Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

USO DE INTERFACE COESIVA EM SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE VIGAS REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM PRFC

USE OF COHESIVE INTERFACE IN FE SIMULATIONS OF PRFC STRENGTHENED BEAMS

Maicon de Freitas Arcine[1]
Nara Villanova Menon[2]

Resumo: A simulação numérica na construção civil se tornou uma ferramenta indispensável para pesquisas em estruturas. São práticas e eficientes, além econômica comparada as experimentais. Nesta pesquisa será avaliado os esforços que atuam na interface adesiva e no reforço de uma viga em concreto armado reforçada ao cisalhamento com Polímero Reforçado com de Fibra de Carbono (PRFC), por meio de simulações numéricas. Além disso, teve o intuito de prever o descolamento (colapso) desta interface. Para isso foram realizadas simulações computacionais no *software* ABAQUS, baseadas em testes experimentais de Obaidat, Heyden e Dahlblom (2010). Na interface do reforço, foram adotados elementos coesivos para representar o adesivo químico. O tratamento dos dados foi por meio de gráficos carga x deslocamento e imagens que ilustram os *outputs* do programa, como tensões, danos e deformações plásticas. Os resultados numéricos apresentaram boa concordância com os reais, o que proporcionou conclusões pertinentes às análises. Os danos no elemento coesivo foram semelhantes aos da região de descolamento experimental. O uso do reforço a cortante, permitiu o aumento da resistência dos elementos estruturais. Além disso, ao aumentar a área de contato do PRFC com o concreto por meio do adesivo, sua ancoragem apresentou grande melhoria. As informações oriundas destes resultados, permitiu avaliar e prever as regiões de perda de aderência, o que pode contribuir para que trabalhos futuros desenvolvam técnicas que evitem o descolamento prematuro de vigas reforçadas ao cisalhamento.

Palavras-chaves: Simulação numérica. Viga reforçada. Elemento coesivo. Descolamento. ABAQUS.

Abstract: *FE analysis in construction has become an indispensable tool for structural research. They are practical and efficient, as well as economical compared to experimental ones. In this research will be evaluated the efforts acting on the adhesive interface and the strengthened of a shear strengthened reinforced concrete beam with polymer reinforced fiber carbon (PRFC), through numerical simulations. In addition, it was intended to predict the debonding (collapse) of this interface. For this, computer simulations were performed using ABAQUS software, based on experimental tests by Obaidat, Heyden and Dahlblom (2010). In the Strengthened interface, cohesive elements were adopted to represent the chemical adhesive. The treatment of the data was through load x displacement graphs and images that illustrate the program outputs, such as tensions, damages and plastic deformations. The numerical results presented good agreement with the real ones, which provided pertinent conclusions to the analyzes. Damage to the cohesive element was similar to that of the experimental debonding region. The use of shear Strengthened allowed the increase of strength of structural elements. In addition, by increasing the contact area of the PRFC with the concrete through the adhesive, its anchoring showed a great improvement. The information from these results, allowed to evaluate and predict the regions of loss of adhesion, which may contribute to future work to develop techniques that prevent premature debonding of shear reinforced beams.*

Keywords: *FE analysis. Strengthened beam. Cohesive elements. Debonding. ABAQUS.*

[1]*Universidade Estadual de Maringá, Campus Maringá – Brasil, email:engmaiconarcine@outlook.com*
[2] *Universidade Estadual de Maringá, Campus Maringá – Brasil, email: nvmenon@uem.br*

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

1 Introdução

Ao longo da vida útil de estruturas em concreto armado, fatores como incrementos de carga, danos de partes estruturais (envelhecimento, incêndios, corrosão da armadura, impacto de veículos etc.), modificação do sistema estrutural, erros de projeto e cálculo, além de erros de execução, podem afetar seu desempenho. Logo, estas estruturas se tornam frágeis e deficientes para os esforços as quais foram projetadas. Tal situação possibilitou o desenvolvimento de novas técnicas capazes de recuperar e fortalecer uma estrutura em concreto. Estes reforços são geralmente aplicados com materiais compósitos denominados de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), devido à suas diversas vantagens, como alta resistência, leve, flexível, fácil manuseio e durabilidade (PANIGRAHI; BISWAL; BARIK, 2014).

O uso do reforço externo (*externally bonded*) de PRF em vigas podem ser aplicadas de duas formas, ao cisalhamento ou a flexão. Na flexão o material é aderido somente na parte inferior de uma viga armada e ao cisalhamento o PRF é disposto principalmente nas faces laterais de uma viga armada (MACHADO; MACHADO, 2014).

O sistema de reforço a esforços cortantes consiste em usar lâminas de PRFC colados em forma de faixas nas regiões tracionadas. As fibras são dispostas transversalmente na face da viga, reforçando as diagonais comprimidas da treliça de Morsh, semelhante aos estribos. Existem três formas de reforço à cortante, são elas: apenas nas laterais da viga, envolvimento em forma de “U” e envolvimento total da seção transversal (ACI 440.2R-08, 2008).

No entanto, a falha ao cisalhamento do concreto armado é considerada frágil e catastrófica. Já a flexão é de natureza dúctil. Assim, Uma viga deficiente ao cisalhamento, ou quando a capacidade de absorver esforços deste tipo é menor que a flexão, o reforço ao cisalhamento deve ser considerado. Logo, é extremamente importante avaliar o reforço não apenas a flexão, mas também a esforços cortantes (PANIGRAHI; BISWAL; BARIK, 2014). No entanto, apenas alguns estudos sobre este tipo de reforço são realizados (YU *et al*., 2019).

A capacidade de uma viga reforçada ao cisalhamento se dá pela transferência de esforços na interface PRF/Concreto. A transferência de esforços entre os elementos pode cessar caso ocorra o rompimento do adesivo, denominado de descolagem do reforço. Logo, a transferência de tensões é perdida e deixa a viga novamente vulnerável a esforços não previstos na ausência do PRFC. Ocorre então o rompimento da estrutura sem prévio aviso, situação que compromete a segurança da edificação (MACHADO; MACHADO, 2014).

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

O PRF é suscetível a falhas por descolamento, pelas quais as forças não podem mais ser transmitidas entre o concreto e o PRF. Este modo de falha pode ocorrer nas extremidades livres do reforço ou em seu intermediário. A descolagem em sistemas de reforço em "U" e nas laterais é caracterizada pela falha das extremidades livres, enquanto que no envoltório total da viga, a descolagem se dá pela formação de fissuras intermediárias no concreto sobre o PRF (COLALILLO; SHEIKH, 2014).

Com a finalidade de prever certas situações e desenvolver novas tecnologias de reforço, as simulações numéricas são essenciais para complementar estudos sobre este tema. As simulações são capazes de auxiliar o profissional em controlar as condições de contorno dos elementos de forma rápida e simples. Isto possibilita compreender melhor os sistemas estruturais e prever novos métodos de falha que comprometam a estrutura.

O objetivo desta pesquisa é estudar numericamente o efeito da interface entre concreto e o material de reforço em vigas reforçadas ao cisalhamento com PRFC: de início com perfeita adesão (*Tie constraints*)[1] e em seguida com materiais coesivos (cola epóxi). Foi adotada a viga experimental de Obaidat, Heyden e Dahlblom (2010) e com o auxílio do *software* ABAQUS foram feitas as análises numéricas. Os resultados numéricos e experimentais foram comparados. A análise numérica calibrada com a viga referência é então utilizada para os estudos da interface da viga reforçada: primeiramente com faixas em "U" e posteriormente com uma única faixa em "U".

1.1 Modelos constitutivos e propriedades dos materiais

1.1.1 Concreto

Por ser um material cerâmico, o comportamento do concreto é quase-frágil, portanto, modelos que representam melhor o dano é visto como aceitáveis em simulações deste material (DEMIN; FUKANG, 2017). É descrito então um modelo multiaxial denominado *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) ou Modelo de Dano Plástico, proposto por Lubliner *et al*. (1989) e desenvolvido por Lee e Fenves (1998). Também chamado de modelo de Barcelona, assume-se que o dano no concreto é causado principalmente por fissuras de tração (*Tensile cracking* - ε_t^{ck}) e esmagamento a compressão (*Compressive crushing* - ε_c^{ch}).

O CDP oferece uma capacidade de modelagem progressiva de dano no material, no qual a variável de dano escalar varia de $0 \leq d \leq 1$. Neste caso, $d=0$ corresponde a um material

[1] Une duas superfícies separadas para que não haja movimento relativo entre elas. Permite fundir duas regiões, mesmo que a malha criada seja diferente entre elas (*Abaqus User´s Guide*, 2014).

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

totalmente íntegro e *d=1* relaciona-se ao dano completo ou ao início do faturamento. Os fatores de dano d_c e d_t, representam a taxa de degradação da rigidez do concreto causada pelo dano no material durante a compressão e tração, respectivamente, sob tensão uniaxial.

Na Figura 1 (a) e Figura 1 (b), tem-se o comportamento do concreto à tensão uniaxial de compressão e de tração, respectivamente, ambos disponíveis no manual do ABAQUS, volume III.

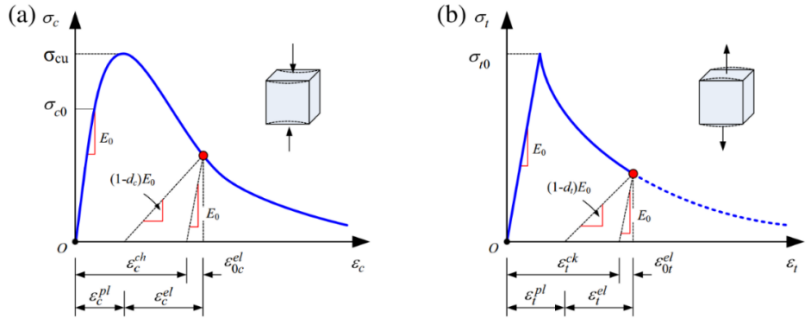


Figura 1 - Tensão x Deformação do CDP no ABAQUS para tensão uniaxial de compressão (a) e de tração (b)
Fonte: Adaptado Chi *et al*. (2017, p. 25)

Nos diagramas, pode-se notar que há uma mudança de valor no módulo de elasticidade no regime plástico, este valor é denominado de módulo de elasticidade danificado (ou efetivo) ($\bar{E}$), como na equação 1.

$$\bar{E} = (1-d).E_0;\ d = 1 - \left(\frac{\bar{E}}{E_0}\right) \tag{1}$$

As equações 2 e 3 apresentam a função do estado de tensões em função da elasticidade inicial, dos tensores de deformação e dos danos na compressão (d_c) e tração (d_t),

$$\sigma_t = (1-d_t)E_0\left(\varepsilon - \varepsilon^{pl}\right);\ \bar{\sigma}_t = E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \tag{2}$$

$$\sigma_c = (1-d_c)E_0\left(\varepsilon - \varepsilon^{pl}\right);\ \bar{\sigma}_c = E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \tag{3}$$

Em que:

- $\bar{\sigma}_t$ e $\bar{\sigma}_c$ = Valores de tensão efetiva de tração e compressão, respectivamente;
- d_t e d_c = Valores de dano na tração e compressão, respectivamente;
- ε e ε^{pl} = Deformação e deformação plástica na tração ($\varepsilon_t, \varepsilon_t^{pl}$) e compressão ($\varepsilon_c, \varepsilon_c^{pl}$);
- E_0 = Módulo de elasticidade inicial, elástico ou não danificado.

1.1.2 Aço

Em aplicações gerais de Engenharia, normalmente adota-se um diagrama elasto-plástico perfeito, idêntico na tração e compressão, conforme a Figura 2. Este modelo, segundo a literatura, apresenta resultados aceitáveis na modelagem de elementos no concreto armado.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

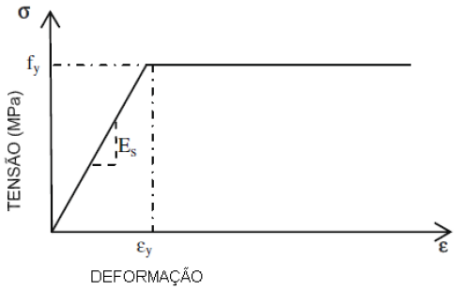


Figura 2 - Curva tensão x deformação elasto-plástico perfeito
Fonte: Adaptado de Obaidat, Heyden e Dahlblom (2010, p. 51)

1.1.3 PRFC

Segundo Kezmane, Boukais e Hamizi (2016), os compósitos de FRP são anisotrópicos, isto significa que suas propriedades não são as mesmas em todas as direções. Os eixos coordenados 1, 2 e 3 se referem às coordenadas principais do material, no qual 1 representa a direção das fibras (eixo x) e 2 e 3 (y e z, respectivamente) perpendiculares a 1. Caracteriza-se então como um material ortotrópico. Neste caso, as propriedades do material nas direções 2 e 3 são as mesmas ($E_{22} = E_{33}, \nu_{23} = \nu_{32}$), o que é caracterizado no ABAQUS como transversalmente isotrópico, definido pela função *Lamina*.

Os módulos de cisalhamento G_{13} e G_{23} também serão incluídos, pois podem ser necessários para modelar a deformação de cisalhamento transversal no elemento *Shell*. Estes dados podem ser encontrados usando a Lei de mistura definida por Piggott (2002) e Barbero (2013).

1.1.4 Interface coesiva

A simulação da descoesão é geralmente dividida entre descolamento inicial e a sua propagação. A partir do ponto de tensão máxima ocorre o início da danificação do material caracterizado por um decréscimo do módulo de elasticidade (Figura 3) (CAMANHO; DÁVILA, 2002). A interação na interface coesiva é então definida como *traction separation law*.

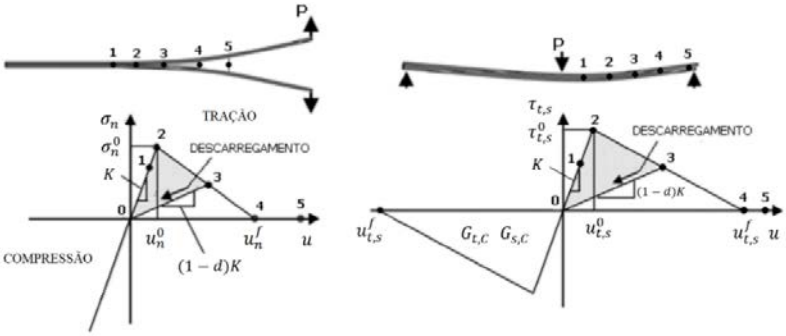


Figura 3 - Leis constitutivas para os modos puros I (a) e II ou III (b)
Fonte: Adaptado de Camanho e Dávila (2002, p. 07).

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

A análise da descolagem inicial tem como base as tensões e critérios de uso, como a interação quadrática das tensões interlaminares. Logo, o início do dano pode ser previsto por um critério de falha quadrático, expresso pela equação 4 (SAMWAYS, 2013; CAMANHO; DÁVILA, 2002; COELHO, 2016).

$$\left(\frac{\langle\sigma_n\rangle}{\sigma_n^0}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{sn}}{\tau_{sn}^0}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{tn}}{\tau_{tn}^0}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

Em que:

- σ_n, τ_{sn}, τ_{tn} são as tensões no elemento antes do início do dano nos modos I, II e III, respectivamente (MPa);
- σ_n^0, τ_{sn}^0, τ_{tn}^0 são as tensões iniciais de dano nos modos I, II e III, respectivamente (MPa).

Referente ao modo misto, a lei de separação pode ser caracterizada como uma combinação bi-linear dos modos individuais I (eixo y-z) e II/III (eixo x-z). Com a finalidade de explicar com precisão a variação da energia dissipada devido à falha/colapso no modo misto como função da razão da taxa de liberação de energia pela taxa total de liberação de energia, Benzeggagh e Kenane (1996) estabeleceram um critério denominado critério de fratura BK ou *BK fracture criterion*. Este critério é expresso em função da energia à fratura no Modo I e II, descrito como,

$$G_C = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC})\left(\frac{G_{II}}{G_T}\right)^{\eta} \quad (5)$$

Em que:

- η = Obtido de testes experimentais MMB (*Mixed Mode Bending*) e permite uma adaptação da curva obtida experimentalmente (adimensional);
- G_i = Energia de fratura (mJ) nos modos I, II ou III;
- G_T = Energia de fratura total (mJ) ($G_T = G_I + G_{II}$).

A tensão máxima de cisalhamento pode ser estimada pela expressão de Ye, Lu e Chen (2005), disposta a seguir:

$$\beta_w = \sqrt{\frac{\left(2{,}25 - \frac{w_f}{s_f}\right)}{\left(1{,}25 + \frac{w_f}{s_f}\right)}};\ \tau_{max} = 1{,}2\beta_w f_{ct} \quad (6)$$

Em que:

- f_{ct} = Resistência do concreto a tração (MPa);
- w_f = Espessura do laminado de PRFC (mm);
- s_f = Espaçamento entre as lâminas.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

Com a utilização das expressões para o caso em questão, encontra-se o valor de 3,06 MPa. Segundo Obaidat, Heyden e Dahlblom (2010) este valor é muito alto para prever a descolagem do material e, portanto, recomendam 1,5 MPa.

1.2 Objeto do estudo

Os experimentos realizados por Obaidat, Heyden e Dahlblom (2010) tiveram a finalidade de estudar a falha ao cisalhamento do sistema estrutural. Foram ensaiados testes de quatros pontos com a viga de controle com quase nenhum estribo. Após os testes experimentais realizados pelos autores, o elemento estrutural foi reforçado ao cisalhamento com PRFC em "U". Estes variaram o comprimento e orientação do reforço e mantiveram o sistema de aplicação de carga de quatro pontos. A geometria das vigas é mostrada na Figura 4.

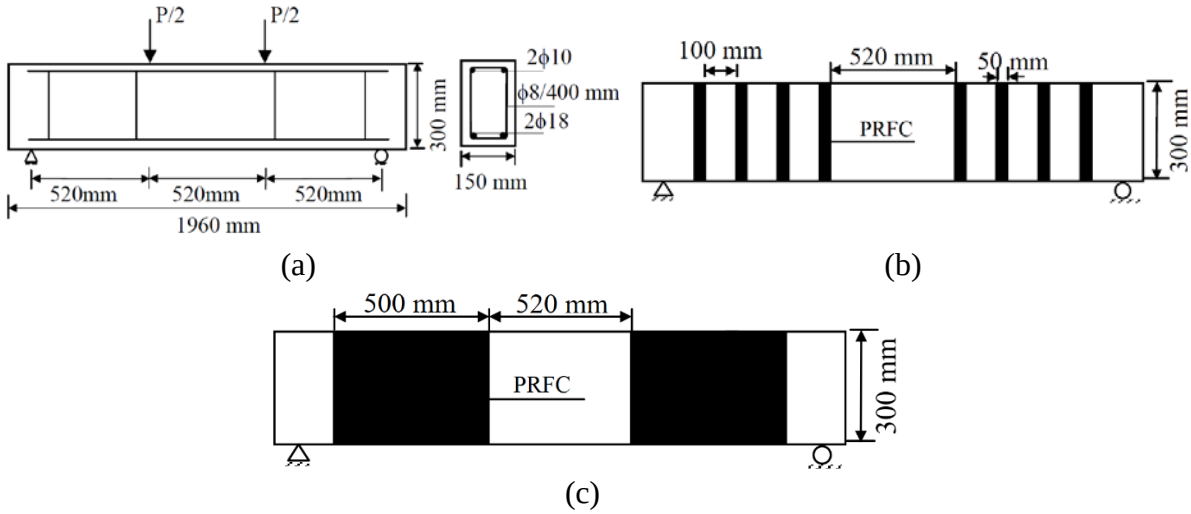


Figura 4 - Geometria e condições de contorno da viga referência (a), reforçada com faixas (b) e reforçada com cobrimento lateral (c).
Fonte: Adaptado de Obaidat, Dahlblom e Heiden (2010, p. 50)

Segundo Obaidat, Heyden e Dahlblom (2010), os reforços de PRFC foram assumidos com comportamento ortotrópico elástico linear. O módulo de elasticidade da fibra fornecido pelo fabricante é de 165 GPa, os módulos de elasticidade da matriz e da fibra são 2,5 GPa e 219 GPa, respectivamente, com uma porcentagem de volume da fibra de 75%. No entanto, por se tratar de um material ortotrópico, este valor é identificado como E_{11}. Dessa forma, por meio das equações de Piggot (2002), os demais valores puderam ser calculados e inseridos no ABAQUS. As propriedades dos materiais obtidas pelos autores são apresentadas na Tabela 1.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

Tabela 1 - Propriedades dos materiais usadas nas simulações numéricas

Concreto			
Resistência à compressão (MPa)	30		
Resistência à tração (MPa) *	1,81		
Módulo de elasticidade (GPa) *	25,74		
Poisson	0,2		
Aço	Ø18	Ø10	Ø8
Módulo de elasticidade (GPa)	209	211	210
Tensão de escoamento (MPa)	512	520	507
Tensão última (MPa)	739	741	-
Deformação última	0,151	0,151	-
Poisson	0,3	0,3	0,3
Polímero Reforçado com Fibra de Carbono			
Módulo de elasticidade (GPa)	$E_{11} = 165$	$E_{22} = E_{33} = 9{,}65$	
Módulo de elasticidade transversal (GPa)	$G_{23} = 3{,}40$	$G_{12} = G_{13} = 5{,}20$	
Coeficiente de Poisson	$\nu_{23} = 0{,}45$	$\nu_{12} = \nu_{13} = 0{,}30$	
Adesivo (Elemento coesivo)			
Tensão no modo I (MPa)	1,81		
Tensão no modo II e III (MPa)	1,50		
Energia de fratura no modo I (mJ/mm²)	0,09		
Energia de fratura nos modos II e III (mJ/mm²)	0,9		
Expoente η	1,45		

*Calculado conforme a norma americana ACI 318 (2014) ($f_t = 0{,}33\sqrt{f_{ck}}$) ($E = 4{,}7\sqrt{f_{ck}}$)
Fonte: Autores (2019)

1.3 Análises numéricas

O computador utilizado para as análises possui 8GB de memória (RAM) e um processador Core (TM) i5-7300HQ CPU de 2,50 GHz. Pela viga apresentar dupla simetria, foi simulada apenas um quarto da amostra (Figura 5), com a finalidade de diminuir o esforço computacional.

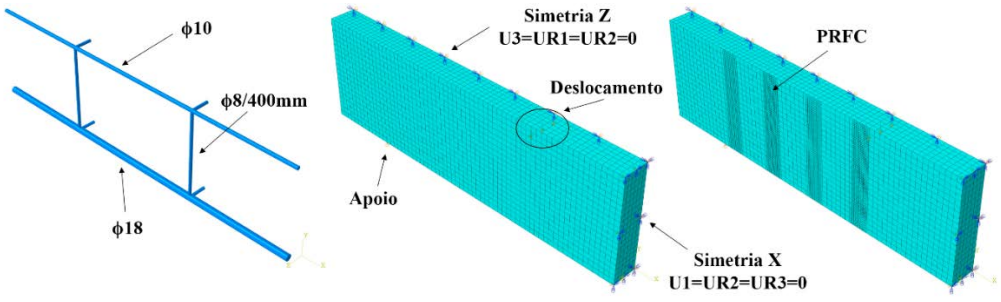


Figura 5 - Um quarto da viga modelada
Fonte: Autores (2019)

Para que seja possível observar o comportamento pós-pico no diagrama carga x deslocamento, aplicou-se deslocamento na região de aplicação de carga. A discretização das vigas em concreto foi modelada com o elemento C3D8R (interpolação linear). O elemento

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

sólido quadrangular é um elemento contínuo (C), tridimensional (3D), com oito nós (8) e com integração reduzida (R). Adotou-se a integração reduzida ("R") pois a integração completa é responsável por um aumento no tempo de análise, além da integração reduzida obter resultados com maior velocidade e com boa qualidade. O elemento apresenta 3 graus de liberdade de translação em cada nó. Os elementos utilizados para avaliar as armações em aço, tanto as barras longitudinais quanto as transversais, foram do tipo *Truss*. Neste caso, o elemento é denominado por T3D2 com 2 nós, apresentando 3 graus de liberdade por nó, translações em x, y e z. Este elemento é aplicado em sistemas que transmite forças axiais.

Os compósitos de fibra de carbono foram simulados com elementos de casca tipo *Shell* ("S"). O elemento adotado foi o S4R, quadrangular com 4 nós de integração reduzida, que possui 6 graus de liberdade em cada nó, três translações em x, y e z e três rotações nos eixos.

Para representar o efeito do comportamento da ligação entre o concreto e o PRFC, duas combinações de modelo de ligação foram analisadas: ligação perfeita entre os materiais com a função *Tie* disponível no ABAQUS e a aplicação de elementos coesivos na interface, com a finalidade de se estimar o descolamento entre os substratos. Elementos coesivos 3D de 8 nós foram utilizados para modelar a camada de interface, nomeado na biblioteca do ABAQUS como COH3D8. A ligação entre o reforço e o elemento coesivo foi modelada com perfeita adesão (*Tie*), assim como o concreto e o mesmo elemento, de tal forma que a transferência de tensões no sistema concreto/PRFC ocorra pelo elemento coesivo, como na Figura 6.

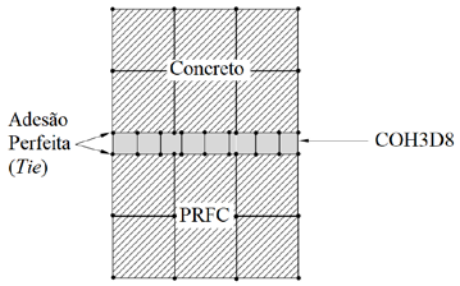


Figura 6 - Sistema de Interface do reforço com elemento coesivo
Fonte: Adaptado de *Abaqus User´s Guide* (2014, p. 829)

Por fim, na falta de dados experimentais os diagramas tensão x deformação na compressão e tração do concreto foram estimados conforme Guo (2014). Seus respectivos valores de dano foram estimados pelas equações do CDP apresentadas anteriormente. Os parâmetros do CDP adotados para a simulação foram de 38° para o ângulo de dilatação, 0,1 para a excentricidade, f_{bo}/f_{co} igual a 1,16, K_c igual a 0,667 e viscosidade igual a 0,006.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

3 Resultados e discussões

Observa-se com os resultados numéricos da viga referência (VR-S) que houveram boa concordância com os resultados experimentais (Figura 7). Os fatores que determinaram as calibrações foram a malha da armadura, malha do concreto e o valor da viscosidade μ. À medida que se reduzia a malha e a viscosidade, os resultados se aproximavam do real, no entanto a simulação requeria um maior tempo de processamento.

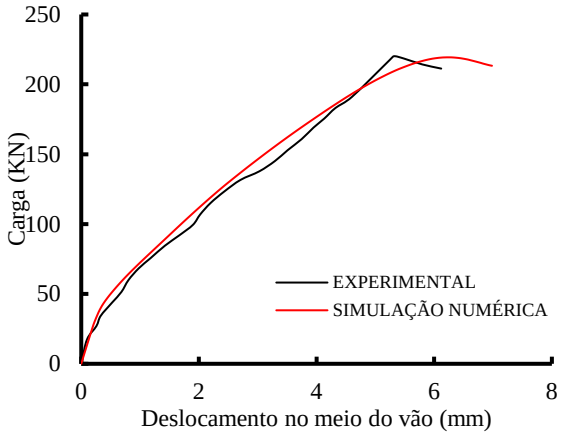
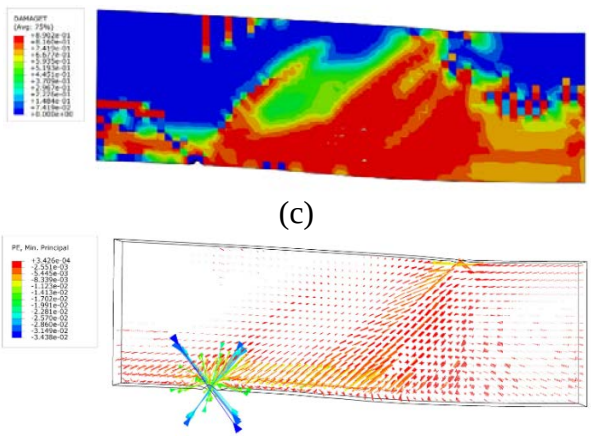


Figura 7 - Diagrama carga x deslocamento da viga referência
Fonte: Autores (2019)

O resultado considerado satisfatório foi com uma malha de 15 mm (7800 elementos), com uma carga última de 219,32 kN. A carga última obtida pelos autores foi de 220,00 kN, o que proporcionou um erro relativo de 0,36%. A malha da armadura longitudinal foi de 10 mm (98 elementos) e a da transversal foi de 5 mm (70 elementos).

A Figura 8 apresenta as tensões na armação. A barra longitudinal no banzo inferior atingiu uma tensão máxima de 437,5 MPa e, desse modo, não atingiu a tensão de escoamento de 512 MPa fornecido ao programa. Conclui-se então que a viga colapsou antes com uma fissura de cisalhamento diagonal.

(a)



(c)

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

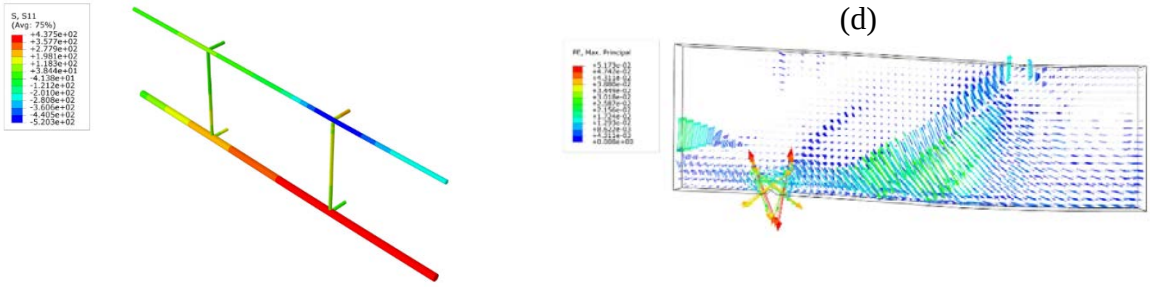


Figura 8 – Falha da viga referência (a), tensões na armadura (b), dano a tração da viga referência numérica (c) e deformação plástica de compressão (d) e tração (e)
Fonte: Autores (2019)

Após os resultados da viga referência, as mesmas foram reforçadas e então simuladas novamente. A princípio, obteve-se os resultados da viga reforçada com perfeita adesão na interface. Estas foram denominadas de viga VU-S(PA). A carga última foi de 253,86 kN e proporcionou um aumento de 34,58 kN de carga aplicada, equivalente a um acréscimo de 15,75 %. No entanto, nota-se pela Figura 9 que a viga reforçada continuou a se deslocar sem apresentar o patamar de descarregamento. Isto é característico da perfeita adesão na interface, pois enquanto experimentalmente houve a falha por descolamento da interface, o teste numérico não identifica este tipo de falha e continuou a se deslocar até que existisse o rompimento da viga ou do PRFC.

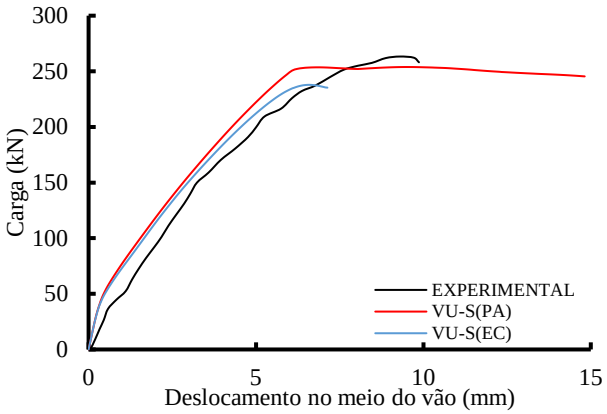


Figura 9 - Diagrama carga x deslocamento da viga reforçada com perfeita adesão (VU-S(PA)) e elemento coesivo (VU-S(EC))
Fonte: Autores (2019)

Nota-se com os resultados numéricos que o PRFC contribuiu para apresentar maiores deformações no concreto e no aço. A representação numérica das grandes concentrações de tensão no PRFC interseccionada pela da diagonal de cisalhamento é dada pela Figura 10 (b). Referente ao aço (Figura 10 (c)), obteve uma tensão de tração de 521,50 MPa, acima da tensão de escoamento e muito maior que a observada na viga sem reforço. Assim, a viga reforçada

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

pode atingir maiores patamares de resistência para que o aço seja solicitado ao máximo, melhorando o desempenho da estrutura.

O dano no elemento coesivo, neste caso, o epóxi, é exibido na Figura 10 (d). Repara-se que o maior dano no material coesivo se concentra principalmente na região da aplicação da carga e na região adesiva ao lado, assim como no ensaio experimental de Obaidat, Heyden e Dahlblom (2010).

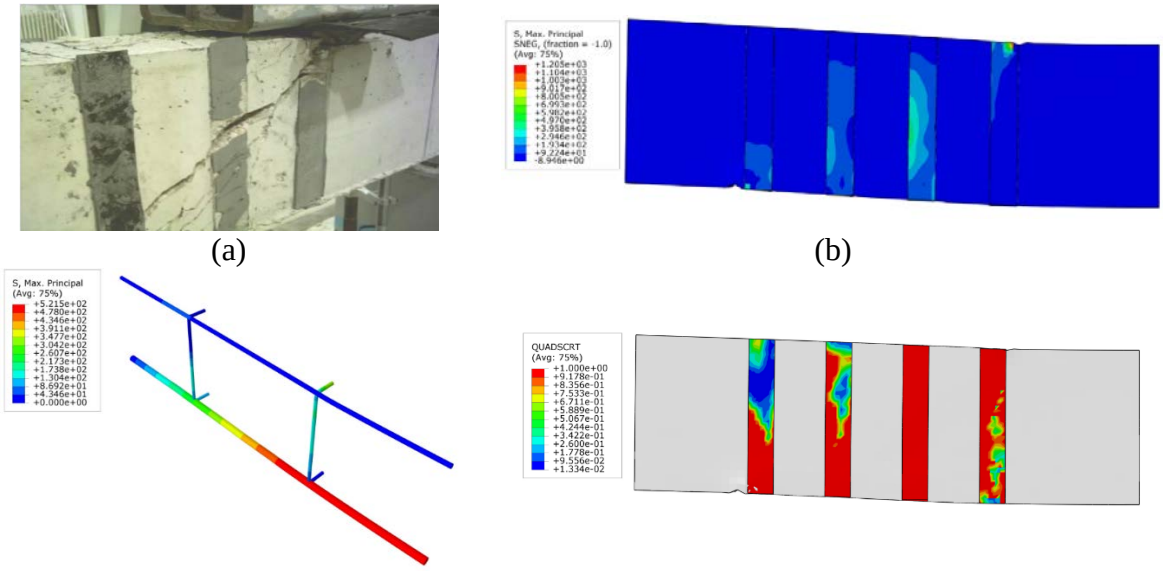


Figura 10 – Viga experimental reforçada (a), tensões no PRFC (b) e no aço (c) da viga VU-U(PA), regiões danificadas no adesivo da viga VT-S(EC) (d)
Fonte: Autores (2019)

Foram realizadas novas simulações de vigas reforçadas, desta vez com reforço sem espaçamento entre os laminados de PRFC, como na Figura 4 (c). Estas foram denominadas de VT-S(PA) e VT-S(EC), viga reforçada com perfeita adesão e com elemento coesivo, respectivamente. O resultado gráfico é apresentado na Figura 11.

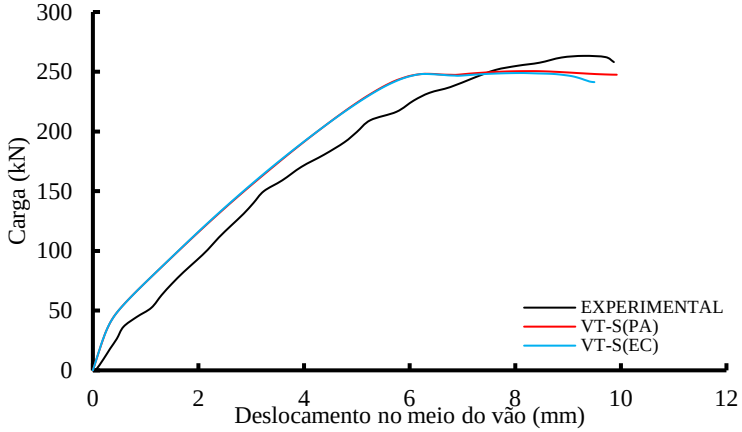


Figura 11 - Diagrama carga x deslocamento da viga reforçada com perfeita adesão (VT-S(PA)) e elemento coesivo (VT-S(EC))
Fonte: Autores (2019)

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

Para ambas as vigas simuladas, os resultados gráficos foram semelhantes. Isto ocorreu, pois, um reforço com grande área de adesão dificulta o seu descolamento, mesmo com a simulação do adesivo químico. Assim como a simulação com perfeita adesão, ao qual também não é possível observar a descolagem.

Em resultados gráficos, a Figura 12 representa os danos no adesivo. Note que comparado com as vigas VU, as vigas VT apresentam menos regiões de danificação. Esta situação caracteriza uma melhor ancoragem do material de reforço.

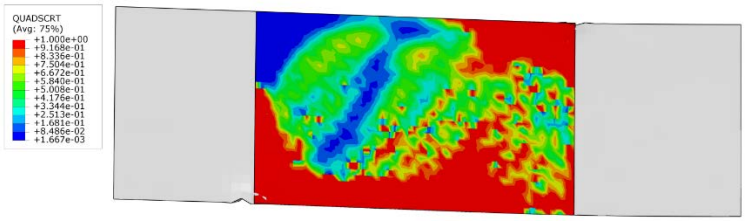


Figura 12 - Regiões danificadas no elemento coesivo (Adesivo) com reforço lateral
Fonte: Autores (2019)

4 Conclusões

A proposta deste trabalho objetiva identificar os principais parâmetros que controlam o comportamento estrutural do reforço ao cisalhamento em vigas retangulares em concreto armado com o uso de regiões coesivas para simular a descolagem. Para isso, modelagens numéricas por meio do *software* ABAQUS foram realizadas. Os resultados foram comparados com estudos experimentais de Obaidat, Heyden e Dahlblom (2010), além de outras análises numéricas. O problema se mostrou bem abrangente, pois aborda diversos assuntos como mecânica do dano, modelos constitutivos, teoria da plasticidade, reforço ao cisalhamento e flexão e diversas modelagens.

As maiores conclusões tiradas do estudo realizado são:

1) A modelagem utilizada neste estudo foi considerada adequada em avaliar as tensões e a plasticidade de ambas as situações (viga reforçada e não reforçada). Isso demonstra que os métodos adotados são confiáveis e podem auxiliar em simulações futuras de vigas armadas reforçadas com PRFC ao cisalhamento com elementos coesivos;
2) O uso do material PRFC, colado externamente como elemento de reforço à cortante, permitiu grandes aumentos na capacidade de carga de vigas armadas. No entanto, colapsos frágeis e regiões danificadas do adesivo ainda podem ser observados, o que pode levar a colapsos frágeis do sistema;

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

3) Para a comparação nos métodos de reforço, os resultados foram o esperado. Ao aumentar a área de contato do PRFC com a o concreto por meio do adesivo, sua ancoragem tende a melhorar. Isto pode ser observado quando o gráfico carga x deslocamento se aproxima de ambas as situações: com perfeita adesão e elemento coesivo. Note que o sistema aumenta o seu deslocamento até que haja outro modo de falha, provavelmente por colapso do concreto.

Assim, com os estudos necessários, este trabalho implicará em situações de estruturas mais seguras, como evitar o colapso repentino da mesma.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI 440.2R-08. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**. Farmington Hills, MI, USA, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI 318-14. **Building Code Requirements for Structural Concrete**. Farmington Hills, MI, USA, 2014.

BARBERO, E. J. **Finite element analysis of composite materials using Abaqus (2013)**. 2 ed. New York: CRC Press, 2013.

BENZEGGAGH, M.L.; KENANE, M. Measurement of Mixed-mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional glass/epoxy Composites with Mixed-mode Bending Apparatus. **Composites Science and Technology**, v. 56, p. 439-449, 1996.

CAMANHO, P. P.; DÁVILA, C. G. Mixed-Mode Decohesion Finite Elements for the Simulation of Delamination in Composite Materials. **Nasa/Tm-2002-211737**, p. 42, 2002.

CHI, Y.; YU, M.; HUANG, L.; XU, L. Finite element modeling of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete using modified concrete damaged plasticity. **Engineering Structures**, v. 148, p. 23–35, 2017.

COELHO, A. M. G. Finite Element Guidelines for Simulation of Delamination Dominated Failures in Composite Materials Validated by Case Studies. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 23, n. 2, p. 363–388, 2016.

COLALILLO, M. A.; SHEIKH, S. A. Behavior of shear-critical reinforced concrete beams strengthened with fiber-reinforced polymer-Experimentation. **ACI Structural Journal**, v. 111, n. 6, p. 1373–1384, 2014.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51130

DEMIN, W.; FUKANG, H. Investigation for plastic damage constitutive models of the concrete material. **Procedia Engineering**, v. 210, p. 71–78, 2017.

GUO, Z. **Principles of reinforced concrete**. Pequim: Butterworth-Heinemann, 2014.

KEZMANE, A.; BOUKAIS, S.; HAMIZI, M. Numerical simulation of squat reinforced concrete wall strengthened by FRP composite material. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 10, n. 4, p. 445–455, 2016.

LEE, J.; FENVES, G. L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 124, n. 8, p. 892–900, 1998.

LUBLINER, J.; OLIVER, J.; OLLER, S.; OÑATE, E. A plastic-damage model for concrete. **International Journal of Solids and Structures**, v. 25, n. 3, p. 299–326, 1989.

MACHADO, A. P.; MACHADO, B. A. **Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP: Teoria e prática**. São Paulo: PINI, 2015.

OBAIDAT, Y. T.; HEYDEN, S.; DAHLBLOM, O. Nonlinear FE modelling of shear behaviour in RC beam retrofitted with CFRP. **Computational Modelling of Concrete Structures**, v. 17, n. 5, p. 671–677, 2010.

PIGGOT, M. **Load Bearing Fibre Composites**. 2 ed. Toronto: Kluwer Academic Publishers, 2002.

PANIGRAHI, A. K.; BISWAL, K. C.; BARIK, M. R. Strengthening of shear deficient RC T-beams with externally bonded GFRP sheets. **Construction and Building Materials**, v. 57, p. 81–91, 2014.

SAMWAYS, M. C. **Análise numérica de juntas adesivadas pelo Método dos Elementos Finitos considerando o início e a evolução do dano.** Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba. p. 165, 2013.

SIMULIA ABAQUS. **ABAQUS 6.14: Analysis User's Guide**. Vol. 1, 2, 3, 4 e 5. Dassault Systèmes Simulia Corp, Providence, RI, USA, 2014.

YE, L. P.; LU, X. Z.; CHEN, J. F. Design proposals for the debonding strengths of FRP strengthened RC beams in the Chinese design code. **Proceedings of International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures**, January, p. 45–54, 2005.

YU, F.; GUO, S.; WANG, S.; FANG, Y. Experimental study on high pre-cracked RC beams shear-strengthened with CFRP strips. **Composite Structures**, v. 225, May, p. 111163, 2019.