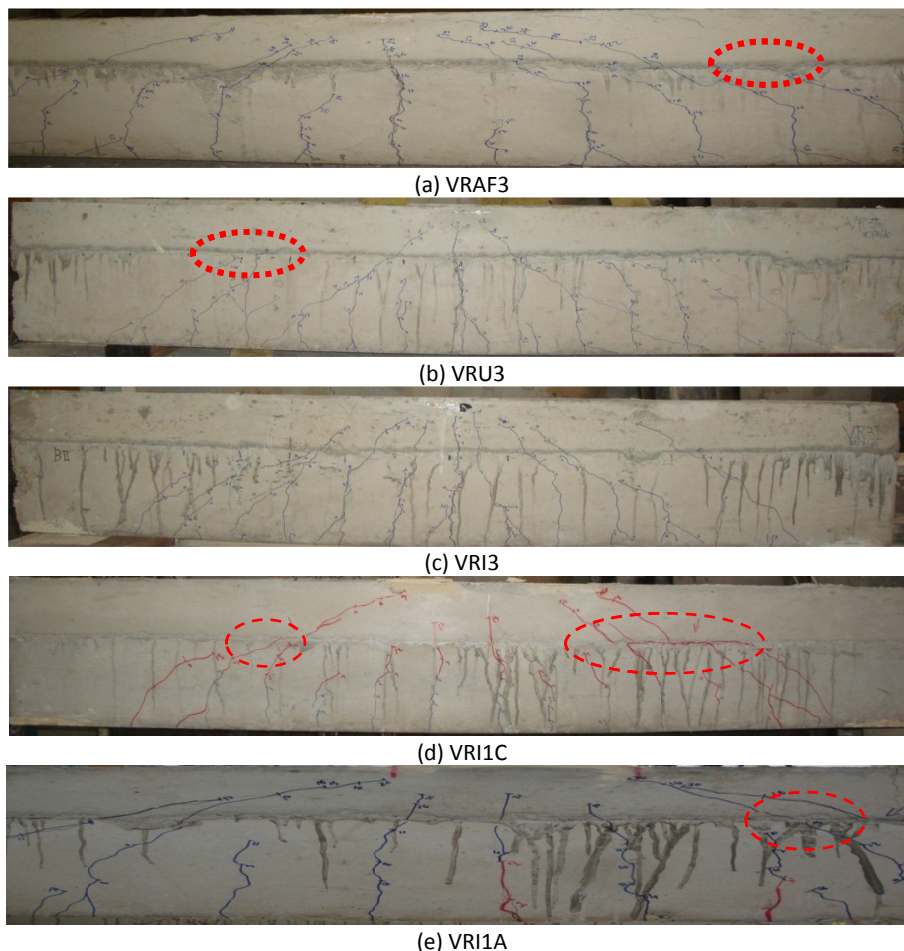


Figura 10: Esquema de fissuração de alguma das vigas ensaiadas.

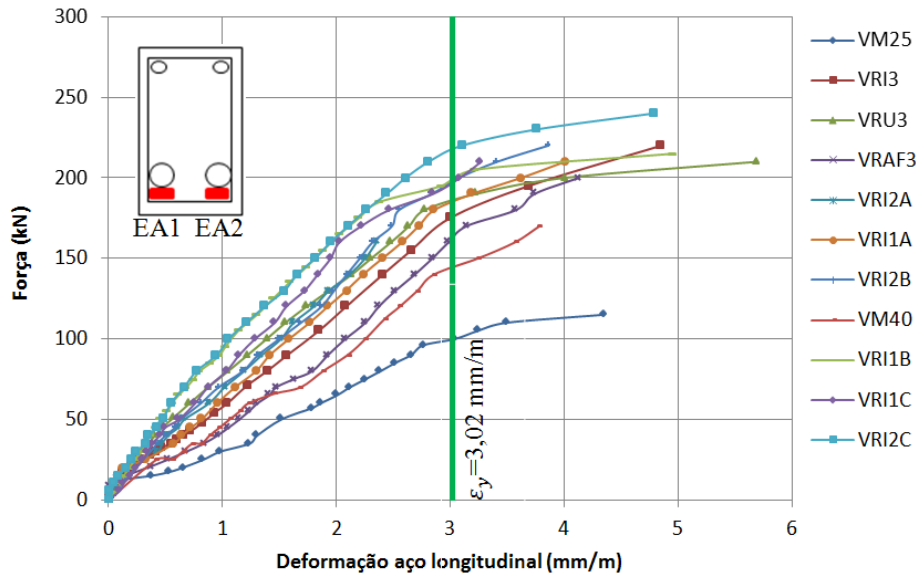


Figura 11: Diagrama força x deformação da armadura longitudinal de tração

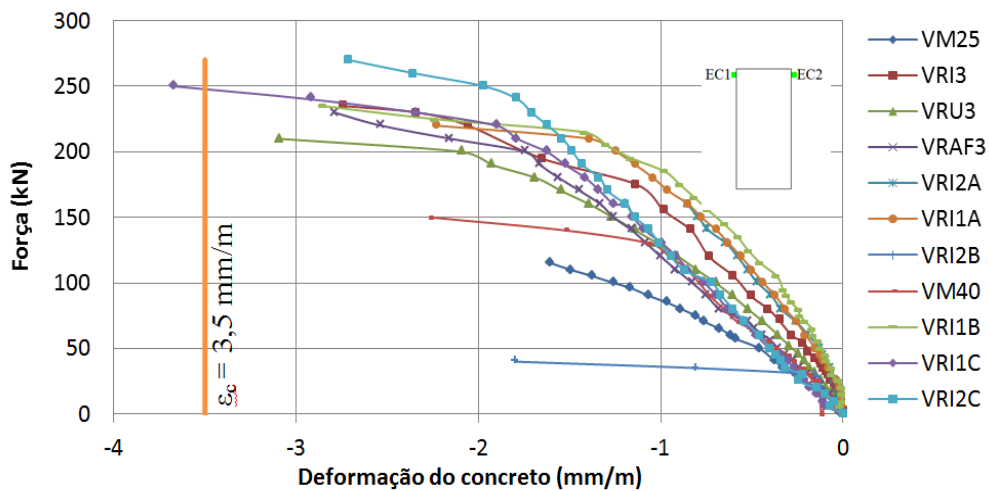


Figura 12: Diagrama força x deformação do concreto comprimido

5. CONCLUSÕES

- Todas as vigas reforçadas apresentaram aumento de capacidade portante em relação à viga antes do reforço, sendo que a maioria praticamente dobrou de resistência após a intervenção. Isso indica que a adição de uma certa espessura de concreto à face comprimida pode proporcionar aumentos significativos na resistência ao momento fletor de vigas de concreto armado.

- Praticamente em todas as vigas reforçadas que possuíam conectores e armadura de confinamento, mesmo naquelas que estavam pré-fissuradas antes da reabilitação, a capacidade portante foi próxima à de uma peça monolítica de mesma seção transversal. A única peça que não teve comportamento satisfatório foi justamente a que não possuía nem conector nem armadura de confinamento. Isso sugere a importância de se dimensionar corretamente estes dois tipos de

- armadura para garantir o monolitismo da peça e o bom desempenho da técnica de reforço aqui apresentada.

- A boa transferência de esforço de cisalhamento ao longo da junta depende de uma série de fatores, dentre eles, do tipo de conector de cisalhamento usado e da posição do mesmo dentro da seção transversal da peça. No caso deste estudo, dentre os três conectores estudados, o mais eficaz experimentalmente foi o conector do tipo "I" pois evitou o surgimento de fissuras ao longo da ligação entre concreto novo e antigo. Isso indica que ainda são necessários mais estudos para avaliar quais características são desejáveis para tal conector, a fim de garantir boa aderência entre concretos moldados em idades distintas.

- Os ensaios realizados indicaram ser interessante fazer uma análise dos locais em que estes conectores de cisalhamento devem ser colocados ao

longo das peças reforçadas, para que sua contribuição na resistência seja mais bem aproveitada. Para o caso em estudo, o ideal talvez fosse colocar um maior número de conectores próximos de $\frac{1}{4}$ do vão da viga, pois foi justamente nesta região que iniciava o deslocamento entre os concretos.

- As vigas pré-fissuradas não apresentaram perda de capacidade portante significativa em relação às vigas íntegras, indicando que se a abertura das fissuras pré-existentes estiver dentro dos limites aceitáveis de norma, o vedamento destas antes do reforço não é necessariamente obrigatório. Entretanto, caso as aberturas sejam elevadas, é essencial fechá-las para garantir a durabilidade da peça. Também é importante lembrar que a intensidade de fissuração interfere na rigidez da peça e, conseqüentemente, deve ser considerada no projeto do reforço para que a estrutura reabilitada não atinja nenhum Estado Limite de Serviço antes do previsto.

- O uso de concreto auto-adensável (CAA) como material de reforço mostrou ser bastante vantajoso, pois não se observou nenhum tipo de falha de concretagem nas vigas estudadas, apesar da dificuldade de acesso ao local. Além disso, seu uso facilitou os processos de moldagem e adensamento do concreto do reforço, pois eliminava o uso de vibradores de imersão. Constatou-se também que a aderência do CAA ao substrato foi muito boa, uma vez que, mesmo nas peças reforçadas sem uso de nenhum conector de cisalhamento, a junta não apresentou fissuração significativa até próximo do momento fletor de ruptura previsto para a estrutura.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq pelo financiamento concedido, e às empresas Carlos Campos Consultoria, Impercia e Realmix, pela doação de materiais e apoio técnico prestado na execução dos ensaios.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003). **NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro.

HELENE, P. R. L. (1992). **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. São Paulo, Pini.

RISSO, M. A. C. (2008) **Resistência ao cisalhamento de ligações de concreto de diferentes idades providas de chumbadores de expansão**. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE.

SILVA, P. M. (2011) **Avaliação da eficiência do uso de conectores de cisalhamento no reforço de vigas de concreto armado pela face comprimida**. Goiânia. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

SAHB, K. F. P. (2008) **Análise experimental de pilares de concreto armado submetidos à flexo-compressão e reforçados com concreto auto-adensável e chumbadores**. Goiânia. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

SANTOS, E. W. F. (2006). **Reforço de vigas de concreto armado à flexão por ensamamento parcial**. Rio de Janeiro. Dissertação (mestrado). COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro.