

Behaviour under cyclic loading of strengthened beams

Comportamento de vigas reforçadas sob ação de carregamento cíclico

A. P. R. VAZ^a
anapaularvaz@hotmail.com

I. A. E. SHEHATA^b
ibrahim@coc.ufrj.br

L. C. D. SHEHATA^c
lidashehata@vm.uff.br

R. B. GOMES^d
rbggomes@gmail.com

Abstract

This work presents a study on the behavior of reinforced concrete beams strengthened in bending by the addition of concrete and steel on their tension side and having expansion bolts as shear connectors at the junction between the beam and the jacket, subjected to a cyclic loading. The experimental program included tests on six full scale reinforced concrete beams, simply supported, initially with rectangular cross section 150 mm wide and 400 mm high, span of 4000 mm and total length of 4500 mm. All the beams, after receiving two cycles of static loading in order to create a pre-cracking condition, were strengthened in bending by partial jacketing and then subjected to cyclic loading until the completion of 2×10^6 cycles or the occurrence of fatigue failure. Following the cyclic loading, the beams that did not fail by fatigue were subjected to a static load up to failure. The main variables were the beam-jacket interface condition (smooth or rough), the flexural reinforcement ratio in the beam and in the jacket, and cyclic load amplitude. On the basis of the obtained test results and the results of previous studies of similar beams tested only under static loading, the behavior of the strengthened beams is discussed and a proposal for the beam-jacket connection design is presented, for the cases of predominantly static and cyclic loading.

Keywords: flexural strengthening, partial jacketing, fatigue, beams, cyclic loading.

Resumo

Este trabalho apresenta estudo sobre o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão, pela adição de concreto e barras de aço na região tracionada e chumbadores de expansão na ligação viga-reforço, submetidas a carregamento cíclico. O programa experimental incluiu ensaios em seis vigas de concreto armado em escala real, simplesmente apoiadas, inicialmente com seção transversal retangular com 150 mm de largura e 400 mm de altura, comprimento entre os apoios de 4000 mm e comprimento total de 4500 mm. Todas as vigas, depois de receber dois ciclos de carga estática, de modo a criar uma condição de pré-fissuração, foram reforçadas à flexão por encamisamento parcial e, em seguida, submetidas a uma carga cíclica até ao final de 2×10^6 ciclos ou da ocorrência de ruptura por fadiga. Após a aplicação das cargas cíclicas, as vigas que não romperam por fadiga foram submetidas a uma carga estática até a ruptura. As principais variáveis foram a condição de interface de ligação entre viga e reforço (lisa ou rugosa), a taxa de armadura de flexão na viga e no reforço, e amplitude do carregamento cíclico. Com base nos resultados obtidos nos ensaios e em estudos anteriores de vigas semelhantes testadas apenas com carga estática, é feita uma discussão do comportamento dessas vigas reforçadas e apresentada uma proposta para dimensionamento da ligação viga-reforço, para os casos de carregamento predominantemente estático e cíclico.

Palavras-chave: reforço à flexão, encamisamento parcial, fadiga, vigas, concreto armado.

^a Saneamento de Goiás S/A, Departamento de Estruturas, Goiânia, GO, Brasil;

^b COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

^c Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Civil, Niterói, RJ, Brasil;

^d Universidade Federal de Goiás, Departamento de Engenharia Civil, Goiânia, GO, Brasil.

1. Introdução

O reforço à flexão de vigas de concreto armado com adição de concreto e barras de aço apresenta as vantagens de custo relativamente baixo e a não necessidade de mão-de-obra altamente qualificada, podendo ser uma alternativa interessante quando há possibilidade de aumento das dimensões do elemento a ser reforçado.

O fator fundamental para garantir a eficácia do reforço com adição de aço e concreto é a eficiência da ligação entre o substrato e o reforço. A rugosidade e limpeza da superfície que vai receber o novo concreto são fatores essenciais para uma ligação eficiente. Segundo [2], a resistência ao cortante das ligações entre os dois concretos aumenta com o aumento da rugosidade.

É consenso que uma cura adequada do novo concreto visando minimizar sua retração inicial é essencial para que se tenha uma boa ligação entre concretos de diferentes idades [3] e há indício de que ligação com maior rugosidade tem sua resistência ao cisalhamento menos afetada por retração diferenciada dos dois concretos [4]. A resistência ao cisalhamento da ligação pode ser aumentada com o emprego de armadura cruzando a interface entre os dois concretos de duas formas: efeito de pino, que corresponde à resistência à flexão combinada com tração da armadura, e pela produção de tensão normal à interface, que é um efeito indireto mobilizado pela tendência de deslocamento relativo entre as duas partes. No caso de carregamento cíclico, o aumento da taxa dessa armadura não só diminui os danos na ligação decorrentes desse carregamento, minimizando a perda da rigidez da peça reforçada, como também aumenta o número de ciclos a que ela pode resistir. Um dos principais fatores que pode reduzir a resistência ao cisalhamento da ligação é o efeito de ações cíclicas, que provocam uma diminuição da rigidez da peça, associada a uma maior propagação de fissuras, levando a deformações nos elementos estruturais maiores que aquelas verificadas sob carregamento estático de curta duração e a redistribuição de tensões também diferente. Em vista disso, vigas que, sob carregamento estático, apresentam ruptura por flexão, quando submetidas a carregamento cíclico, podem apresentar ruptura por cortante ou por perda de aderência entre o concreto e a armadura [5]. Note-se que o número de ciclos que a estrutura suporta, bem como o grau de dano na ligação,

está diretamente relacionado à amplitude do carregamento cíclico a que a estrutura está submetida.

Embora armadura convencional, fixada ao elemento a ser reforçado por meio de adesivos, seja a normalmente utilizada na prática, neste trabalho, optou-se pelo uso dos chumbadores de expansão devido à sua maior praticidade de fixação, sem uso de adesivos, proporcionando maior rapidez na execução do reforço.

Revisão bibliográfica feita por Vaz [1] mostra que não há muitas pesquisas sobre o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão por adição de concreto e barras de aço e, dentre as revistas, podem ser citadas as descritas em [6], [7], [8], [9], [10], [11]), sendo que apenas uma dessas incluiu vigas com carregamento cíclico [8] e duas incluíram vigas com chumbadores de expansão na ligação viga-reforço ([10], [11]). Tendo em vista a vantagem de maior facilidade de execução do reforço com o emprego de chumbadores de expansão na ligação viga-reforço, desenvolveu-se estudo experimental visando contribuir para a compreensão do comportamento de vigas reforçadas segundo essa técnica quando submetidas a carregamento cíclico. Esse estudo, detalhado em [1], é aqui resumido.

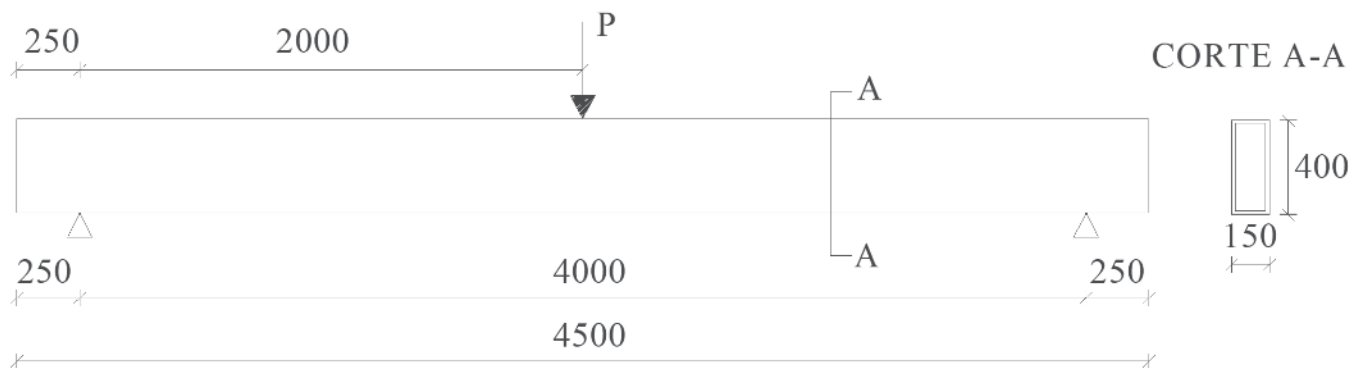
2. Programa experimental

2.1 Características das vigas e métodos de ensaio

As principais variáveis das 6 vigas foram:

- taxas de armadura longitudinal de tração das vigas antes do reforço (1,09% ou 0,483%) e dos reforços (0,401%, 0,541%, 1,00% ou 1,31%);
- condição da superfície das vigas que seria ligada ao reforço (tornada rugosa ou deixada lisa);
- faixa de variação da carga no ensaio com carregamento cíclico.

As seis vigas sem reforço tinham seção transversal retangular com dimensões de 150mm e 400mm e comprimento total de 4500mm. As vigas foram biapoiadas, com uma distância entre os centros dos apoios de 4000mm, sendo um apoio do 1º gênero e o outro do 2º gênero. O carregamento concentrado foi aplicado no meio do vão. No tocante às armaduras, as vigas foram dimensionadas para romperem à flexão, com escoamento das barras de aço tracionadas, havendo armadura transversal suficiente para garantir



Dimensões em mm

Figura 1

Características geométricas das vigas sem reforço

Tabela 1

Dimensões e armaduras das vigas sem reforço

Viga	b (mm)	h (mm)	d (mm)	d' (mm)	A_s (mm ²)	ρ (%)	A_s' (mm ²)	ρ' (%)	A_{sw}/S (mm ² /mm)	ρ_{sw} (%)
V1 e V2	150	400	369	27	603	1,09	100	0,182	0,670	0,447
V3 a V6	150	400	386	27	280	0,483	100	0,174	0,670	0,447

A_{sw} – área da seção transversal da armadura de cisalhamento no comprimento s ;

s – espaçamento da armadura de cisalhamento;

A_s – área da seção transversal da armadura longitudinal de tração;

A_s' – área da seção transversal da armadura longitudinal de compressão;

ρ – taxa geométrica de armadura longitudinal de tração;

ρ' – taxa geométrica de armadura longitudinal de compressão;

ρ_{sw} – taxa geométrica de armadura transversal.

tal modo de ruína. A figura 1 e a tabela 1 apresentam as dimensões e armaduras das vigas antes de receberem os reforços.

Antes da aplicação do reforço, foi realizada a pré-fissuração das vigas. Este procedimento consistiu na aplicação de carregamento estático no meio do vão até que as deformações específicas das armaduras de flexão, no meio do vão, ficassem em torno de 2,0‰. A seguir, fez-se o descarregamento das vigas, após o que elas foram preparadas para serem reforçadas.

Nas faces laterais das regiões que serviriam de interface viga-reforço, retirou-se o concreto superficial com uso de uma ponteira (profundidade média de 15mm), expondo as armaduras (longitudinal de tração e transversal) e agregados graúdos. Na face inferior, onde, na prática, o apicoamento é mais difícil de executar, não foi retirado todo o cobrimento, apicoando-se apenas de maneira a tornar a superfície rugosa. Esse procedimento foi feito para as vigas V1R a V4R, enquanto que as vigas V5R e V6R tiveram suas superfícies de ligação deixadas lisas. Embora métodos mais sofisticados possam ser usados em labora-

tório ([12] e [13]), o índice de rugosidade R foi medido pelo método da mancha de areia. Após o apicoamento das faces inferiores das vigas, esse método foi usado em três diferentes regiões ao longo dos comprimentos das mesmas. A tabela 2 apresenta os valores encontrados para R e a média deles R_m . Tendo-se $R \geq 1,5$ mm, segundo [13], a superfície pode ser classificada como rugosa.

O reforço era constituído de um talão de concreto armado com seção transversal trapezoidal, de mesmas características geométricas da utilizada nas vigas de trabalhos anteriores ([10] e [11]), a menos da largura da parte inferior do talão das V5R e V6R que era 180mm, em vez de 150mm. Esta diferença nas V5R e V6R decorreu de, nas vigas antes do reforço, não se ter retirado camada superficial do concreto na região onde se faria ligação com o reforço. Na região lateral da área de contato viga-reforço foram utilizados chumbadores de expansão com diâmetro de rosca de 9,5mm, iguais aos adotados por Santos [10] e Simões [11] e também com espaçamento de 150mm (figura 2), que serviram tanto para

**Figura 2**

Chumbadores de expansão

Tabela 2Índices de rugosidade R e seus valores médios R_m obtidos pelo método da mancha de areia

Vigas	R (mm)	R_m (mm)	Vigas	R (mm)	R_m (mm)
V1	1,50	1,54	V3	1,52	1,54
	1,52			1,55	
	1,59			1,56	
V2	1,57	1,55	V4	1,47	1,52
	1,59			1,58	
	1,49			1,52	

posicionar a armadura do reforço quanto para melhorar o desempenho da ligação viga-reforço. A taxa de conectores na ligação viga-reforço (ρ_s) era 0,329% para as vigas com superfície de ligação rugosa e 0,298% para as com superfície de ligação lisa (área da superfície de ligação viga-reforço maior). Considerando a tensão de escoamento dos chumbadores de 540MPa, tem-se $\rho_w f_y$ de 1,78 MPa ou 1,61 MPa nas ligações rugosas e lisas, respectivamente.

A figura 3 apresenta o detalhamento das armaduras dos reforços e a tabela 3 as armaduras das vigas reforçadas junto com as das vigas de trabalhos anteriores ([10] e [11]).

Depois de pelo menos 30 dias da concretagem dos reforços, iniciou-se o carregamento cíclico, com frequência de 2Hz ou 3Hz e cargas variando entre cerca de 25% e 50%, 30% e 60% ou 35% a 70% da carga de ruptura por flexão teórica. Este carregamento foi realizado até que a viga rompesse por fadiga ou fossem completados 2×10^6 de ciclos. Neste último caso, após o carregamento cíclico, as vigas foram levadas à ruptura sob carregamento estático. Para a realização dos ensaios, as vigas foram posicionadas em pórtico metálico fixado na laje de reação do laboratório, sobre dois aparelhos de apoio, um do primeiro gênero e outro do segundo gênero. O atuador hidráulico utilizado para a aplicação da carga,

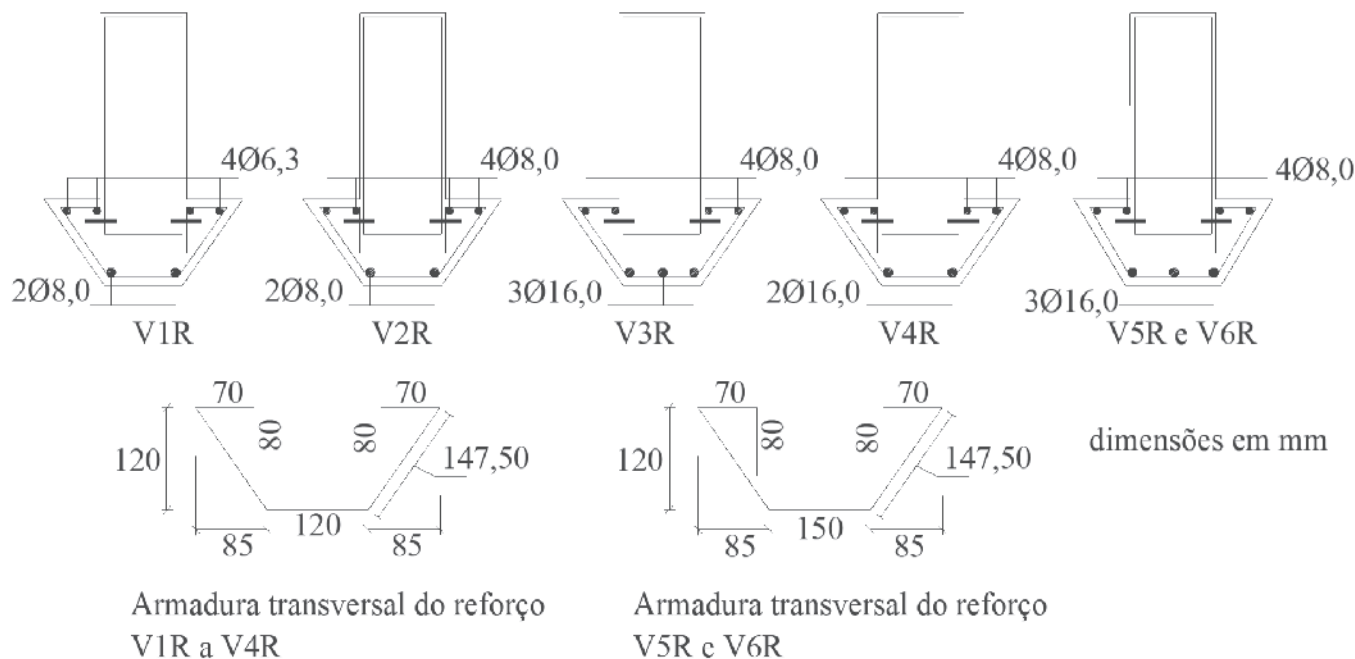


Figura 3
Armaduras dos reforços das vigas V1R a V6R

Tabela 3
Dimensões e armaduras das vigas reforçadas

Trabalho atual							
Armadura longitudinal de tração (ϕ em mm)			d_R	A_s (mm ²)	A_{sR} (mm ²)	ρ_R (%)	ρ_T (%)
	Viga	Reforço					
V1R	3 ϕ 16,0	4 ϕ 6,3 e 2 ϕ 8,0	374	603	225	0,401	1,48
V2R	3 ϕ 16,0	6 ϕ 8,0	372	603	302	0,541	1,62
V4R	2 ϕ 10,0 e 1 ϕ 12,5	4 ϕ 8,0 e 2 ϕ 16,0	402	280	603	1,00	1,47
V3R, V5R, V6R	2 ϕ 10,0 e 1 ϕ 12,5	4 ϕ 8,0 e 3 ϕ 16,0	409	280	804	1,31	1,77

Trabalhos anteriores							
Armadura longitudinal de tração (ϕ em mm)			d_R	A_s (mm ²)	A_{sR} (mm ²)	ρ_R (%)	ρ_T (%)
	Viga	Reforço					
VR1 [10]	3 ϕ 16,0	6 ϕ 8,0	372	603	302	0,541	1,62
VR2 [11]	2 ϕ 10,0 e 1 ϕ 12,5	4 ϕ 8,0 e 2 ϕ 16,0	402	280	603	1,00	1,47
VR3 [11]	2 ϕ 10,0 e 1 ϕ 12,5	4 ϕ 8,0 e 3 ϕ 16,0	409	280	804	1,31	1,77

b = 150mm; h = 470mm; d' = 27mm; $A_s' = 100\text{mm}^2$
estribos (reforço): ϕ 5,0 c/150 mm

com capacidade de 500kN, foi colocado no meio do vão e ligado a um sistema de controle de carga e deslocamento. Nos ensaios com carregamento estático, as deformações específicas do concreto foram medidas em quatro níveis, numa seção a 130 mm do meio do vão, com um extensômetro mecânico do tipo Tensotast, com base de medição de 100 mm e menor divisão de 0,001 mm.

Para a realização das medições com esse extensômetro, foram coladas chapas de cobre em uma das faces laterais da viga (figura 4). Para medição das deformações específicas das armaduras de flexão foram utilizados extensômetros elétricos de resistência, colados na seção do meio do vão e em seção a 960 mm do meio do vão nas vigas e nos reforços (figura 5). A medição dos deslocamentos verticais

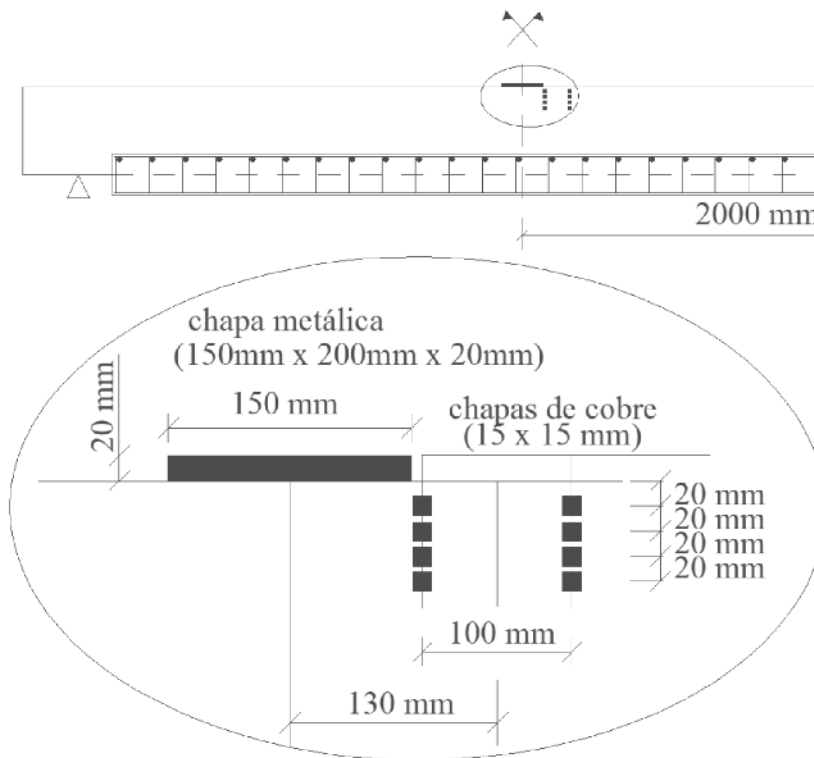


Figura 4
Posicionamento das bases de medição para o extensômetro mecânico

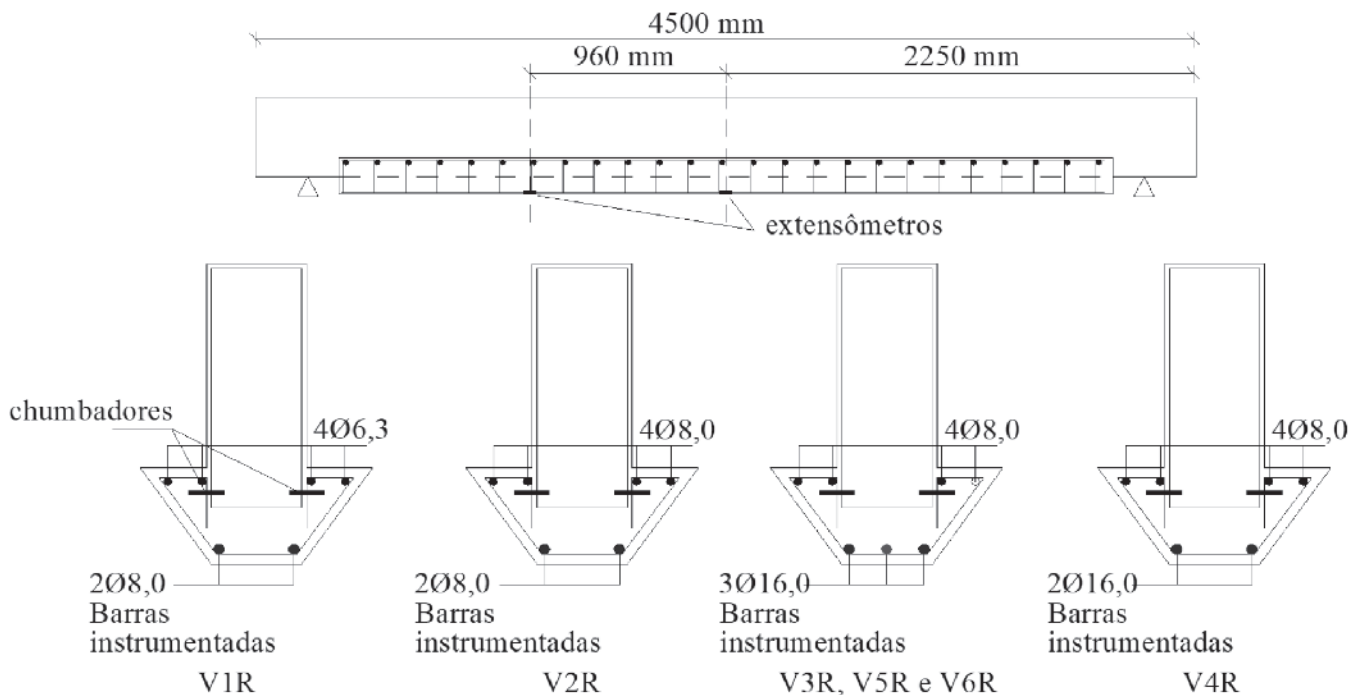


Figura 5
Seções transversais das vigas reforçadas e localização dos extensômetros nas armaduras longitudinais do reforço

das vigas foi feita com utilização de dois transdutores de deslocamentos à base de extensômetros elétricos de resistência, que foram posicionados a 150 mm do meio do vão, ficando um de cada lado da região de aplicação de carga. Para medição dos deslocamentos horizontais relativos entre o talão de reforço e a viga, foram utilizados transdutores de deslocamentos, à base de extensômetros elétricos de resistência, instalados na seção a 960 mm do meio do vão e no final do reforço com utilização de dispositivos de alumínio (figura 6).

2.2 Materiais

Para a confecção da armadura foram utilizadas barras de aço

CA-50 e CA-60. A armadura transversal das vigas foi feita com barras de aço de diâmetro igual a 8,0 mm e a dos reforços com barras de diâmetro igual a 5,0 mm. Barras de aço com diâmetro de 8,0 mm também foram utilizadas para a armadura longitudinal de compressão das vigas e para armadura longitudinal dos reforços, juntamente com barras de 6,3 mm de diâmetro. Barras de aço com diâmetro de 16,0 mm foram adotadas para a armadura longitudinal de tração das vigas V1 e V2 e do reforço de algumas. Nas armaduras longitudinais de tração das vigas V3 a V6 foram utilizadas barras de aço com diâmetro de 10,0 mm e de 12,5 mm. Para a obtenção das propriedades mecânicas foram ensaiadas amostras de cada tipo de barra. Os valores das tensões de esco-

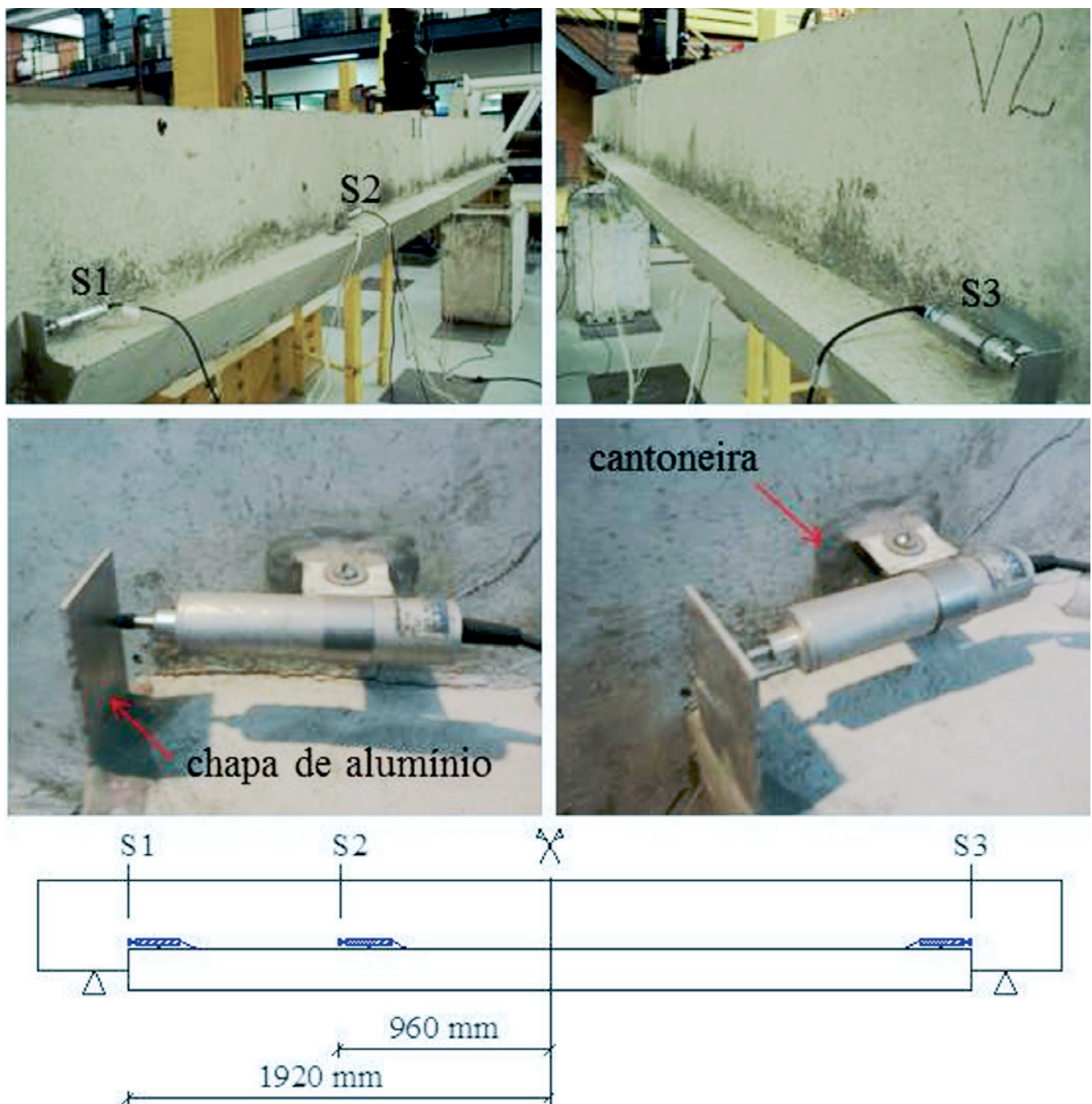


Figura 6

Posicionamento dos transdutores de deslocamento para medição de deslizamento entre viga e talão de reforço

amento e de ruptura médios obtidos foram, respectivamente, 655 MPa e 739 MPa (5,0 mm), 596 MPa e 767 MPa (6,3 mm), 607 MPa e 748 MPa (8,0 mm), 522 MPa e 641 MPa (10,0 mm), 555 MPa e 688 MPa (12,5mm), 562 MPa e 686 MPa (16,0 mm).

O concreto foi dosado para alcançar resistência à compressão de 30 MPa aos 28 dias. Em cada concretagem foram moldados corpos-de-prova cilíndricos para a obtenção da resistência à compressão, da resistência à tração por compressão diametral e do módulo de deformação longitudinal. Os valores médios obtidos

nos corpos-de-prova referentes ao concreto utilizado nas vigas e nos reforços foram, respectivamente: 34,0 e 33,0 MPa para resistência à compressão, 3,60 e 3,57 MPa para resistência à tração e 26,0 GPa para módulo de deformação longitudinal.

3. Resultados e discussões

A tabela 4 resume resultados experimentais das vigas ensaiadas. Os valores da carga de ruptura à flexão teórica das vigas

Tabela 4

Resumo dos resultados experimentais das vigas ensaiadas

Carregamento estático inicial								
Viga	ρ_R (%)	ρ_T (%)	P_{cr} (kN)	$P_{máx}$ (kN)	δ_i (mm)	$\epsilon_{s,i}$ (‰)	$\epsilon_{s,res}$ (‰)	$\delta_{res,i}$ (mm)
V1 V1R	0,401	1,48	25	60	8,73	1,78	0,383	2,31
V2 V2R	0,41	1,62	25	60	8,88	1,72	0,368	2,00
V3 V3R	1,31	1,77	20	35,4	8,58	1,99	0,527	2,43
V4 V4R	1,00	1,47	15	35,3	8,96	2,09	0,602	2,95
V5 V5R	1,31	1,77	20	35,6	7,66	2,08	0,497	2,09
V6 V6R	1,31	1,77	20	35,5	7,68	1,97	0,481	2,15

Carregamento cíclico					
Viga	$P_{mín}/P_{u,teo}$ (%)	$P_{máx}/P_{u,teo}$ (%)	$\epsilon_{s,máx}$ (‰)	$\epsilon_{s,res}$ (‰)	δ_{res} (mm)
V1 V1R	33	64	2,36	-	-
V2 V2R	19	40	1,28	0,352	1,74
V3 V3R	22	42	1,57	0,345	2,52
V4 V4R	24	58	1,64	-	4,54
V5 V5R	21	42	1,37	0,301	2,21
V6 V6R	27	54	1,49	-	-

Carregamento estático até a ruptura								
Viga	$P_{u,exp}$ (kN)	$\delta_{u,exp}$ (mm)	$\epsilon_{su,exp}$ (‰)		Deslizamento máx. viga-reforço (mm)			Modo de ruptura
			Viga	Reforço	S1	S2	S3	
V1 V1R	-	-	-	-	-	-	-	Fadiga, aos 1.865.825 ciclos
V2 V2R	193	33,8	46,7	50,52	-	0,081	0,058	Flexão
V3 V3R	180	18,1	2,24	2,59	0,754	0,051	9,85	Cisalhamento na ligação viga-reforço
V4 V4R	186	25,3	-	-	0,641	0,04	0,444	Flexão
V5 V5R	173	28,6	2,02	2,20	1,34	0,843	6,57	Cisalhamento na ligação viga-reforço
V6 V6R	-	-	-	-	-	-	-	Fadiga, aos 875.280 ciclos

ρ_R - taxa geométrica da armadura longitudinal de tração do reforço; ρ_T - taxa geométrica total da armadura longitudinal de tração da viga reforçada; δ_i - deslocamento vertical relativo à carga máxima $P_{máx}$ no ensaio estático inicial; $\delta_{res,i}$ - flecha residual ao final do ensaio estático inicial; δ_{res} - flecha residual ao final do carregamento cíclico; $\delta_{u,exp}$ - deslocamento vertical relativo à carga de ruptura das vigas que não romperam por fadiga; $\epsilon_{s,i}$ - deformação específica na armadura longitudinal da viga correspondente à carga máxima no ensaio estático inicial; $\epsilon_{s,res}$ - deformação específica residual na armadura longitudinal da viga ao final do ensaio estático inicial; $\epsilon_{s,máx}$ - deformação específica máxima da armadura longitudinal da viga durante carregamento cíclico; $\epsilon_{u,exp}$ - deformação específica máxima na armadura longitudinal da viga ou do reforço para a carga de ruptura das vigas que não romperam por fadiga; P_{cr} - carga correspondente ao aparecimento das primeiras fissuras visíveis durante ensaio estático inicial; $P_{u,exp}$ - carga de ruptura experimental das vigas que não romperam por fadiga.

Tabela 5

Características e resistências das vigas reforçadas deste estudo [1] e dos estudos anteriores [10] e [11]

Vigas	ρ_R (%)	ρ_T (%)	ρ_{Rfy} (MPa)	ρ_{Tfy} (MPa)	Carregamento estático ligação viga-reforço rugosa			Carregamento cíclico ligação viga-reforço rugosa			Carregamento cíclico ligação viga-reforço lisa		
					$P_{u,exp}$ (kN)	$P_{u,teo}$ (kN)	$P_{u,exp}/P_{u,teo}$	$P_{u,exp}$ (kN)	$P_{u,teo}$ (kN)	$P_{u,exp}/P_{u,teo}$	$P_{u,exp}$ (kN)	$P_{u,teo}$ (kN)	$P_{u,exp}/P_{u,teo}$
V1R	0,401	1,48	2,29	8,46	-	-	-	-	-	-	fadiga na armadura de flexão		
VR1 [10]	0,541	1,62	2,97	8,92	186	156	1,19	-	-	-	-	-	-
V2R	0,541	1,62	3,12	9,33	-	-	-	193	168	1,15	-	-	-
VR2 [11]	1,00	1,47	6,11	8,98	205	192	1,07	-	-	-	-	-	-
V4R	1,00	1,47	5,69	8,29	-	-	-	186	177	1,05	-	-	-
VR3 [11]	1,31	1,77	8,29	10,8	229	230	1,00	-	-	-	-	-	-
V3R	1,31	1,77	7,39	9,98	-	-	-	180	212	0,85	-	-	-
V5R	1,31	1,77	7,39	9,98	-	-	-	-	-	-	173	216	0,80
V6R	1,31	1,77	7,39	9,98	-	-	-	-	-	-	fadiga nos chumbadores		

Ruptura por flexão
 Ruptura por cisalhamento na ligação viga-reforço
 Ruptura por fadiga

reforçadas, $P_{u,teo}$, utilizados nessa tabela foram os determinados com f_c e f_y obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais ($\gamma_c = \gamma_s = 1$) e seus valores estão na tabela 5.

3.1 Fissuração e resistência

Nas vigas reforçadas, algumas fissuras no talão de reforço apareceram durante os dois ciclos com carregamento estático feitos antes do cíclico. Quando da aplicação do carregamento cíclico, outras fissuras de flexão apareceram no talão de reforço até cerca dos primeiros 100 000 ciclos para as vigas V1R, V2R, V3R e V5R, 70 000 ciclos para a V4R e 5000 ciclos para a V6R. Além dessas fissuras, nas V4R e V6R, onde houve variação de carga entre cerca de 25% a 50% de $P_{u,teo}$ e maiores valores de ρ_{Rfy} (5,69MPa e 7,39MPa), apareceram fissuras de cisalhamento

nas regiões perto dos apoios e fissuras horizontais na ligação viga-reforço. A V6R, que rompeu por fadiga dos chumbadores na ligação viga-reforço, foi a que apresentou maior número de fissuras de cisalhamento durante o carregamento cíclico. Na V1R, com menor taxa de armadura longitudinal no reforço ($\rho_{wy} = 2,29\text{MPa}$) e variação de carga entre 32% e 64% de $P_{u,teo}$, não apareceram essas fissuras de cisalhamento e horizontais. Ela teve fadiga na armadura longitudinal do reforço e só apresentou fissuras de flexão e com maior abertura.

No ensaio estático final, as vigas V2R e V4R, que romperam por flexão, apresentaram padrões de fissuração semelhantes. As vigas V3R e V5R, que romperam por cisalhamento na ligação viga-reforço, tiveram menor número de fissuras inclinadas que as demais vigas.

Os valores teóricos e experimentais de resistência à flexão das

Tabela 6

Tensões normais máximas e variações de tensões normais nas armaduras longitudinais de tração da viga e do reforço no início do carregamento cíclico experimentais, obtidas a partir das deformações específicas medidas, e de cálculo no estágio II

Viga	ρ_{Rfy} (MPa)	ρ_{Tfy} (MPa)	$P_{u,exp}^{min}/P_{u,teo}$ (%)	$P_{u,exp}^{max}/P_{u,teo}$ (%)	$\sigma_{s,max}$ (MPa)	$\sigma_{s,max,calc}$ (MPa)	$\Delta_{\sigma s}$ (MPa)	$\Delta_{\sigma s,calc}$ (MPa)	$\sigma_{sR,max}$ (MPa)	$\sigma_{sR,max,calc}$ (MPa)	$\Delta_{\sigma sR}$ (MPa)	$\Delta_{\sigma sR,calc}$ (MPa)
V1R	2,29	8,46	32	64	299	366	155	183	477	494	231	247
V2R	3,12	9,33	20	40	187	234	100	117	225	317	102	159
V4R	5,69	8,29	25	56	265	304	152	167	330	380	174	209
V3R	7,39	9,98	21	42	172	213	87	107	253	269	116	135
V5R	7,39	9,98	21	42	173	213	98	107	225	269	111	135
V6R	7,39	9,98	27	54	227	275	130	137	293	347	157	174

vigas reforçadas ensaiadas neste trabalho e em trabalhos anteriores ([10] e [11]), calculadas com valores experimentais de resistência à compressão do concreto e tensão de escoamento das barras da armadura e diagrama parábola-retângulo de tensões normais de compressão para o concreto, são apresentados na tabela 5. Os valores máximos de tensões normais e das variações dessas tensões nas armaduras longitudinais de tração no início do carregamento cíclico experimentais, obtidos a partir das deformações específicas medidas, e calculados são apresentados na tabela 6.

Na tabela 5, observa-se que apenas as vigas deste estudo que romperam por cisalhamento na ligação viga-reforço tiveram relação $P_{u,exp} / P_{u,teo}$ menor que um (0,85 e 0,80) e que a viga com ligação lisa teve a menor delas. Para as vigas de trabalhos anteriores [11] semelhantes às deste estudo, mas submetidas só a carregamento estático, que tiveram ruptura por cisalhamento na ligação viga-reforço, essa relação foi 1,07 e 1,00. Comparando-se a V3R com a VR3 [11] ($\rho_T = 1,77\%$ e $\rho_R = 1,31\%$, superfície de ligação rugosa e ruptura por cisalhamento nessa ligação), verifica-se que o carregamento cíclico provocou redução de 21% na capacidade resistente da V3R deste estudo em relação à VR3 [11]. Entretanto, não se pode atribuir essa redução apenas ao carregamento cíclico, já que a V3R tinha ρ_{Rf} 11% menor. Levando isso em consideração, a redução passa a ser de 12%.

Nas vigas com $\rho_T = 1,62\%$ e $\rho_R = 0,541\%$ (V2R deste estudo e VR1 de [10]), que romperam por flexão, o carregamento cíclico não influenciou a capacidade resistente, uma vez que a diferença entre as cargas de ruptura experimentais das vigas só com carregamento estático e com carregamento estático depois do cíclico corresponde praticamente à diferença entre os valores de ρ_{Tf} dessas vigas.

A V1R ($\rho_T = 1,48\%$ e $\rho_R = 0,401\%$) foi a que teve maiores relações de $P_{min} / P_{u,teo}$ e $P_{max} / P_{u,teo}$ das vigas ensaiadas (32% e 64%) e, conseqüentemente, maiores variações de tensão normal na armadura de reforço (provocando fadiga nessa armadura) e de deslocamento vertical. Nessa viga, teve-se $\sigma_{sR,max} = 477 \text{ MPa} \approx 0,79 f_y$ e $\Delta\sigma_{sR} = 231 \text{ MPa}$. Na figura 7, nota-se que, para o número de ciclos verificados na V1R (1 865 825), teve-se variação de tensão normal na armadura maior que o limite dado pela relação entre $\Delta\sigma_s$ e o número de ciclos N da ABNT NBR 6118:2014 [14]. Devido à baixa taxa de armadura utilizada no reforço, a variação de tensão cisalhante na ligação viga-reforço foi baixa e não houve deslizamento nessa ligação.

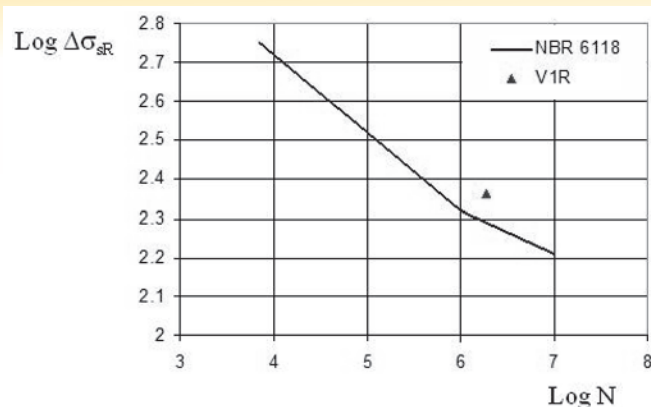


Figura 7

Comparação da relação entre N e $\Delta\sigma_{sR}$ segundo ABNT NBR 6118:2014 [14] e a da viga que rompeu por fadiga da armadura longitudinal

3.2 Deformações específicas nas armaduras

Quanto do carregamento estático antes do cíclico, em geral, as relações entre as deformações específicas das armaduras do reforço (camada inferior) e da viga variaram entre 1,2 e 1,4, o que seria de esperar segundo análise do estágio II, mas na viga V1R essas relações variaram entre 1,5 e 1,7.

No carregamento cíclico, as deformações específicas máximas e mínimas das armaduras longitudinais de tração medidas, em função do número de ciclos, para as vigas que não romperam por fadiga, excetuando-se a V2R, não indicaram tendência de estabilização. A V6R, que rompeu por fadiga nos chumbadores, teve comportamento diferenciado, apresentando diminuição brusca da deformação específica da armadura longitudinal do reforço e, ao mesmo tempo, aumento brusco da deformação da armadura longitudinal da viga, para N igual a cerca de 600 000 ciclos (figura 8). Na tabela 7, encontram-se listados os valores das deformações específicas máximas da armadura longitudinal de tração do reforço e da viga medidas durante o carregamento cíclico, bem como as variações dessas deformações e as deformações residuais ao final do carregamento. Esses valores são função de P_{min} / P_{teo} e P_{max} / P_{teo} e de ρ_T .

As deformações específicas das barras de aço do reforço medidas no ensaio estático final na seção do meio do vão da V2R são

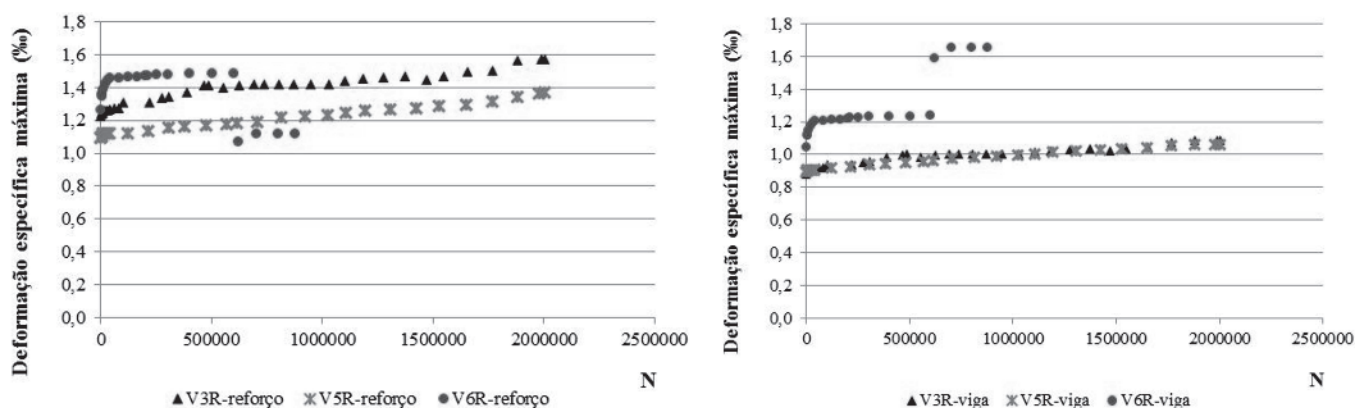


Figura 8

Deformação específica máxima da armadura longitudinal de tração do reforço e da viga, na seção do meio do vão, em função do número de ciclos, das vigas com superfície de ligação reforço-viga rugosa (V3R) e lisa (V5R e V6R) de mesmas armaduras

Tabela 7

Deformações específicas máximas, variação dessas deformações e deformações residuais na armadura longitudinal do reforço e da viga referentes ao carregamento cíclico

Viga	ρ_R (%)	ρ_T (%)	$\frac{P_{\min}}{P_{u,teo}}$ (%)	$\frac{P_{\max}}{P_{u,teo}}$ (%)	$\epsilon_{sR,\max}$ (‰)	$\Delta_{\epsilon sR}$ (‰)	$\epsilon_{sR,res}$ (‰)	$\epsilon_{s,\max}$ (‰)	$\Delta_{\epsilon s}$ (‰)	$\epsilon_{s,res}$ (‰)
V1R	0,401	1,48	32	64	2,36+	1,15+	-	1,49+	0,777+	-
V2R	0,541	1,62	20	40	1,28	0,532	0,352	1,04	0,539	0,244
V4R	1,00	1,47	25	56	1,64+	0,863+	-	1,41+	0,842+	-
V3R	1,31	1,77	21	42	1,57	0,576	0,345	1,09	0,501	0,235
V5R	1,31	1,77	21	42	1,37	0,769	0,301	1,08	0,579	0,229
V6R	1,31	1,77	27	54	1,49*	0,836*	-	1,24*	0,781*	-

+ < 100.000 ciclos | * 600 000 ciclos

comparadas com as da viga VR1[10] na figura 9, e as das vigas V3R e V5R com as da V3R[11] na figura 10. Nas curvas das vigas VR1[10] e V2R, verifica-se, para valores de carga até 50kN, que as curvas praticamente coincidem e, para valores acima dessa carga, são encontradas menores deformações específicas na viga V2R, que tinha $\rho_T f_y$ cerca de 5% maior.

Na figura 10, observa-se que, para uma mesma carga, a viga V5R, com superfície de ligação viga-reforço lisa, apresentou menores deformações específicas que a V3R, com superfície rugosa, e que a curva de deformações específicas da V3R coincide com a da VR3 [11], e, apesar das duas vigas terem tido o mesmo tipo de ruptura, o deslizamento excessivo do talão de reforço da V3R impediu que a armadura tracionada ultrapassasse o valor de ϵ_y^* (deformação específica correspondente a f_y ao se considerar diagrama tensão normal-deformação específica do aço bilinear com patamar) e a ruptura aconteceu com carga inferior à da VR3 [11], que teve deformações específicas na armadura longitudinal bem maiores que a de escoamento (cerca de 8,5‰).

3.3 Força longitudinal, tensão cisalhante e deslizamento na ligação viga-reforço

A força longitudinal T_R , e, a partir dela, a tensão cisalhante nominal na ligação viga-reforço τ , foi calculada a partir das deformações específicas medidas nas armaduras longitudinais do reforço na seção do meio do vão. Na tabela 8 constam os valores de $T_{R,max}$ e de ΔT_R no início do carregamento cíclico, obtidos a partir das deformações específicas medidas e calculadas. A soma das forças na armadura longitudinal de tração do reforço na seção do meio do vão de cada viga obtidas a partir das deformações específicas medidas, para diferentes níveis de carga estática, está na tabela 9, e a figura 11 apresenta as forças longitudinais na ligação viga-reforço em função da carga aplicada nas vigas V3R, V5R e V6R, junto com as da VR3 [11] que tinha a mesma taxa de armadura longitudinal de tração. Essa figura evidencia a variação que as deformações medidas podem apresentar, em função da fissuração, já que, por questão de equilíbrio na seção do meio do vão,

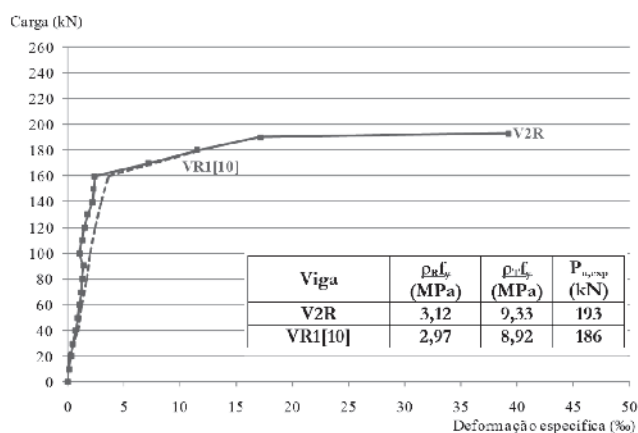


Figura 9
Deformação específica das barras de aço longitudinais dos reforços das VR1 [10] e V2R, em função da carga

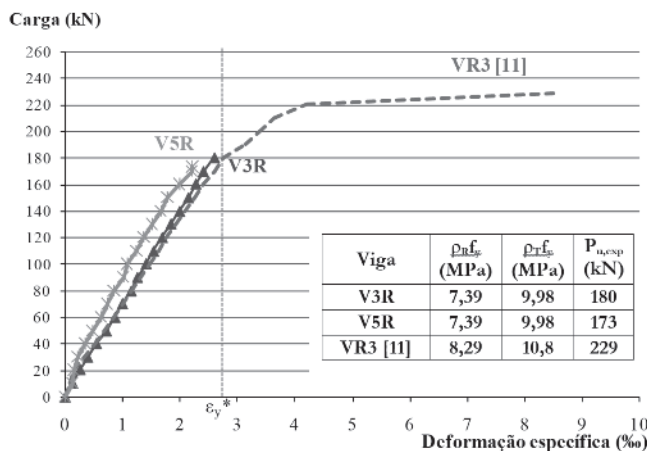


Figura 10
Deformação específica das barras de aço longitudinais dos reforços das VR3 [11], V3R e V5R, em função da carga

Tabela 8

Valores de $T_{R,m\acute{a}x}$ e ΔT_R no in\icicio do carregamento c\iciclico, obtidos a partir das deforma\iccoes espec\icficas medidas e calculados

Viga	ρ_R (%)	ρ_T (%)	$P_{m\acute{i}n}$ (kN)	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	$T_{R,m\acute{a}x}$ (kN)	$T_{R,m\acute{a}x,calc}$ (kN)	$T_{R,m\acute{a}x,calc}/T_{R,m\acute{a}x}$	ΔT_R (kN)	$\Delta T_{R,calc}$ (kN)	$\Delta T_{R,calc}/\Delta T_R$
V1R	2,29	8,46	50	100	79,2	89,8	1,13	40,2	44,8	1,11
V2R	3,12	9,33	34	68	58,0	73,1	1,26	30,4	36,5	1,20
V4R	5,69	8,29	45	100	186	201	1,08	102	111	1,09
V3R	7,39	9,98	45	90	179	196	1,10	84,6	98,2	1,16
V5R	7,39	9,98	45	90	167	196	1,18	87,2	98,2	1,13
V6R	7,39	9,98	58	116	218	253	1,16	120	127	1,06

para uma determinada carga, vigas com mesma taxa de armadura longitudinal devem ter mesmo valor de T_R .

A tabela 10 lista os valores da for\icca longitudinal na liga\iccao viga-refor\icco (carregamento est\aticico) e da varia\iccao dessa for\icca (carregamento c\iciclico) nas vigas que romperam por cisalhamento na liga\iccao viga-refor\icco, e tamb\em na V4R.

Tendo por base os valores de $T_{R,max}$ e de ΔT_R da tabela 10 para V5R e V6R, respectivamente, e considerando que a for\icca longitudinal na liga\iccao \e resistida apenas pelos chumbadores (em n\umero de 24, excluindo os dois da se\iccao do meio do v\iao), chegou-se \a express\oes (1.0a) e (1.0b) de varia\iccao de for\icca cortante nos chumbadores, $\Delta T_{R,ch}$, em fun\iccao do n\umero de ciclos. A de $\log \Delta T_{R,ch}$ em fun\iccao de $\log N$ (1.0a) \e do tipo mais comumente proposta para conectores de cisalhamento [15] e a de $\Delta T_{R,ch}$ em fun\iccao de $\log N$ (1.0b) equivale \a primeira. Admitiu-se a mesma express\ao para liga\iccoes com superf\icies rugosa e lisa, tendo em vista a pouca diferen\icca entre as resist\encias das V3R e V5R e $T_{R,ch}$ \e dada em newtons.

$$\log \Delta T_{R,ch} = -0,0811 \log N + 4,204$$

(1a)

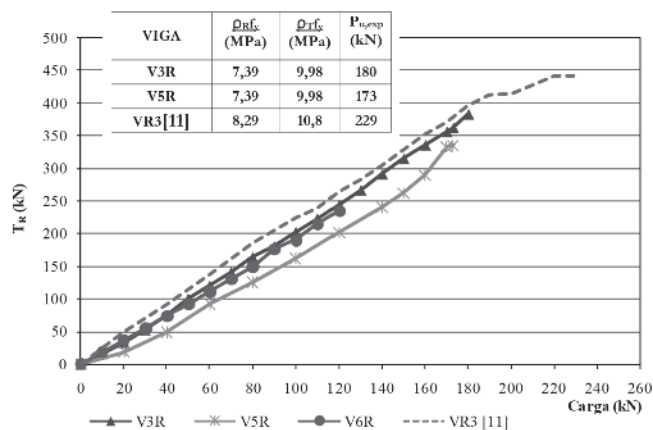


Figura 11 For\icca longitudinal na liga\iccao viga-refor\icco em fun\iccao do carregamento das vigas VR3 [11], V3R, V5R e V6R, com mesmas taxas de armadura

Tabela 9

For\icca longitudinal e tens\ao de cisalhamento nominal na liga\iccao viga-refor\icco durante carregamento est\aticico final

Carga (kN)	T_R (kN)						τ (MPa)					
	V1R+	V2R	V4R+	V3R	V5R	V6R	V1R+	V2R	V4R+	V3R	V5R	V6R+
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	8,83	17,9	30,7	33,2	19,1	36,3	0,017	0,0330	0,0571	0,0618	0,0321	0,0611
40	26,3	36,3	70,6	75,2	48,5	73,9	0,049	0,0680	0,131	0,140	0,0814	0,124
60	43,6	56,0	110	120	92,2	110	0,081	0,104	0,206	0,224	0,155	0,186
80	60,0	72,2	151	163	125	150	0,112	0,134	0,282	0,305	0,210	0,252
100	71,5	82,4	185	202	162	190	0,133	0,153	0,346	0,376	0,272	0,320
120	-	104	-	244	202	234	-	0,194	-	0,454	0,339	0,395
140	-	133	-	291	241	-	-	0,247	-	0,541	0,405	-
150	-	142	-	315	262	-	-	0,267	-	0,586	0,439	-
160	-	144	-	335	290	-	-	0,299	-	0,624	0,487	-
170	-	161	-	356	333	-	-	0,299	-	0,662	0,561	-
173	-	161	-	361	335	-	-	0,299	-	0,673	0,563	-
180	-	161	-	383	-	-	-	0,299	-	0,712	-	-
193	-	161	-	-	-	-	-	0,299	-	-	-	-

+ carregamento est\aticico antes do c\iciclico (vigas que romperam durante carregamento c\iciclico e V4R, onde houve dano nos extens\ometros el\etricos)

Tabela 10

Valores de $T_{R,m\acute{a}x}$ e de Δ_{TR} referentes aos ensaios com carregamentos est\atico e c\iclico

Viga	ρ_R (%)	ρ_T (%)	S\o carregamento est\atico	Durante carregamento c\iclico	Carregamento est\atico depois do c\iclico
			$T_{R,m\acute{a}x}$ (kN)	Δ_{TR} (kN)	$T_{R,m\acute{a}x}^*$ (kN)
VR2 [11]	1,00	1,47	370	-	-
V4R	1,00	1,47	-	111 ⁺⁺	348
VR3 [11]	1,31	1,77	490	-	-
V3R	1,31	1,77	-	98,2 ⁺⁺	401
V5R ⁺	1,31	1,77	-	98,2 ⁺⁺	385
V6R ⁺	1,31	1,77	-	127 ⁺	-

* superf\icie de liga\c\ao viga-refor\co lisa; $T_{R,m\acute{a}x}^*$ resist\encia ao cortante longitudinal residual ap\os carregamento c\iclico; ⁺⁺ sem ruptura durante carregamento c\iclico; ⁺ ruptura por fadiga com 875.280 ciclos

eou

$$\Delta T_{R,ch} = 16000 e^{-0,187 \log N} \tag{1b}$$

Essas express\oes podem ser escritas na forma de varia\c\ao de tens\ao cisalhante nos chumbadores (em MPa), ou seja,

$$\log \Delta T_{R,ch} = -0,0811 \log N + 2,354 \tag{2a}$$

ou

$$\Delta \tau_{ch} = 226 e^{-0,187 \log N} \tag{2b}$$

Note-se que, para $N=1$, essa varia\c\ao \e, aproximadamente, igual a $0,4f_y$ e que, segundo o crit\erio de ruptura de Tresca (mais conservador que o de Von Mises), a tens\ao cisalhante limite seria $0,5f_y$. Essa menor resist\encia verificada pode ser explicada pela

concentra\c\ao de tens\oes decorrente da exist\encia de rosca nos chumbadores e pelo fato dos chumbadores n\o estarem submetidos a cisalhamento puro.

A figura 12 apresenta rela\c\ao entre tens\ao cisalhante resistente na liga\c\ao, τ_R , e $\rho_w f_y$ dada pela express\ao $\tau_R = 0,4 \rho_w f_y$ e as das vigas VR2 e VR3 de [11] e V3R e V5R, que romperam por cortante longitudinal na liga\c\ao viga- refor\co durante carregamento monotonicamente crescente, sendo que as VR2 e VR3 [11] n\o tinham sido submetidas a carregamento c\iclico anteriormente. A viga V4R tamb\em foi inclu\ida, apesar de ter rompido por flex\ao, pois, ao romper, deveria estar na imin\encia de romper por cisalhamento na liga\c\ao viga-refor\co. Os valores de τ_R das V4R, V3R e V5R s\ao os das tens\oes cisalhantes resistentes residuais ap\os o carregamento c\iclico. Nessa figura, verifica-se que, exclu\indo a V4R, que n\o chegou a apresentar ruptura na liga\c\ao viga-refor\co, a express\ao $\tau_R = 0,4 \rho_w f_y$ fornece valores de τ_R menores ou aproximadamente iguais aos das vigas analisadas, tanto para vigas ensaiadas

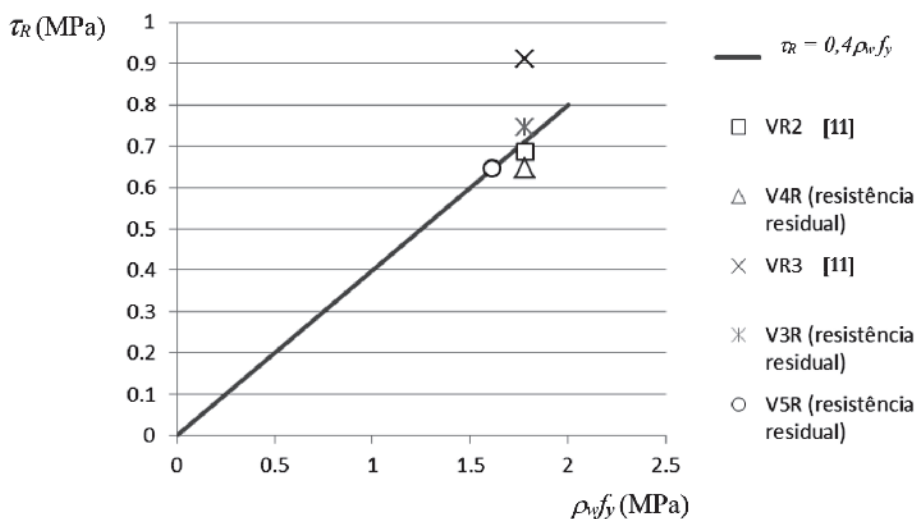


Figura 12

Rela\c\ao entre τ_R e $\rho_w f_y$ dada pela express\ao $\tau_R = 0,4 \rho_w f_y$ e as das vigas VR2 e VR3 [11] e as residuais das V4R, V3R e V5R

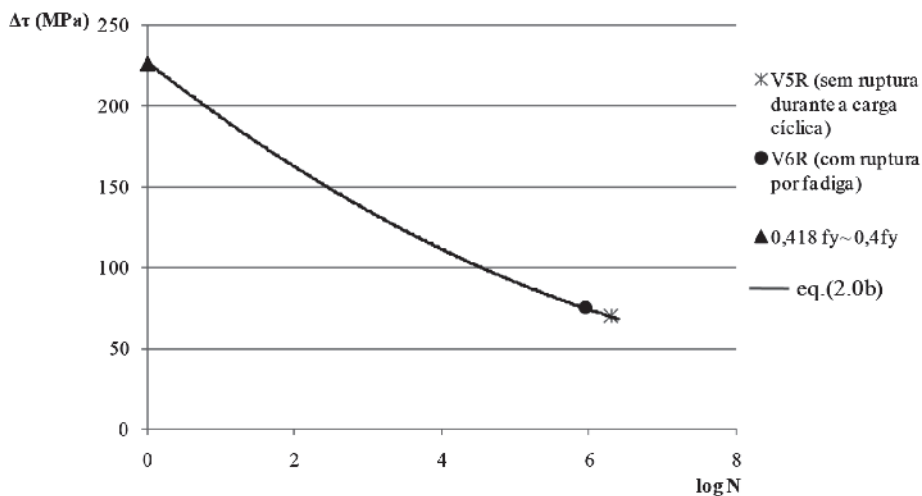


Figura 13

Varição da tensão cisalhante na ligação viga-reforço em função do número de ciclos dada pela equação (2.0b)

somente estaticamente quanto para aquelas submetidas ao carregamento cíclico antes do estático (tensão cisalhante resistente residual).

Essa figura e a 13 sugerem que as ligações viga-reforço providas de chumbadores de expansão podem ser dimensionadas considerando-se:

$$\Delta\tau \leq 0,4 \rho_w f_{yd} [e^{-0,187 \log N}] \tag{3}$$

onde N é o número de ciclos previstos, $\Delta\tau$ é obtida a partir dos valores das forças longitudinais na ligação T_{Rmax} e

T_{Rmin} calculadas no estágio II, para cargas de serviço máximas (carga permanente + cargas variáveis frequentes) e mínimas (cargas permanentes) previstas, respectivamente, e $f_{yd} = f_y / 1,15$.

Os deslizamentos máximos entre viga e talão de reforço, nas vigas V2R e V4R, que romperam por flexão, foram 0,260mm e 0,641mm, respectivamente. Nas V3R e V5R, com ruptura por cisalhamento na ligação viga-reforço, foram registrados deslizamentos de 0,754mm e 1,34mm na posição do medidor S1 e de 9,85mm (V3R) e 6,57mm (V5R) na do medidor S3. A figura 14 apresenta relação entre carga e deslizamento na ligação viga-reforço das

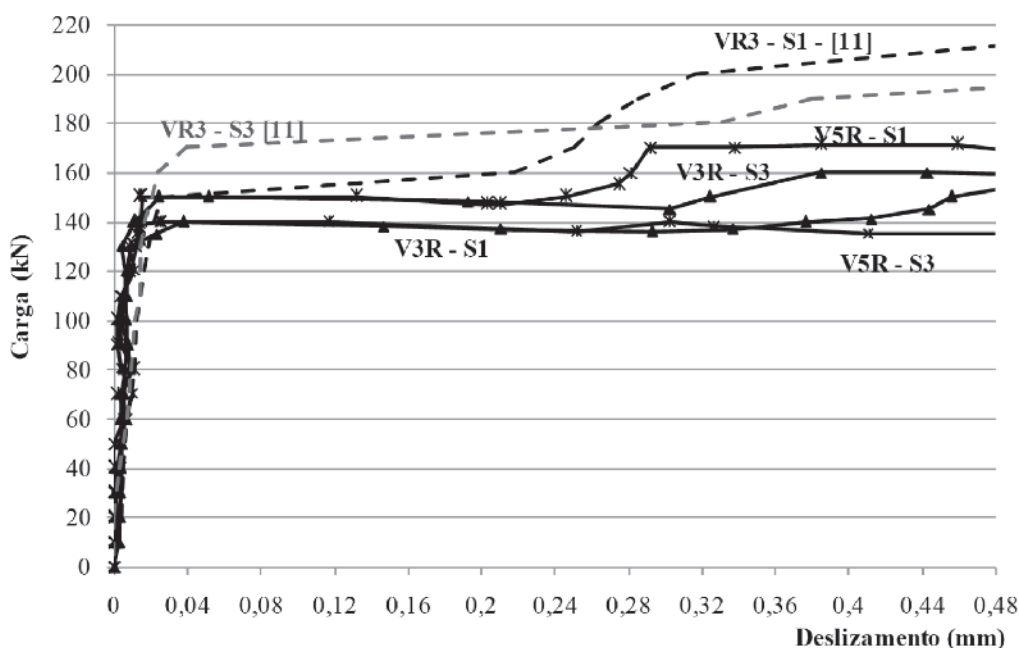


Figura 14

Relação entre carga e deslizamento na ligação viga-reforço das vigas VR3[11] e V3R[1] e V5R.[1]

vigas VR3 [11] e V3R e V5R, onde se notam patamares que indicam o efeito dos chumbadores utilizados na ligação. Observando-se na figura 13 as curvas das vigas de superfície rugosa deste estudo, V3R, e da VR3 [11], nota-se, para um mesmo valor de deslizamento, maior carga na viga VR3 [11], que não teve carregamento cíclico.

4. Conclusões

Há poucos estudos experimentais sobre a resistência ao cisalhamento de ligações de concreto submetidas a carregamento cíclico e, na pesquisa bibliográfica realizada [1], não foi encontrado nenhum de ligações com chumbadores de expansão. De acordo com o MC 2010 (FIB, 2013), para o caso de carregamento cíclico, no dimensionamento de ligações pode-se adotar o procedimento aproximado de considerar a resistência igual a 40% da referente a carregamento estático, se surgir fissura na ligação sob carregamento de serviço.

Tendo em vista as vantagens da técnica de reforço à flexão por adição de concreto e barras de aço tendo chumbadores de expansão na ligação viga-reforço, foi desenvolvido o estudo experimental aqui descrito, visando investigar o comportamento de vigas reforçadas segundo essa técnica, submetidas a carregamento cíclico de amplitude constante, mas variável entre si, sem inversão do sentido dos esforços (carregamento unidirecional).

A comparação entre vigas reforçadas semelhantes, com superfície de ligação viga-reforço rugosa, ensaiadas somente estaticamente com as que receberam carregamento cíclico antes do estático mostrou que o carregamento cíclico não teve influência negativa na capacidade resistente das vigas que romperam por flexão (V2R, V4R). Nas que romperam por cisalhamento na ligação viga-reforço, diferentemente das semelhantes submetidas apenas a carregamento estático, os deslizamentos maiores verificados na ligação viga-reforço impediram que a armadura longitudinal tracionada chegasse a ter deformações específicas maiores que a correspondente ao início do escoamento. Das vigas que se diferenciavam apenas pela condição da superfície de ligação viga-reforço (V3R e V5R), a com superfície lisa teve resistência praticamente igual à da com superfície rugosa.

Ensaio de vigas reforçadas e de cisalhamento direto com ligações entre concretos tendo chumbadores de expansão realizados anteriormente, sem carga cíclica, mostraram que, ao dimensionar as ligações, a tensão cisalhante de cálculo deve atender à condição:

$$\tau \leq 0,4 \rho_w f_{yd} \quad (4)$$

Por outro lado, para abranger os casos de ligações com cargas estáticas e cíclicas, verificou-se poder considerar para variação da tensão cisalhante nas ligações:

$$\Delta\tau \leq 0,4 \rho_w f_{yd} [e^{-0,187 \log N}] \quad (5)$$

Em relação aos deslizamentos viga-reforço, foi verificado que, para um mesmo valor de deslizamento, em viga sem carregamento cíclico tem-se maior valor de carga que na semelhante com apenas carregamento monotônico crescente.

5. Referências bibliográficas

[1] VAZ, A. P. R.. Comportamento de vigas reforçadas sob ação

de carregamento cíclico. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

- [2] GOHNERT, M. Horizontal shear transfer across a roughened surface. *Cement and Concrete Composites*, v. 25, n.3, (Apr), pp. 379-385, 2003.
- [3] CLIMACO, J. C. T. S.; REGAN, P. E. Evaluation of Bond strength between old and new concrete in structural repairs. *Magazine of Concrete Research*, v. 53, n.6, (Dec), pp. 377-390, 2001.
- [4] BEUSHAUSEN, H., ALEXANDER, M. G. Bond strength development between concretes of different ages. *Magazine of Concrete Research*, v. 60, n.1, (Feb), pp. 65-74, 2008.
- [5] MATTOCK, A. H. Shear transfer in concrete having reinforcement at an angle to the shear plane, ACI Special Publication SP-42, American Concrete Institute, pp. 17-42, 1974.
- [6] LIEW, S. C., CHEONG, H. K.. Flexural behavior of jacketed RC beams. *Concrete International*, v. 13, n. 12, (Dec), pp. 43-47, 1991.
- [7] PIANCASTELLI, E. M. Comportamento do reforço à flexão de vigas de concreto armado, solicitando a baixa idade e executando inclusive sob carga. Dissertação de M. Sc., UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 1997.
- [8] CHEONG, H. K.; MacALEVEY, N. Experimental behavior of jacketed reinforced concrete beams. *ASCE Journal of Structural Engineering*, v. 126, n. 6, (Jun), pp. 692-699, 2000.
- [9] BORJA, E. V. Estudo do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão e esforço cortante. Dissertação de M. Sc., UFPE, Recife, Pernambuco, 2001.
- [10] SANTOS, E. W. F. Reforço de vigas de concreto armado à flexão por encamisamento parcial. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2006.
- [11] SIMÕES, M. L. F. Reforço à flexão de vigas de concreto armado por encamisamento parcial. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- [12] SANTOS, P. M. D., JÚLIO, E. N. B. S., SILVA, V. D. Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface, *Construction and Building Materials*, v. 21, n.8, (Aug), pp. 1688-1695, 2007.
- [13] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON, FIB Model Code for concrete structures 2010, 2013. Lausanne, Switzerland.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014. ABNT NBR-6118:2014: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [15] XIE, E., VALENTE, M. I. B. Fatigue strength of shear connectors, Research Report, universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2011.