

EFEITO DO SUBSTRATO DE TRANSIÇÃO SOBRE O REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM CANTONEIRAS METÁLICAS

Henrique Cesar Campagnolo Gimenes (1); E-mail: henriquegimenes@gmail.com

Vladimir José Ferrari (2) E-mail: vladimirjf@hotmail.com

Resumo: Há diferentes técnicas disponíveis para o reforço de elementos estruturais. Entre elas, a técnica da aderência de chapas de aço apresenta a vantagem da facilidade de execução e alteração mínima na geometria do elemento estrutural. Ademais, quando se fala da aplicação do reforço com cantoneiras metálicas outras vantagens podem ser agregadas, como por exemplo em caso de remoção de pilares. Todavia, as pesquisas têm revelado que a aderência de chapas de aço à vigas de concreto armado está sujeita ao mecanismo de peeling prematuro da chapa. A impossibilidade de mobilizar toda a capacidade resistente dos elementos reforçados em virtude da presença de ruínas prematuras já está demonstrada. Nesse sentido, dando-se sequência a estudos anteriores e aplicando-se o conceito do substrato de transição, analisa-se neste trabalho o efeito da reconstituição do banzo tracionado de vigas sobre o comportamento à flexão do elemento reforçado com cantoneiras metálicas. Para tanto foram moldadas vigotas de concreto armado de seção transversal (150 x 150) mm, 750 mm de comprimento e submetidas a ensaios de flexão em quatro pontos. Em três grupos, o banzo tracionado das vigotas foi previamente removido e reconstituído por meio da aplicação de diferentes compósitos cimentícios. Modelos analíticos foram utilizados para estimar as cargas teóricas e comparar com as obtidas experimentalmente. Os resultados demonstram que ocorreu significativa melhora no desempenho das vigas reforçadas quando da reconstituição do banzo tracionado com materiais fibrosos de maior tenacidade e resistência à fissuração. O modo de ruína das vigas reconstituídas e reforçadas foi modificado quando da comparação com as vigas de concreto armado reforçadas, chegando-se a aumento de até 32% na força de peeling. O modelo teórico aqui utilizado mostrou-se satisfatório com pequena divergência (em torno de 10%) com os resultados experimentais.

Palavras-chave: Reforço, cantoneiras metálicas, substrato de transição, compósitos cimentícios.

TRANSITION LAYER EFFECT ON BENDING STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH STEEL PROFILES

Abstract: There are different techniques available for strengthening of structural elements. Among them, the steel plate bonded technique presents the advantage on execution and minimal alteration in the structural element geometry. Moreover, in the case of strengthening with steel profile profiles application, other advantages can be added, such as on the columns removal. However, researches has shown that the steel plate bonding to reinforced concrete (RC) beams. The inability of mobilizing the full strength of the strengthened elements due to premature failure is already demonstrated. Thus, following previous studies and applying the transition layer concept, this paper analyzes the effect of tensile zone reconstruction beams on flexural behavior of the strengthened element with steel profiles. For this purpose, RC beams with (150 x 150) mm cross-section, 750 mm length was molded and submitted to four-point bending tests. In three groups, the tensile zone was demolished and subsequently reconstructed with different cementitious composites. The specimens gain ductility promoted by the tensile zone cracking control close to the steel profile and reduce premature peeling failure. Analytical models were used to estimate the theoretical loads and compare with those experimentally obtained. The results show significant improvement on the strengthened beams performance with the tensile zone reconstructed with fiber materials because of higher toughness and crack resistance. The failure mode of the retrofitted and strengthened beams has changed comparing to strengthened RC beams of groups 2 and 3, reaching up to 32% increase in peeling strength of group 5 when compared to group 2. The theoretical model used here was satisfactory presenting low divergence (around 10%) from experimental results.

Keywords: strengthening, steel profiles, transition layer, cementitious composites.

1. Introdução

A literatura técnica versa sobre diversos tipos de reforço de estruturas e/ou elementos existentes. Segundo Arslan et al. (2008) são algumas das técnicas de reforço disponíveis: a aderência com chapas de aço, polímeros reforçados com fibras, protensão externa e adição de camada de um novo concreto.

Ainda segundo os referidos autores, a aderência de chapas de aço como reforço de estruturas apresenta como vantagens a facilidade de execução e a alteração mínima na geometria da estrutura, sendo a desvantagem da técnica a possibilidade de corrosão na interface entre o adesivo-chapa afetando diretamente a resistência da aderência.

Estudos já realizados (Oehlers & Moran 1990; Oehlers 1992; Raof et al. 2000; Barners and Mays 2006) indicaram que vigas de concreto armado reforçadas externamente com chapas de aço são propensas à apresentar modos de ruína prematuros e frágeis que antecedem e impedem o desenvolvimento da capacidade de carga máxima do elemento.

Oehlers (1992) foi capaz de diferenciar dois modos de ruína por peeling da chapa: shear peeling e flexural peeling, sendo o primeiro modo iniciado por fissuras diagonais de cisalhamento e o segundo por fissuras verticais de flexão.

Leung (2001), Aykac et al. (2013), Raof & Zhang (1997), Raof et al. (2000) discorrem sobre o mecanismo de peeling, sobre sua propagação, manifestação prematura, descolamento inicial e fatores influenciadores do fenômeno.

Arslan et al. (2008), Saba et al. (2003), Aykac et al. (2013) versam sobre a ancoragem da chapa que, quando melhorada aumenta a capacidade à flexão da viga reforçada, caso feita com grampos na extremidade previne pelling da chapa e que diferentes tipos de técnicas de ancoragem tem uma resposta positiva no comportamento à flexão da viga.

Sallam et al. (2004) estudou o efeito da substituição do concreto de cobertura por um grout sobre a ruína por peeling da chapa.

Logo, as pesquisas têm revelado que a aderência de chapas de aço às vigas de concreto aumentam substancialmente a rigidez a flexão, reduz a fissuração e as deformações do elemento e contribui para o aumento da capacidade de carga.

Nesse sentido, dando-se sequência aos estudos de Nascimento (2017) e aplicando-se o conceito do substrato de transição, estudado por Ferrari et al. (2013), pretende-se aqui analisar o efeito da influência da reconstituição do banzo tracionado de vigotas sobre o comportamento à flexão do elemento reforçado.

A ideia é que a reconstituição do substrato tracionado por um material de maior resistência à flexão e tenacidade possa retardar ou até mesmo evitar o surgimento das ruínas prematuras do perfil metálico. Com isso, espera-se que o desempenho dos elementos reforçados possa ser potencializado através de ganho de ductilidade promovido pelo controle da fissuração no banzo tracionado junto ao perfil de reforço.

2. Programa Experimental

2.1 Vigas de concreto armado

Na Figura 1a tem-se o aspecto geral e o esquema estático das vigotas submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos, sendo a seção transversal de 150 x 150 mm e comprimento total de 750 mm, equivalendo a um vão de cisalhamento de 200 mm.

A armadura de cada vigota é mostrada na Figura 2, de forma a ter ruína caracterizada por sua deformação excessiva. Os estribos são compostos por barras de aço de 6,3 mm

posicionadas a cada 40 mm de forma a evitar ruína prematura por efeito de cisalhamento.

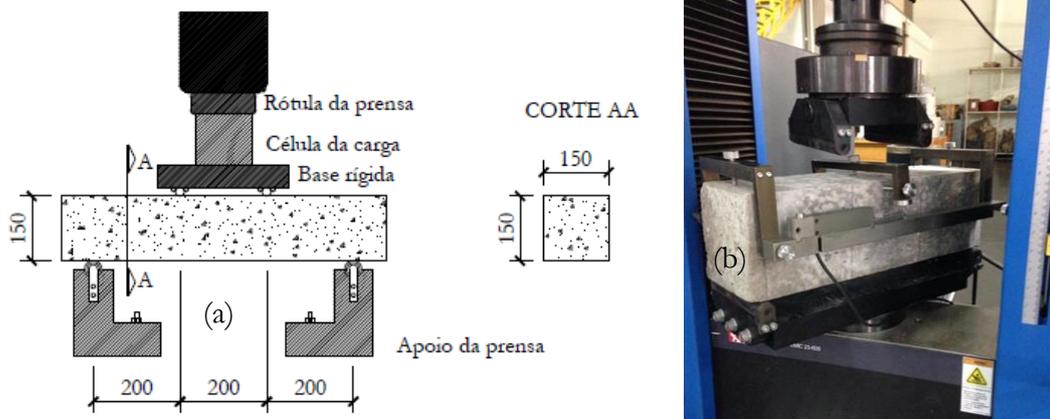


Figura 1 – Esquema geral de ensaio

Na Tabela 1 tem-se a indicação dos grupos das vigotas. O grupo 1 é formado por vigotas de referência, sem nenhum tipo de intervenção, para que possam ser estabelecidas comparações com as vigotas dos demais grupos.

O grupo 2 é formado por vigotas reforçadas á flexão com cantoneiras metálicas coladas externamente no banzo inferior tracionado conforme é indicado na Figura 2a. Para o reforço á flexão serão empregadas cantoneiras metálicas com seção de abas iguais de 1” x 1/8” coladas externamente ao concreto por meio de adesivo epoxídico.

Os grupos 3, 4 e 5 serão formados por vigotas submetidas a um processo de intervenção caracterizado por recuperação do banzo inferior seguido por reforço externo por colagem de cantoneiras metálicas. A recuperação é dada pela remoção completa do banzo inferior e reconstituição com um material de melhores propriedades mecânicas em termos de resistência à flexão e tenacidade, formando assim o substrato de transição como indicado na Figura 2b.

Tabela 1 – Descrição dos grupos das vigotas.

Grupos	Vigotas	Intervenção	Tipo de intervenção
1	V1a / V1b / V1c	Nenhuma	Nenhuma
2	V2a / V2b / V2c	Reforço	Colagem de perfis metálicos
3	V3a / V3b / V3c	Reconstituição	Remoção do concreto e reconstituição com Grout
		Reforço	Colagem de perfis metálicos
4	V4a / V4b / V4c	Reconstituição	Remoção do concreto e reconstituição com compósito cimentício CC1 reforçado com fibras de aço
		Reforço	Colagem de perfis metálicos
5	V5a1 / V5b / V5c	Reconstituição	Remoção do concreto e reconstituição com compósito cimentício CC2 reforçado com fibras de aço
		Reforço	Colagem de perfis metálicos

A espessura do substrato de transição é de 40 mm em todo o vão das vigotas com o objetivo de melhor ancorar o material do substrato numa camada acima da armadura tracionada.

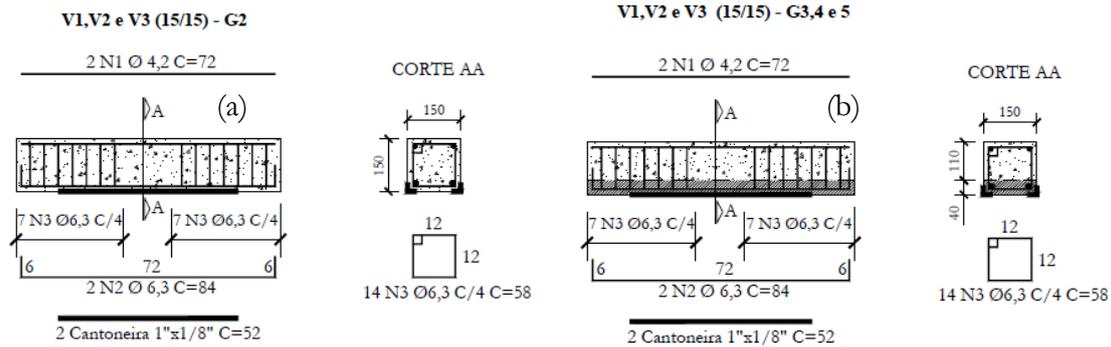


Figura 2 – Vigotas reforçadas do grupo 2,3,4 e 5

3.2. Materiais

O traço do concreto das vigotas foi dosado em 1:2,7:3,7:0,54 (cimento:areia:brita:a/c) para uma resistência de 32 MPa. O cimento utilizado foi o CP II-Z 32 da Votoran, brita com dimensão máxima característica de 12,5 mm e massa específica real de 2,77 g/cm³, areia com dimensão máxima característica de 1,18 mm e massa específica real de 2,64 g/cm³. Foi utilizado na moldagem das vigotas aditivo do tipo plastificante na taxa de 0,8% em relação a massa de cimento.

Nos grupos 3, 4 e 5, o substrato de transição das vigotas foi formado pela reconstituição usando-se o graute e os compósitos cimentícios CC1 e CC2, respectivamente. Esses compósitos foram àqueles desenvolvidos na pesquisa de Ferrari et al. (2013) e a descrição dos traços é a indicada na Tabela 2.

A reconstituição do banzo tracionado das vigotas do grupo 3 foi realizada com graute industrializado para que possam ser estabelecidas comparações com as vigotas do grupo 2, bem como dos grupos 4 e 5 em termos da verificação da eficiência dos compósitos no controle da fissuração e melhor desempenho do elemento reforçado.

Tabela 2 – Descrição do traço dos materiais da composição dos compósitos CC1 e CC2

Compósitos	Tipo de matriz cimentícia	Traço em massa					
		Cimento	Areia	Brita 0	a/c	Aditivo	Fibras*
CC1	Microconcreto	1,0	2,13	1,83	0,48	0,6%	1%
CC2	Argamassa	1,0	2,13	-	0,50	0,6%	2%

Fibras de aço FS8 Wirand (Maccaferri América Latina), comprimento de 25 mm e diâmetro de 0,75 mm. Teor de fibra em relação ao volume.

Aditivo Superplastificante Glênium 51 – dosado em relação ao peso do cimento.

Cimento CP-V ARI PLUS.

3.3. Equipamentos e instrumentação

As vigotas foram submetidas a ensaios de flexão em quatro pontos utilizando-se para tanto o equipamento servo hidráulico Instron/Emic 23-600 conforme mostrado na Figura 1b.

As vigotas foram instrumentadas de modo a obter-se as deformações da seção do meio do vão com o uso de um transdutor e as deformações específicas do concreto comprimido, da armadura tracionada e do reforço metálico por meio de extensômetros elétricos.

A aquisição dos dados foi realizada com o uso do sistema Spider 8 da HBM com as unidades de calibração e amplificação SR 55 – 4,8 kHz/DC e SR 30 – 600 Hz/DC. O Gerenciamento do sistema foi feito através do Software CatmanEasy. A célula de carga utilizada foi de compressão com capacidade de 500 kN.

O concreto das vigotas e os materiais (compósitos cimentícios) aplicados no substrato de transição foram caracterizados quanto a resistência à compressão adotando-se os preceitos da ABNT NBR 5739 (2018), resistência à tração por compressão diametral de acordo com a ABNT NBR 7222 (2011), módulo de elasticidade conforme ABNT NBR 8522 (2017) e quanto a determinação dos parâmetros de resistência flexionais conforme a metodologia e análise de resultados especificados na JSCE SF4 (1984).

As cantoneiras metálicas do reforço foram também caracterizadas quanto ao seu comportamento à tração uniaxial seguindo-se as recomendações da NBR ISSO 6892 (2013).

3.4. Remoção do banzo tracionado das vigotas, reconstituição e colagem do reforço

A remoção do banzo tracionado das vigotas, a nova moldagem para a reconstituição com o substrato de transição e os procedimentos para a colagem do reforço metálico foram realizados por meio da sequência metodológica que segue.

A região do banzo tracionada foi demarcada utilizando-se disco de corte e a remoção foi realizada com uso de talhadeira e ponteira metálica. Para a reconstituição do banzo as vigotas foram colocadas no interior das fôrmas para proceder com a nova moldagem.

Para a execução do reforço, a camada de nata de cimento do substrato foi removida até a exposição parcial dos agregados utilizando-se disco de polimento acoplado à esmerilhadeira elétrica.

A superfície foi limpa da poeira acumulada com uso de ar comprimido e acetona. O adesivo epoxídico foi aplicado nas faces dos perfis procurando-se manter uniformidade na espessura de 2,0 mm e, em seguida mantido sobre pressão através de um sistema de fixação durante o período de cura do adesivo.

4. Apresentação e Análise dos Resultados

4.1. Resistência à compressão axial, diametral e módulo de elasticidade

Na Tabela 3 são reunidos os resultados de resistência à compressão simples (f_c), tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) e módulo de elasticidade (E_c) dos corpos de prova cilíndricos 100 x 200 mm do concreto das vigotas e dos materiais utilizados no substrato de transição.

Tabela 3 – Resistência à compressão, tração por compressão e módulo de elasticidade do concreto das vigotas e dos materiais do substrato

Grupo	Concreto das vigotas				Material do substrato			
	Idade (dias)	f_c (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	E_c (GPa)	Idade (dias)	f_c (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	E_c (GPa)
1	132	29,05	3,11	36,02	-	-	-	-
2	190	19,00	2,07	27,45	-	-	-	-
3	176	24,24	2,77	31,30	57	89,25	5,07	41,29
4	172	25,09	2,73	31,95	53	43,35	4,42	36,19
5	181	29,91	2,96	35,58	37	39,06	3,91	26,32

A resistência à compressão do concreto das vigotas variou entre 19 e 30 MPa e, para os materiais do substrato, a resistência obtida foi de 89 MPa, 43 MPa e 39 MPa para o graute, compósitos CC1 e CC2, respectivamente.

A resistência à tração por compressão do concreto das vigotas variou entre 2,07 e 3,11 MPa e, para os materiais do substrato, a resistência obtida foi de 5,07 MPa, 4,42 MPa e 3,91 MPa para o graute, compósitos CC1 e CC2, respectivamente.

O módulo de elasticidade do concreto das vigotas variou entre 27 e 36 GPa e, para os materiais do substrato, o módulo de elasticidade obtido foi de 41,29 GPa, 36,19 GPa e 26,32 GPa para o graute, compósitos CC1 e CC2, respectivamente.

4.2. Resistência à tração do aço da armadura das vigotas e do reforço metálico

Pela caracterização mecânica à tração axial do aço da armadura das vigotas foi obtido os valores de tensão e deformação específica no escoamento de 600 MPa e 3,13%, respectivamente e, módulo de elasticidade de 192.742 MPa. Na ruptura, a tensão e a deformação foram iguais a 857 MPa e 10,00%, respectivamente.

Para as cantoneiras metálicas do reforço a resistência e deformação específica no escoamento de 287 MPa e 1,45%, respectivamente. O módulo de elasticidade obtido foi de 184.306 MPa e, a resistência e deformação específica na ruptura foram iguais a 418 MPa e 2,22%, respectivamente.

4.3. Resistências flexionais dos materiais do substrato de transição

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da caracterização mecânica do comportamento à flexão dos materiais do substrato de transição.

A análise do comportamento à flexão desses materiais foi realizada segundo a JSCE SF4 (1984) onde, a resistência à flexão (σ_b) e o fator de tenacidade flexional ($\bar{\sigma}_b$). A resistência à fissuração (σ_{cr}) correspondendo ao valor de carga do final do trecho reto elástico (Pf).

Tabela 4 – Resistências flexionais dos materiais do substrato de transição

Grupo	Compósitos	Material do substrato				
		σ_{cr} (MPa)	σ_b (MPa)	$\bar{\sigma}_b$ (MPa)	$f_{d,L/600}$ (MPa)	$f_{d,L/150}$ (MPa)
3	Grout	3,32	3,08	-	-	-
4	CC1	3,54	5,12	3,94	4,99	2,59
5	CC2	4,53	5,35	3,33	4,64	1,85
Concreto das vigotas						
Grupos		1	2	3	4	5
σ_b (MPa)		2,95	1,61	2,31	2,87	3,53
σ_{cr} (MPa)		2,96	1,61	2,31	2,87	3,53

Na Tabela 5 são apresentados os resultados de carga de primeira fissura é (Pf), carga de peeling (Pe) e carga máxima (Pm), suas relações e modos de ruína.

Tabela 5 – Cargas e modos de ruína das vigotas

Grupos	Cargas (kN)			Relações		Modos de ruína
	P_f	P_e	P_m	P_{fi}/P_{f1}	P_{mi}/P_{m1}	
1	21,0	-	61,3	1,00	1,00	Escoamento da armadura tracionada (1)
2	33,0	32,5	65,9	1,57	1,08	Fissura e desprendimento na extremidade do reforço (2)
3	39,0	49,8	68,8	1,86	1,12	Fissura e desprendimento na extremidade do reforço (2)
4	41,0	68,1	82,6	1,95	1,35	Fissura de cisalhamento seguido pelo descolamento da extremidade do reforço (3)
5	60,0	78,6	85,9	2,86	1,40	Fissura de cisalhamento seguido pelo descolamento da extremidade do reforço (3)



Figura 3 – Modos de ruína das vigotas dos grupos 2,3,4 e 5

Os modos de ruínas das vigotas dos grupos 4 e 5 são mostrados na Figura 3b. A ruína nesses grupos foi idêntica e caracterizada por fissura de cisalhamento entre a seção de aplicação de carga e do apoio e culminou com o descolamento da extremidade do reforço. Ficou evidenciado a maior rigidez das vigotas desses dois grupos em relação às demais e também a maior carga de fissuração que para o grupo 4 e para o grupo 5.

O aumento na carga de ruína das vigotas reforçadas, grupos 2 e 3, em relação a vigota de referência foi de apenas 8% e 12%, respectivamente. Já para as vigotas dos grupos 4 e 5, o aumento chegou até a 40%, denotando o efeito positivo do substrato com os compósitos sobre o ganho de resistência.

Em relação a vigota que somente foi reforçada, o aumento na capacidade de carga foi de 25% e 30%, para as vigotas dos grupos 4 e 5, respectivamente.

A reconstituição do substrato com os compósitos cimentícios alterou o modo de ruína das vigotas dos grupos 4 e 5. Enquanto que nos grupos 2 e 3 a fissura principal propagou-se na horizontal promovendo o desprendimento do reforço, nos grupos 4 e 5 a resistência ao avanço da fissura proporcionado pelo substrato evitou a propagação da fissura horizontal, o reforço não desprendeu-se, a ruína foi dada por fissura de cisalhamento e descolamento da extremidade do reforço.

4.4. Deformações específicas

Na Tabela 6 são indicados os valores de deformações obtidos no sistema de aquisição de dados. Em que: “ ϵ_{cm} ” é a deformação da cantoneira na parte central, “ ϵ_{cext} ” é a

deformação da cantoneira na extremidade, “ ϵ_a ” é a deformação da armadura e “ ϵ_{cc} ” é a deformação de compressão do concreto.

Tabela 6 – Deformações específicas

Grupos	Deformações (‰)			
	ϵ_{cm}	ϵ_{cext}	ϵ_a	ϵ_{cc}
1	-	-	2,94	1,27
2	0,32	0,13	5,26	2,47
3	0,47	0,24	3,10	3,07
4	0,51	0,17	2,66	0,83
5	0,67	0,20	1,64	0,80

4.5. Resultados analíticos

A estimativa da carga de ruína prematura por efeito do peeling foi estabelecida utilizando-se a metodologia de Oehlers & Moran (1990).

Segundo Oehlers & Moran (1990), o momento devido a ruína prematura por peeling tem duas definições, o momento de serviço e o momento último. O momento de serviço, M_{sp} , que corresponde o momento no início da manifestação de peeling. Já o M_{up} , é o momento onde o reforço está completamente separado do elemento reforçado.

O valor para momento último é obtido com (1) em que “ EI_{cp} ” é a rigidez flexional da seção fissura, “ f_t ” é a tensão de escoamento no reforço, “ E_s ” é o módulo de elasticidade do aço e “ t ” é a espessura do reforço.

$$M_{up} = \frac{EI_{cp} \cdot f_t}{0,474 \cdot E_s \cdot t} \quad (1)$$

Já o valor do momento de serviço é dado por (2).

$$M_{sp} = \frac{EI_{cp} \cdot f_t}{0,827 \cdot E_s \cdot t} \quad (2)$$

Contando com a interação entre o peeling flexional e o de cisalhamento, Oehlers (1992) estabeleceu que para vigas de concreto externamente recompostas a ruína prematura de peeling é iniciada quando (3) é satisfeita, em que “ M_p ” momento fletor no momento do peeling do reforço, “ V_p ” força cortante no momento do peeling do reforço e “ V_{uc} ” parcela do concreto para contribuição do mecanismo complementar ao modelo de treliça.

$$\frac{M_p}{M_{up}} + \frac{V_p}{V_{uc}} \geq 1,17 \quad (3)$$

Uma outra estimativa de carga de ruína prematura por efeito de peeling foi estimada utilizando-se o modelo analítico de Sharma e al. (2008).

Segundo Sharma et al. (2008) a primeira manifestação de fissura se dá no estágio elástico e a segunda no estágio último com a fissura diagonal ocorrendo segundo o

ângulo “ α ”, conforme ilustra a Figura 4.

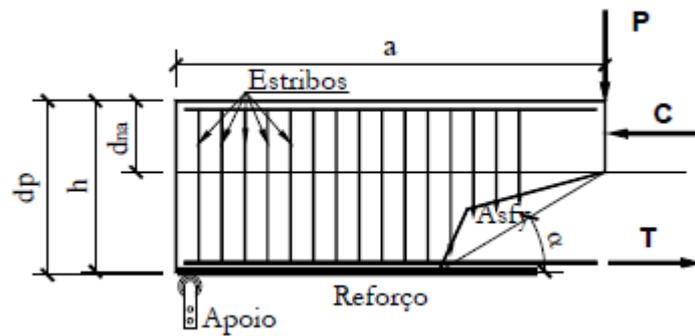


Figura 4 – Modo de fissuração em uma seção arbitrária

Ainda sobre o modelo dos mesmos autores, a força no reforço é restrita a resistência de adesão crítica, $P_{b,crit}$, a qual é representada por (4) e (5), onde “ L_b ” é o comprimento de adesão disponível, “ $L_{b,crit}$ ” é o comprimento máximo de adesão do reforço, “ f_b ” é a resistência à tração por compressão diametral e “ t_p ” é a espessura do reforço.

$$P_{b,crit} = 1,227 \cdot L_b \cdot f_b \cdot b_p \quad \text{se} \quad \frac{L_b}{t_p} < \frac{L_{b,crit}}{t_p} \quad (4)$$

$$P_{b,crit} = 1,227 \cdot L_{b,crit} \cdot f_b \cdot b_p \quad \text{se} \quad \frac{L_b}{t_p} \geq \frac{L_{b,crit}}{t_p} \quad (5)$$

Para a determinação da resultante de concreto comprimido, F_{cc} , na zona de compressão, adota-se a relação de tensão deformação da teoria de Hogenstad, que é expressão em (6), em que “ σ_{cc} ” tensão de compressão do concreto, “ ε_{cc} ” deformação na fibra mais comprimida e “ ε_0 ” deformação do limite elástico do concreto.

$$\sigma_{cc} = f_{ck} \cdot \left\{ 2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_0} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

Já para as resultantes de aço tracionado e perfil podem ser expressas segundo (7) e (8), onde “ σ_{st} ” é a tensão do aço tracionado e “ A_{st} ” é a área da seção transversal do aço tracionado.

$$F_{st1 \ e \ 2} = \sigma_{st1 \ e \ 2} \cdot A_{st1 \ e \ 2} \quad (7)$$

$$F_p = P_{b,crit} \quad (8)$$

Com o equilíbrio da seção reforçada a profundidade do eixo neutro, d_{na} , pode ser encontrada usando um processo iterativo em uma planilha Excel.

A inclinação da fissura da diagonal crítica, onde o esforço cortante é mínimo, é obtida segundo (9), onde “ a ” é distância do apoio para aplicação da carga, “ h ” é a altura da viga, “ d_{na} ” é a profundidade do eixo neutro, “ s ” espaçamento dos estribos, “ k_1 ” é o coeficiente relacionado à média da tensão no bloco de compressão do concreto, “ b ” é a largura da viga, “ A_{st1} ” é a área da seção transversal do aço tracionado 1, “ f_y ” é a

tensão de escoamento do aço, “ d_{st1} ” altura útil da armadura 1, “ A_{st2} ” área da seção transversal do aço tracionado 2, “ d_{st2} ” é a altura útil da armadura 2 e “ A_v ” é a armadura vertical (estribos).

$$\cotg(\alpha) = \frac{a}{1 - 2h + d_{na}} \mp \sqrt{\left(\frac{a}{1 - 2h + d_{na}}\right)^2 - \frac{2s \cdot (A + B + D)}{P_{b,crit} \cdot (h - d_{na})^2 \cdot (1 - 2h - 2d_{na})}} \quad (9)$$

E seus termos componentes são (10), (11), (12) e (13).

$$A = \left[k_1 \cdot f_{ck} \cdot b \cdot \frac{d_{na}^2}{2} \right] \quad (10)$$

$$B = A_{st1} \cdot f_y \cdot (d_{st1} - d_{na}) + A_{st2} \cdot f_y \cdot (d_{st2} - d_{na}) \quad (11)$$

$$C = \left[\frac{A_v \cdot f_y}{2s} \cdot (h - d_{na})^2 \cdot \cotg^2(\alpha) \right] \quad (12)$$

$$D = P_{b,crit} \cdot (d_p - d_{na}) \quad (13)$$

Após determinar o ângulo da inclinação de α , a resistência da fissura da diagonal crítica, $V_{u,peel}$, da viga reforçada com perfis metálicos determina-se por (14):

$$V_{u,peel} = \frac{1}{a + (h - d_{na}) \cdot \cotg(\alpha)} \cdot (A + B + D) \quad (14)$$

A Tabela 7 mostra os valores de carga obtidos com os modelos analíticos de ruína de peeling segundo Oehlers & Moran (1990), Sharma et al. (2008). Mostra também as carga experimentais de peeling e máxima observadas no ensaio e o tipo de ruína da viga.

Tabela 7 – Comparação das cargas analíticas com experimentais

Grupos	Cargas analíticas (kN)		Experimentais (kN)		Ruína
	Peeling		Pe	Pm	
	Oehlers & Moran (1990)	Sharma et al (2008)			
1	-	-	-	51,3	(1)
2	38,39	57,19	32,55	65,9	(2)
3	43,36	70,59	49,83	68,8	(2)
4	44,42	74,65	68,11	82,6	(3)
5	50,38	73,71	78,62	85,9	(3)

É de fácil observação que Oehlers & Moran (1990) tem a previsão de carga por peeling mais precisa nos grupos 01 e 02, com 17,94% e 12,98% de erro para os grupos 01 e 02 respectivamente. Já Sharma et al. (2008) é mais preciso na previsão de carga por peeling nos grupos 04 e 05, com 9,60% e 6,25% de erro respectivamente.

6. CONCLUSÕES

Pode-se concluir que, a suposição inicial foi confirmada, ao realizar o tratamento da camada inferior da vigota com um material mais resistente à compressão, com maior tenacidade e resistência à flexão, acabou em conduzir um aumento na carga crítica e melhor desempenho do elemento de reforço, inibindo também as ruínas prematuras que antes aconteceram em estudos já conduzidos.

É visível a inferência que o material do substrato é decisivo no comportamento do reforço, uma vez que, diversas grandezas tiveram seus valores amplificados, corroborando assim tal afirmação. Uma delas foi a carga última que teve seu valor aumentado com os tratamentos realizados e que teve seu auge no compósito cimentício CC2. Outra grandeza amplificada foi a deformação no perfil, que tanto no meio quanto na extremidade, tiveram seus valores acrescidos, indicando que esses elementos foram mais solicitados em materiais com maior resistência à compressão, graute, e com maior resistência à flexão e tenacidade, CC1 e CC2.

Também entende-se que, com a diminuição das grandezas, deformação de compressão do concreto e deformação na armadura, que decresceram conforme o uso de materiais como o graute, CC1 e CC2, tais materiais proporcionaram uma maior solicitação dos elementos reforçadores, perfis tipo cantoneira de aço, indo em conjunto com a amplificação da resistência mecânica da peça.

Em contra partida o modelo de cálculo que previa a carga de ruína por peeling, Oerlers & Moran (1990) teve cargas próximas aos observados nos ensaios para os grupos 02 e 03. Já para os grupos 04 e 05 teve um desempenho um pouco aquém. É importante lembrar também que tal modelo não leva em conta o tratamento do substrato de transição, razão essa atribuída ao maior erro ocorrido nos grupos 04 e 05.

Em relação ao modelo de cálculo de previsão da carga de ruína por peeling segundo Sharma et al. (2008), pode-se afirmar que tem uma previsão insatisfatória para os grupos 02 e 03 onde apresentou grandes valores de erros e carga de peeling distante do valor do ensaio. Por fim, a previsão da carga de ruína por peeling no que tange os grupos 04 e 05 é altamente satisfatória.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739. *Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.* Rio de Janeiro, 1918.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8522. *Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama tensão-deformação – Método de ensaio.* Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7222. *Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.* Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 6892. *Materiais Metálicos – Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente.* Rio de Janeiro, 2013.

ARSLAN, G.; SEVUK, F.; EKIZ, I. *Steel plate contribution to load-carrying capacity of retrofitted RC beams.* Construction and Building Materials 22 (2008), 143-153.

AYKAC, S.; KALKAN, I.; ASCE, AFF. M.; AYKAC, B.; KARAHAN, S. KAYAR, S. *Strengthening and repair of reinforced concrete using external steel plates.* Journal of Structural Engineering, Ankara, 1 June 2013. 929–939

BARNES, R. A.; MAYS, G. C. *Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates: Part 2 – Design guidelines.* Construction and Building Materials, Julho 2006. 403-411.

FERRARI, V. J.; HANAI, J. B.; SOUZA, R. A. *Flexural strengthening of reinforcement concrete beams using high performance fiber reinforcement cement-based composite (HPFRCC) and carbon fiber reinforced polymers (CFRP).* Construction and Building Materials, volume 48, november 2013, pages 485-498.

LEUNG, C. K. Y. *Delamination failure in concrete beams retrofitted with a bonded plate.* Journal of Material in Civil Engineering, 13, n. 2, Abril 2001.

NASCIMENTO, A. R. D. *Capacidade de carga de vigas de concreto armado reforçadas com perfis de aço laminado.* Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, p.151. 2017.

OEHLERS, D. J.; MORAN, P. J. *Premature failure of externally plated reinforced concrete beams.* Journal of Structural Engineering, 116, n. 4, Abril 1990. 978-995.

OEHLERS, D. J. *Reinforced concrete beams with plates glued to their soffits.* Journal of Structural Engineering, 118, n. 8, Agosto 1992. 2023-2038.

RAOOF, M.; EL-RIMAWI, J. A.; HASSANEN, M. A. H. *Theoretical and experimental study on externally plated R.C. beams.* Engineering Structures, 22, n. 1, Janeiro 2000. 85-101.

RAOOF, M.; ZHANG, S. *An insight into the structural behavior of R.C. beams with externally bonded plates.* Structures and Buildings, 122, n. 4, Novembro 1997. 477-492.

SALLAM, H. E. M. et al. *Prevention of peeling failure in plated beams.* Journal of Advanced Concrete Technology, 2, n. 3, Dezembro 2004. 419-429.

SABA, A. M.; SALLAM H.E.M., S. H.; A.H., R. *Effect of plate end anchorage and side plates on the efficiency of plated beams.* University Al-Azhar Engineering Journal, 6, n. 1, 2003. 555-564.

SHARMA, S.K.; MOHAMED ALI, M.S.; GOLDAR, D.; SIKDAR, P.K. *Investigation of critical diagonal crack debonding in plated RC beams.* Composites Part B: engineering, n. 39, 2008. 570-584.