



Análise numérica de vigas de concreto armado, reforçadas à flexão com CFRP aplicado segundo a técnica EBR, com consideração de Modelo de Zona Coesiva

Numerical analysis of reinforced concrete beams flexurally reinforced with EBR CFRP considering the Cohesive Zone Model

Luiza Campos Coelho (1); Marcelo Fernandes Pereira (1); Matheus Henrique Morato de Moraes (1); Jailto Antonio Prado da Silva (2); Gláucia Maria Dalfré (3); André Luis Christoforo (3)

(1) Mestrando(a), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGE Civ, UFSCar.

(2) Doutor em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Aeronáutica, EESC/USP.

(3) Professor(a) Dr. (a), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGE Civ, UFSCar. matheus.h.h@hotmail.com

Resumo

O uso de Polímeros Reforçados com Fibras (*Fiber Reinforced Polymers*, FRP, em língua inglesa) na construção civil vem crescendo consideravelmente nos últimos anos, principalmente para o reforço de elementos estruturais de concreto armado. Entre os tipos de aplicação de FRP em estruturas de concreto armado se destaca a técnica de reforço *Externally Bonded Reinforcement* (EBR), a qual é baseada na colagem de mantas, tecidos ou laminados de fibras ao substrato de concreto com o uso de resinas epoxídicas. Neste âmbito, este trabalho apresenta uma avaliação numérica do comportamento de vigas não reforçadas (referência) e reforçadas segundo a referida técnica. Para tanto, a campanha experimental realizada por Ferreira (2019) foi simulada com o uso do *software* Abaqus®. Os resultados obtidos indicam que a análise numérica se mostrou efetiva quando comparada aos resultados experimentais, possibilitando prever o comportamento do elemento estrutural e também simular a falha do sistema de reforço utilizando modelos coesivos.

Palavras-chave: Externally Bonded Reinforcement (EBR). Viga. Técnica de reforço. Simulação numérica. Modelo de Zona Coesiva.

Abstract

The use of Fiber Reinforced Polymers (FRP) in civil construction has grown considerably in recent years, mainly for the strengthening of structural elements of reinforced concrete. Among the types of FRP application in reinforced concrete structures, the Externally Bonded Reinforcement (EBR) technique stands out, which is based on bonding sheets, fabrics, or laminates to the concrete substrate using epoxy resins. In this context, this work presents the numerical evaluation of the behavior of unstrengthened (reference) and strengthened beams according to the mentioned technique. Thus, the experimental campaign carried out by Ferreira (2019) was simulated using the Abaqus® software. The results obtained indicate that the numerical analysis proved to be effective when compared to the experimental results, making it possible to predict the behavior of the structural element and also to simulate the failure of the strengthening system using cohesive models.

Keywords: Externally Bonded Reinforcement (EBR). Beam. Strengthening technique. Numerical simulation. Cohesive Zone Model.



1. Introdução

As estruturas em concreto armado podem sofrer redução da sua capacidade resistente por diversos motivos, seja devido a falhas nas fases de projeto e/ou execução, como também ausência ou inadequada manutenção/utilização durante sua vida útil e ação de mecanismos de deterioração, requerendo reparos e/ou recuperações estruturais. Além disso, os elementos estruturais também podem necessitar de incrementos de capacidade de carga, os quais podem ser obtidos por meio de aplicação de sistemas de reforço estrutural.

Atualmente, para se efetuar um reforço em um elemento de concreto armado são comumente utilizados sistemas baseados na colagem externa de mantas, tecidos ou laminados pré-fabricados de *Fiber Reinforced Polymers* (FRPs).

Comparada com outras técnicas de reforço estrutural, como aumento de seção ou colagem de chapas metálicas, a colagem externa de FRPs proporciona a vantagem de interferir de forma mínima na arquitetura e geometria do elemento estrutural, devido à sua espessura. Além disso, o FRP possui elevada resistência à corrosão (ELGHAZY *et al.*, 2018), baixo acréscimo de massa, fácil aplicação e bom comportamento à fadiga, podendo promover grandes acréscimos de resistência à flexão (YANG; JOHANSSON; *et al.*, 2021) e ao cisalhamento (PEREIRA *et al.*, 2021). Ainda, os FRPs podem ser utilizados em soluções de manifestações patológicas relacionadas a fissuração (AL-ZAID *et al.*, 2014) e perda de seção de armaduras de um elemento estrutural, atuando como complemento da área armadura perdida. Vale destacar que, comparando-se o comportamento mecânico dos FRPs com o do aço, a grande desvantagem do FRP é seu comportamento frágil (KABIR; ESHAGHIAN, 2010).

Em estruturas existentes, o FRP pode ser aplicado como reforço estrutural segundo as técnicas *Externally Bonded Reinforcement* (EBR), *Near Surface Mounted* (NSM), *Textile Reinforced Concrete or Mortar* (TRC/TRM) e *Embedded Through-Section* (ETS). Em relação à técnica EBR, existem diferentes subsistemas de reforço, podendo serem classificados de acordo com o material constituinte ou pela forma de aplicação. A variação da aplicação da referida técnica depende da escolha do profissional, dos recursos disponíveis e limitações arquitetônicas, avaliando-se as vantagens e desvantagens relativas às necessidades.

No geral, a técnica EBR se destaca pela facilidade de aplicação e baixo custo, entretanto, sua desvantagem encontra-se no modo de ruptura face ao destacamento do reforço de FRP do substrato reforçado (HAMRAT *et al.*, 2020). Ainda, em algumas situações, por se tratar de colagem externa, o sistema de reforço poderá requerer sistema de proteção contra raios ultravioleta, ação do fogo, umidade e possíveis atos de vandalismo (DALFRÉ, 2022). Tendo em vista o crescimento do uso de FRPs em sistema de reforço estrutural na indústria da construção civil, faz-se necessário estudar e avaliar seus diferentes tipos de materiais, sistemas e comportamento estrutural. Isto posto, o presente trabalho tem como intuito analisar numericamente o sistema de reforço pela técnica EBR, a partir do programa experimental realizado por Ferreira (2019), utilizando o *software* Abaqus®(2014).



2. Revisão Bibliográfica

Para avaliar o reforço estrutural de FRPs aplicados com o uso da técnica EBR em vigas de concreto armado é necessário conhecer de forma adequada seu comportamento estrutural. Logo, esta seção apresenta uma revisão bibliográfica, apresentando e discutindo estudos que avaliaram, de forma experimental ou numérica, o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com FRPs, segundo a técnica EBR.

2.1. Interação entre material de reforço e o concreto armado

O material de reforço, o concreto e o aço possuem propriedades mecânicas diferentes, tais como a resistência à tração, o módulo de elasticidade, a deformação, dentre outras. Note-se que o FRP apresenta comportamento elástico linear até sua ruptura, enquanto as armaduras longitudinais e transversais apresentam comportamento elástico-linear até o início de escoamento do aço, seguido por comportamento elastoplástico até sua ruptura. Portanto, o desempenho mecânico da estrutura reforçada depende diretamente da sinergia entre os distintos materiais constituintes (ZHELYAZOV, 2020). Assim, cita-se a necessidade de conhecer e garantir o equilíbrio entre as resistências do concreto, aço e FRP do elemento reforçado (ELGHAZY *et al.*, 2018, KOTYNIA; CHOLOSTIAKOW, 2015), a adequada aderência entre o FRP e o substrato de concreto (HAMRAT *et al.*, 2020, NIU; WU, 2005, SABZI *et al.*, 2020), as propriedades e resistência do adesivo estrutural utilizado (GRACE; SINGH, 2003), o preparo da superfície de colagem (SUNDARRAJA; RAJAMOHAN, 2008), o conhecimento do local de aplicação do material e a forma de ancoragem (BUYLE-BODIN; DAVID, 2004, KHAN, 2008), o domínio de dimensionamento do elemento estrutural (NIU; WU, 2005), dentre outras variáveis.

2.2. Comportamento mecânico de vigas quando submetidas à tração

Segundo Kabir e Eshaghian (2010), Khan (2008), Sen e Reddy (2014), Sundarraja e Rajamohan (2008), Yang *et al.* (2021), e Zhelyazov (2020), o reforço de estruturas de concreto armado, segundo a técnica EBR, é eficiente para se obter aumento da capacidade resistente de elementos submetidos à tração. Alguns fatores podem influenciar esse aumento, tais como o número de camadas de FRP (HAMRAT *et al.*, 2020, KABIR; ESHAGHIAN, 2010, MASHREI; MAKKI; SULTAN, 2019, SEN; REDDY, 2014, TOUTANJI; ZHAO; ZHANG, 2006), bem como combinações de configurações de sistemas de reforço à flexão e a força cortante (SUNDARRAJA; RAJAMOHAN, 2008).

2.3. Comportamento mecânico de vigas à flexão

O reforço com o uso de FRPs melhora o desempenho de vigas quando submetidas à flexão e, conseqüentemente, atua no controle de fissuração (AL-ZAID *et al.*, 2014, KHAN, 2008, KIM *et al.*, 2009, MOSTOFINEJAD; HOSSEINI; RAZAVI, 2016, SALEEM *et al.*, 2019, SEN; REDDY, 2014). Para proporcionar esse aumento é necessário dar especial atenção a quantidade de material aplicado, número de camadas (MOSTOFINEJAD; HOSSEINI; RAZAVI, 2016, SALEEM *et al.*, 2019, SEN; REDDY, 2014), área de armadura existente e tipo de ancoragem (YANG *et al.*, 2021).



2.4. Reforço à flexão em vigas de concreto armado danificadas

Os estudos desenvolvidos por Shardakov, Shestakov e Bykov (2016), Sundarjia e Rajamohan (2008) sobre colagem externa de FRP em vigas pré-carregadas, por Al-Zaid *et al.* (2014) e Benjeddou, Ouezdou e Bedday (2007) em vigas pré-danificadas e por Elghazy *et al.* (2018) e Pereira *et al.* (2021) em vigas com armaduras em processo de corrosão concluíram que FRPs possuem condições de proporcionar aumento de capacidade em vigas nas referidas situações, se mostrando eficiente como um método para o reparo de elementos de concreto armado.

3. Metodologia

A análise numérica foi realizada com base nos resultados obtidos no programa experimental realizado por Ferreira (2019), o qual avaliou vigas, reforçadas e não reforçadas, quando submetidas à ensaio de flexão de três pontos. Para isso, um *software* baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), o Abaqus®, foi utilizado. A seguir faz-se uma breve apresentação do programa experimental realizado e dos parâmetros utilizados na simulação numérica.

3.1. Experimento analisado

O programa experimental avaliou o comportamento de vigas de concreto armado não reforçadas e reforçadas com mantas de fibra de carbono (CFRP) aplicadas segundo a técnica EBR, quando submetidas à ensaio de flexão por três pontos. Algumas vigas foram mantidas em ambiente laboratorial (controle) e as demais expostas ao intemperismo. No presente trabalho, foram analisadas e simuladas somente as vigas de referência (sem reforço) ou reforçadas e mantidas no ambiente de controle.

Duas vigas de referência, designadas por V1/ V2_REF_0, possuem seção transversal de 12x20 cm², comprimento total de 250 cm, armaduras longitudinais compostas por aço CA-50 com diâmetros de 6,3 e 10 mm e estribos de aço CA-60, com diâmetro de 5 mm, espaçados a cada 10 cm. Sendo adotados cobrimentos de armaduras de 1,5 cm em todas as faces. Na Figura 1(a) são apresentadas as características iniciais das vigas não reforçadas, bem como o arranjo utilizado para o ensaio de flexão.

Duas vigas de referência reforçadas pela técnica EBR, designadas por V1/V2_REF_CFRP, possuem as mesmas características das vigas de referência, entretanto, foram reforçadas com o uso de mantas de fibra de carbono do tipo *C-Sheet 240*, com gramatura de 300 g/m² e espessura de 0,176 mm. O tecido foi cortado em tiras com largura de 11 cm e comprimento de 220 cm (Figura 1b). As mantas de fibra de carbono foram aplicadas nas vigas com o uso de resinas epoxídicas do tipo *primer* (Resina A) e de laminação (Resina B), conforme recomendações de preparação, aplicação e cura do fabricante do material de reforço. Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades dos materiais utilizados, os quais foram ensaiados à mesma idade das vigas (FERREIRA, 2019).

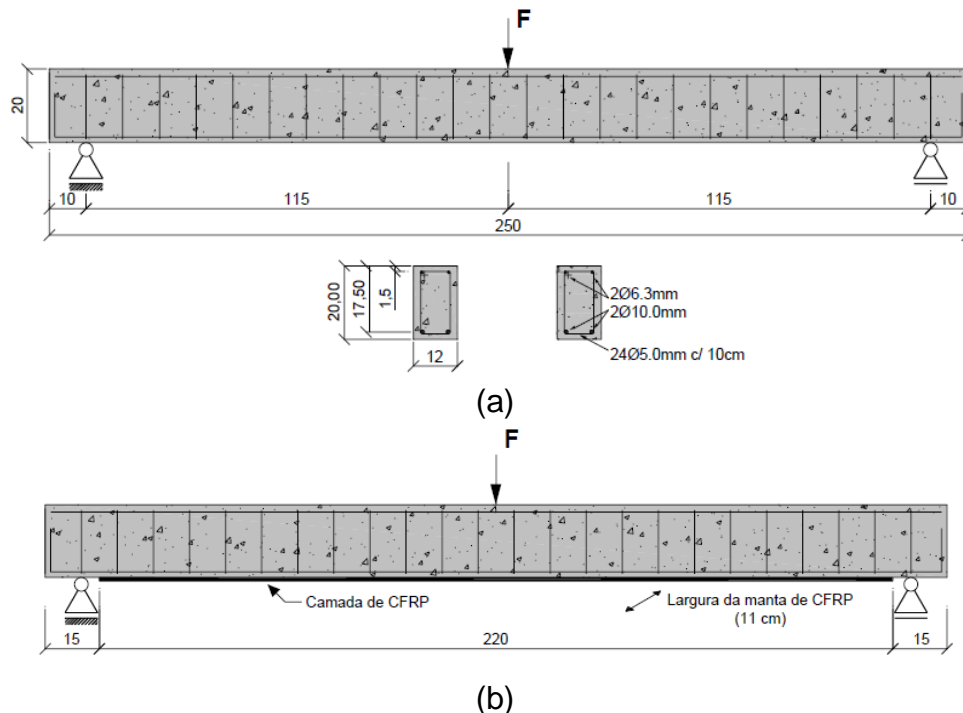


Figura 1- Dimensões, detalhamento das armaduras e condições do ensaio à flexão: (a) vigas V_REF_0, (b) vigas V_REF_CFRP (medidas em cm) (FERREIRA (2019)).

Tabela 1 - Propriedades médias dos materiais.

Material	Diâmetro (mm)	Resistência à compressão (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão última (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Concreto	-	28,5	-	-	31,6
Armadura	5	-	646,8	670,6	191,3
	10	-	547,4	662,6	196,9
Compósito CFRP	-	-	-	2672,0	243,8
Resina <i>primer</i> (Resina A)	-	-	-	42,5	2,3
Resina de laminação (Resina B)	-	-	-	46,7	2,6

Fonte: Ferreira (2019).

A Figura 2 apresenta os diagramas força *versus* deslocamento vertical registrado a meio vão obtidos por Ferreira (2019). De acordo com Ferreira (2019), as vigas de referência (sem reforço) apresentaram ruptura dúctil face a deformação acentuada da armadura, enquanto as vigas reforçadas apresentaram modo de ruptura frágil, com destacamento do material de reforço precedido de grande deformação e pequenos estalos.

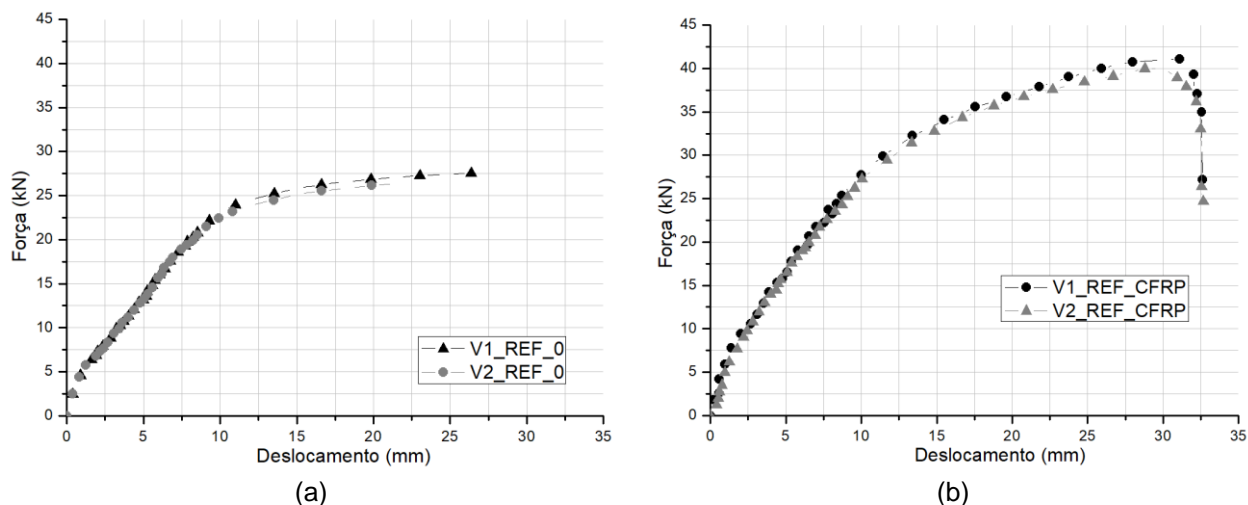


Figura 2 - Diagramas força *versus* deslocamento: (a) vigas V1/V2_REF_0 e (b) vigas V1/V2_REF_CFRP (FERREIRA (2019)).

3.2. Simulação numérica

Para a simulação numérica das vigas submetidas à ensaio de flexão de três pontos, ensaiadas por Ferreira (2019), utilizou-se o *software* comercial *Abaqus*[®], o qual é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). O referido *software* também foi utilizado nas pesquisas de Rezazadeh e Barros (2014) e Saleem *et al.* (2019), cujas pesquisas também analisaram vigas reforçadas com CFRP.

3.2.1. Elementos finitos utilizados

No presente estudo foram utilizados elementos bidimensionais. As armaduras longitudinais e transversais foram simuladas com o uso de elementos do tipo B12 (*wire*), o qual é descrito como elemento linear do tipo treliça formado por dois nós no plano. A viga de concreto e o CFRP, partes bidimensionais, foram modeladas com elementos do tipo CSP4R (*shell*), o qual é descrito como sendo representado no estado plano de tensões, bilinear, formado por 4 nós e com integração reduzida e *hourglass control*) (DASSAULT SYSTEMES, 2014). Buscando-se uma representação mais realista do comportamento do adesivo entre o reforço e a viga, foi adotado o modelo coesivo linear para representação da camada de resina epoxídica.

3.2.2 Condições de contorno e refinamento da malha

As armaduras foram vinculadas ao concreto com o uso da função *Embedded Region*, enquanto o reforço e a resina foram vinculados à viga com o uso da função *Tie*. Em relação ao refinamento da malha da região da viga de concreto, inicialmente, foram utilizados elementos finitos CSP4R com dimensões de 50 mm x 50 mm, totalizado uma quantidade de 200 elementos e 255 nós. Seguidamente, para a região do adesivo, tem-se elementos COH2D4 com dimensões de 0,1 mm x 50 mm, tendo-se ao total 44 elementos e 90 nós. Já

para as partes correspondentes as armaduras longitudinais, utilizou-se o elemento B12 com dimensão de 50 mm e para as armaduras transversais, fez-se o uso também do elemento B12 com 50 mm, totalizando 170 elementos e 196 nós. Para o CFRP fez o uso do mesmo elemento da viga de concreto, CSP4R, com dimensão de 0,176 mm x 50 mm, totalizando 44 elementos e 90 nós.

As condições de contorno aplicadas foram de restrições aos deslocamentos nos nós localizados na região inferior da viga, tal como ilustrado na Figura 3. Destaca-se que a não linearidade geométrica foi considerada na presente análise.

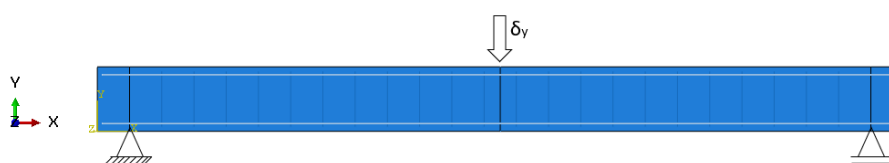


Figura 3 – Condições de contorno da simulação numérica.

3.2.3 Modelo constitutivo do concreto

Para representação do comportamento do concreto no Abaqus® utilizou-se o modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), que se refere a um modelo de dano associado a plasticidade. Para isso adotou-se uma curva analítica para representação do comportamento do concreto à compressão e à tração, com base no modelo proposto por Carreira e Chu (1985), que leva em consideração a resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação última. Com base nos resultados experimentais obtidos por Ferreira (2019), considerou-se resistência média à compressão do concreto como sendo 28,5 MPa, enquanto o módulo de elasticidade e deformação última foram definidas com base na norma ABNT NBR 6118 (2014), onde os valores de 25.091,13 MPa e 0,003 foram adotados, respectivamente. O coeficiente de Poisson foi definido como 0,2. A evolução do dano, tanto na compressão como na tração, foi representada pelo modelo proposto por Jankowiak e Łodygowski (2005), que considera que as tensões estão relacionadas à tensão efetiva por meio de um parâmetro de degradação escalar. Os parâmetros de plasticidade considerados no modelo CDP são o ângulo de dilatância (Ψ), excentricidade (ξ), relação entre as resistências à compressão biaxial e uniaxial do concreto (f_{b0}/f_{c0}), relação entre os segundos invariantes dos meridianos de tração e de compressão (K_c) e viscosidade (μ), os quais foram definidos como 36°, 0,1, 1,16, 0,667 e 0,0001, respectivamente.

3.2.4 Modelo constitutivo do aço

Para a simulação do comportamento das armaduras, tendo em vista os dados disponibilizados por Ferreira (2019), foi considerada a relação constitutiva proposta por Earls (1999), em especial, o modelo elastoplástico, o qual considera o efeito de encruamento do aço por meio de uma região tri-linear. Considerou-se um coeficiente de Poisson de 0,3 e as propriedades mecânicas obtidas experimentalmente, em seus valores mínimos de desvio padrão, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço

Diâmetro (mm)	Tensão de escoamento (MPa)	Deformação no escoamento (‰)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Tensão última (MPa)
5	620,67	2	177.545,53	646,32
10	535,74	2,8	193.788,98	653,32

Fonte: Ferreira (2019).

3.2.5 Modelos constitutivos do CFRP e resina epoxídica

O compósito de CFRP apresenta comportamento elástico-linear até a ruptura. Para isso, foram apenas indicados seu módulo de elasticidade (228,77 GPa) e coeficiente de Poisson (0,25) para simulação no Abaqus®.

Com relação ao adesivo epóxi, foi considerado um mecanismo coesivo entre o CFRP e o substrato de concreto para representar o processo de degradação mecânica do adesivo. Para modelar a região do adesivo, considerou-se a dimensões do elemento CSP4R de 0,10 mm x 50 mm, totalizando 44 elementos e 90 nós. Foi adotado o módulo de elasticidade de 2,6 GPa para a resina, conforme obtido experimentalmente por Ferreira (2019), e coeficiente de Poisson de 0,3.

O processo de degradação mecânica da ligação entre o reforço e a viga de concreto armado, o qual ocorre na ligação concreto-adesivo-CFRP, pode ser simulado via elementos finitos com o uso de modelos de zona coesiva, conhecidos na literatura internacional por *Cohesive Zone Model* (CZM). Esses modelos são regidos por uma lei matemática de tração-separação que descrevem o amolecimento (*softening*) da ligação entre duas superfícies que interagem entre si por meio de um mecanismo de adesão. De acordo com Dassault Systèmes (2014), as superfícies mais comuns são a do tipo triangular (conhecida como linear) e a exponencial, as quais são regidas por deslocamentos efetivos que ocorrem na interface adesivo-aderente. Em função do modo de sollicitação de fraturamento cuja área sobre a curva é a Taxa de Liberação de Energia Crítica ao Modo I (G_n^c) ou ao Modo II (G_s^c), onde estes parâmetros supracitados estão associados ao quanto o material resiste à fratura. Ou seja, possuem origem da Mecânica da Fratura (BROEK, 1984) onde, em função da orientação do carregamento aplicado, tem-se um modo de sollicitação à fratura. Entretanto, pode ocorrer o modo misto, onde pode-se ter combinações de carregamentos que simultaneamente ocorrem gerando um mecanismo de degradação mecânica com um certo grau de complexidade.

Para se estimar os valores das Taxas de Liberação de Energia Crítica a ser inserido no modelo de degradação mecânica da CZM, foi utilizada a mesma metodologia adotada por Michels *et. al.* (2014), que simulou o mecanismo de falha de descolamento de laminado protendidos de CFRP em vigas e concreto, onde G_n^c foi determinada pelo modelo proposto por Marti *et. al.* (1999), enquanto a G_s^c pelo modelo proposto por Czaderski-Forchmann (2012). Destaca-se que os referidos modelos levam em consideração as resistências características do concreto à compressão (f_{ck}) e tração (f_{tk}) e o diâmetro máximo (d_{max}) do agregado utilizado, aqui definido como sendo de 19 mm.

Partindo-se da relação constitutiva do adesivo, tem-se que a tensão (t) *versus* deformação (ε) e considerando-se que a parcela de degradação mecânica do CZM, conhecida como *softening* (com a notação D), pode-se escrever a Equação 1, onde t é o vetor de tensões, I é a matriz identidade, D é a matriz de dano correspondente ao *softening* da CZM, K é matriz de rigidez do material e \mathcal{E} é o vetor de deformações.

$$t(I - D)K\varepsilon \quad (\text{Equação 1})$$

Dessa forma, a Equação 1 pode ser decomposta nas seguintes parcelas, considerando-se o caso bidimensional (Equação 2).

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{sn} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} \quad (\text{Equação 2})$$

Com a presença da CZM, tem-se a Equação 3, onde t_n é a componente de tensão na direção normal à superfície de contato, t_s é a componente de tensão na direção tangencial à superfície de contato, D_n é a componente de dano na direção normal à superfície de contato, D_s é a componente de dano tangencial à superfície de contato, K_{nn} é a componente de rigidez normal e K_{ss} é componente de rigidez ligado a força cortante.

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D_n & 0 \\ 0 & D_s \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{sn} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} \quad (\text{Equação 3})$$

Segundo Campilho *et al.* (2013), para adesivos com pequenas espessuras, uma forma adequada é considerar $K_{nn} = E$ (módulo de elasticidade), $K_{ss} = G$ (módulo de cisalhamento) e $K_{ns} = K_{sn} = 0$ (componentes de rigidezes de cisalhamento de acoplamento nulas). Em sendo assim, no presente estudo, utilizou-se o modelo linear de lei tração-separação de *softening* proposto por Camanho e Dávila (2002), tal como o apresentado na Equação 4.

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{\max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\max} (\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (\text{Equação 4})$$

Da equação 4 tem que δ_m^0 é o deslocamento efetivo na iniciação do dano na região da adesão e $\delta_m^f = \frac{2G_{c,m}}{t_m^0}$ é o deslocamento efetivo que gera a falha, onde t_m^0 é a tensão efetiva na iniciação do dano e $G_{c,m}$ é a Taxa de liberação de Energia Crítica equivalente ao Modo Misto, δ_m^{\max} é o valor máximo de deslocamento efetivo atingido no histórico de carregamento.

Com a abordagem modo misto, considera-se que para o deslocamento efetivo ao modo misto δ_m (Equação 5) que sua componente na direção normal δ_n tem a notação $\langle * \rangle$, conhecido como operador de Macaulay, o qual considera para $\langle \delta_n \rangle$ valor igual a zero, se

δ_n for menor que zero, e δ_n caso seja maior ou igual a zero. Já a componente de deslocamento efetivo cisalhante δ_s é mantida inalterada.

$$\delta_m = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_s^2} \quad (\text{Equação 5})$$

Dessa forma, tem-se, como visualizado na Figura 4, a combinação dos modos I e II via lei tração-separação linear, a qual foi utilizada no presente estudo.

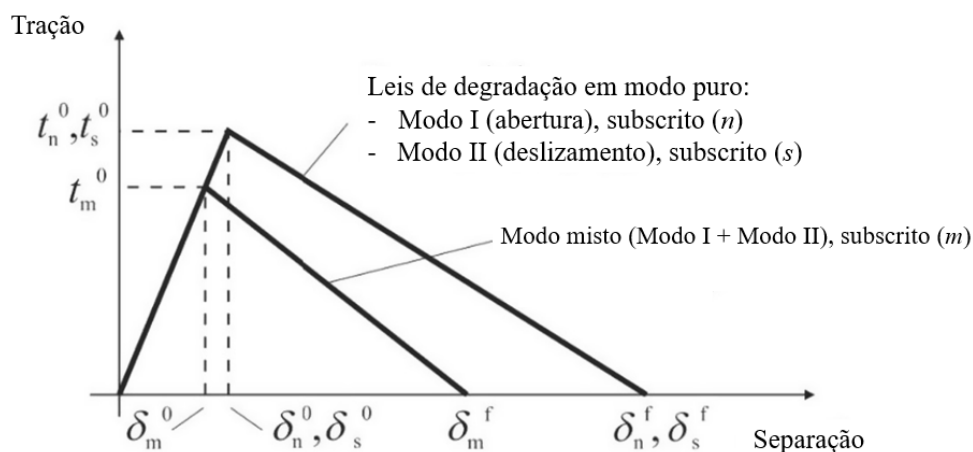


Figura 4 - Representação dos modos I, II e misto por meio da lei tração- separação linear (MACHADO *et al.* (2018)).

Dentro do contexto da simulação do processo de degradação mecânica do adesivo via CZM, faz-se o uso de um critério de inicialização de dano. Para isso, utilizou-se critério de tensões nominais quadráticas, do inglês *Quadratic Nominal Stress criterion* (QUADS), apresentado na Equação 6, o qual consiste em três componentes para o caso tridimensional e de duas componentes para o caso bidimensional e onde t_n é a componente de tensão normal a superfície da fissura, t_s é a componente de cisalhamento da fissura, t_n^0 e t_s^0 são os valores de tensões nominais normal e de cisalhamento de pico, respectivamente. Vale ressaltar que para que haja a inicialização da danificação, o critério QUADS deve alcançar valores maiores ou iguais a 1,0.

$$f = \left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 \quad (\text{Equação 6})$$

Já para se obter a evolução do dano (degradação mecânica da CZM) na presença do modo misto (I + II), fez-se o uso do modelo *Power Law* proposto por Wu e Reuter Jr. (1965), o qual considera que o expoente α é igual a 1, o que lhe confere uma forma linear, tal como o apresentado na Equação 7, onde G_n e G_s são valores de taxa de liberação de energia ao modo I e II, respectivamente, obtidos para cada incremento de carga durante a evolução dos carregamentos na região da CZM. Para o Modo II puro, foi considerado modo independente.

$$\left\{ \frac{G_n}{G_n^c} \right\}^\alpha + \left\{ \frac{G_s}{G_s^c} \right\}^\alpha = 1 \quad (\text{Equação 7})$$

4. Resultados da Análise Numérica

Nas Figuras 5 a 9 estão apresentados os resultados obtidos nas simulações numéricas realizadas, onde são apresentados os diagramas força *versus* deslocamento vertical, os quais também são comparados aos experimentalmente obtidos por Ferreira (2019).

4.1 Vigas de referência (sem reforço)

A Figura 5 apresenta o resultado obtido para a simulação das vigas sem reforço juntamente com o resultado experimental. Analisando-se os diagramas é possível observar que houve boa concordância entre a simulação e o experimento, as curvas apresentaram comportamentos bastante similares, sendo observados pontos com leves variações, principalmente logo após a fissuração do concreto e início do patamar de escoamento do aço. Conforme comparação entre diagramas força *versus* deslocamento, a simulação numérica conseguiu representar com uma boa aproximação o momento em que o concreto fissura, apresentando rigidez similar ao dos resultados experimentais, até atingir o patamar de escoamento das armaduras.

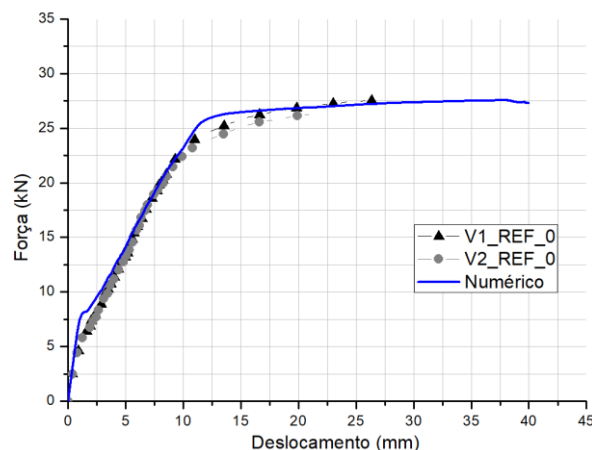


Figura 5 – Resultados das simulações numéricas e do programa experimental das vigas sem reforço.

Na Figura 6 são apresentados os padrões de fissuras obtidos na avaliação experimental e numérica. Nota-se que o padrão de fissuração final da simulação, representada pelo modelo de dano à tração (Figura 6a) apresentou boa convergência com a fissuração final das vigas ensaiadas (Figura 6b).

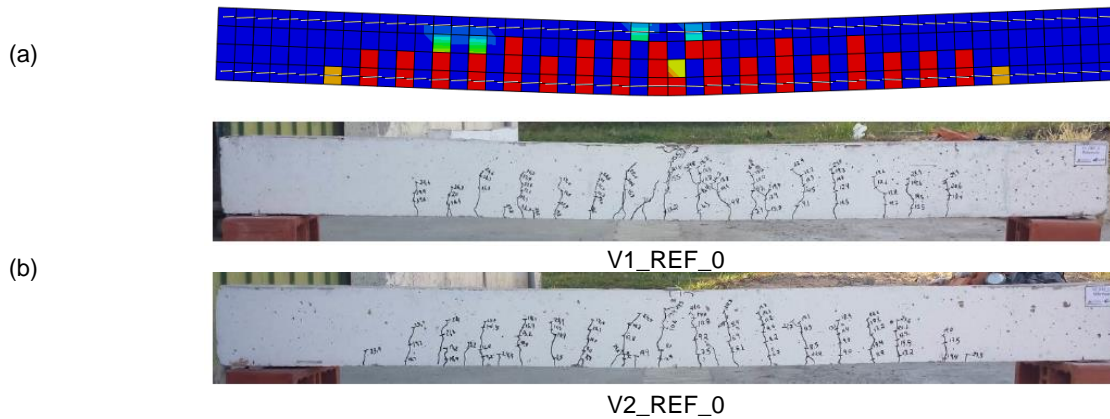


Figura 6 - Análise qualitativa entre o resultado experimental e numérico: (a) evolução dos danos na simulação numérica das vigas sem reforço à tração e (b) fissuração experimental (FERREIRA (2019)).

4.2 Vigas reforçadas

A Figura 7 apresenta o resultado obtido na análise experimental e numérica das vigas reforçadas com uma camada de manta de CFRP aplicada segundo a técnica EBR. Nota-se que foram apresentados os resultados obtidos tanto para o Modo II puro como para o Modo Misto.

Analisando-se os diagramas da Figura 7 é possível observar que houve boa concordância entre o comportamento obtido via simulação numérica e o experimental, onde as curvas apresentaram comportamentos bastante similares, sendo possível até observar o momento de falha do sistema de reforço, representado pela queda das curvas. Ainda, é possível constatar que, com a aplicação do Modo II puro, a carga e o deslocamento de ruptura obtidos para a avaliação da viga reforçada apresentam valores mais precisos dos que os obtidos com o modo misto.

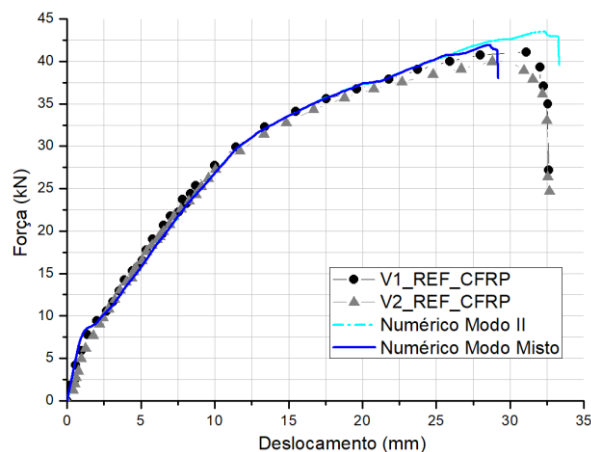


Figura 7 – Resultados das simulações numéricas e do programa experimental das vigas com reforço.

Já o dano à tração das vigas reforçadas, obtidos numericamente, também apresentaram boa convergência com os resultados experimentais. Analisando-se a Figura 8a é possível observar maior concentração de dano na região inferior junto ao meio do vão da viga, condição também observada no experimental (Figura 8b).

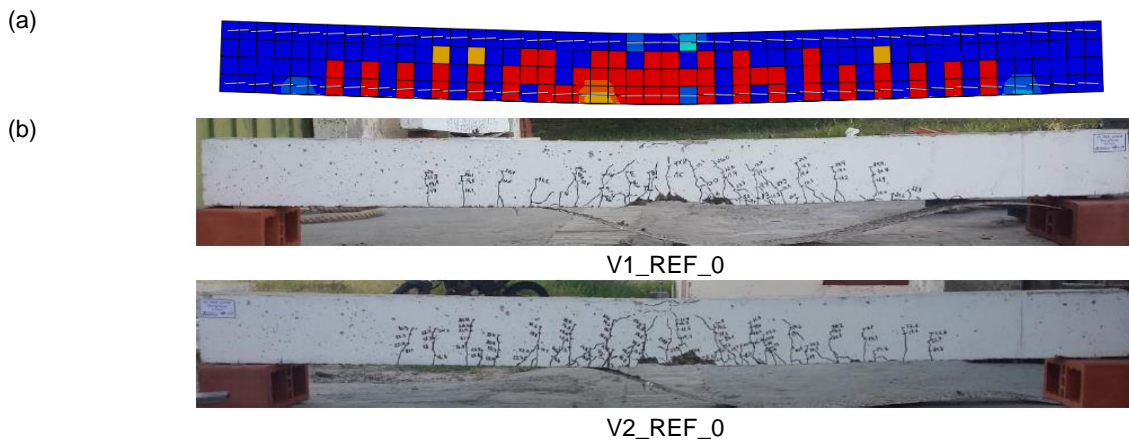


Figura 8 - Análise qualitativa entre o resultado experimental e numérico: (a) evolução dos danos na simulação numérica das vigas com reforço à tração e (b) fissuração experimental (FERREIRA (2019)).

Ainda, conforme verifica-se na avaliação da Figura 9, a simulação numérica permitiu verificar a degradação da rigidez escalar da resina que adere o reforço ao concreto, a qual foi representada pelo modelo de zona coesiva.

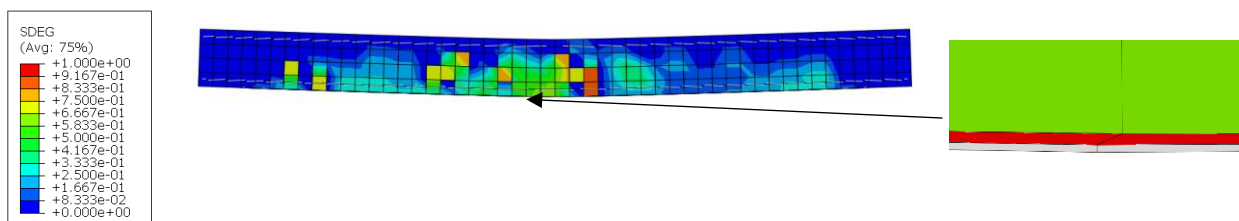


Figura 9 - Detalhe da resposta numérica de dano na região de adesão entre o concreto e o reforço via modelo coesivo.

Analisando-se os resultados é possível observar que as metodologias para determinação das Taxas de Liberação de Energias Críticas aos modos I (G_n^c) e II (G_s^c) propostas por Marti *et. al.* (1999) e Czaderski-Forchmann (2012), respectivamente, se mostraram efetivas para representação do comportamento na ligação adesivo-concreto, apresentando resultados condizentes com a física do fenômeno observado de falha de vigas EBR, uma vez que G_n^c e G_s^c foram determinadas em função da resistência característica à compressão e à tração do concreto, bem como para a falha que ocorre na interface concreto-adesivo, a qual foi bem representada via simulação numérica utilizando CZM. Ainda, o mapa de cores do ANAIS DO JUBILEU DE OURO IBRACON – 2022



modelo de dano à tração, apresentado na Figura 9, indica uma concentração de danificação na região intermediária da viga, local de máximo momento fletor, provavelmente caracterizada por fissuras, resultando em um modo de destacamento da região onde está colado o reforço de FRP conhecido na literatura como *Intermediate crack (IC) debonding*, no qual as fissuras atingem a interface reforço-substrato, comprometendo a resistência de aderência do sistema e, conseqüentemente, a resistência e ductilidade da viga reforçada (OEHLERS; SERACINO, 2004).

5. Conclusão

O presente trabalho apresentou uma análise numérica do comportamento de vigas não reforçadas e reforçadas com CFRP aplicado segundo a técnica EBR. Para tanto, considerou-se a campanha experimental realizada por Ferreira (2019) e realizou-se simulação numérica com o uso do *software* Abaqus®. A partir da avaliação dos resultados obtidos na análise numérica foi possível concluir:

- Quanto ao comportamento e interação da estrutura de concreto armado e o CFRP, é necessário que ocorra a sinergia entre as propriedades mecânicas dos materiais para que ocorra um aumento da capacidade mecânica do elemento estrutural;
- A simulação numérica de vigas de concreto armado, sem reforço ou com reforço com CFRP, com a utilização do *software* Abaqus®, se mostrou eficiente para prever o comportamento estrutural de tais elementos, submetidos à flexão;
- As metodologias propostas por Marti *et. al.* (1999) e Czaderski-Forchmann (2012), utilizando-se de modelo CZM, se mostraram efetivas para representação do comportamento na ligação adesivo-concreto, visto que as Taxas de Liberação de Energias Críticas foram determinadas em função das características concreto; e
- Os resultados obtidos também permitiram verificar que a falha do sistema de reforço aplicado segundo à técnica EBR, se dá principalmente na interface entre adesivo e substrato de concreto.

6. Referências

AL-ZAID, R. A.; EL-SAYED, A. K.; AL-NEGHEIMISH, A. I.; SHURAIM, A. B.; ALHOZAIMY, A. M. "Strengthening of structurally damaged wide shallow RC beams using externally bonded CFRP plates", **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 11, n. 6, p. 946–965, 2014. DOI: 10.1590/S1679-78252014000600003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR: 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro – RJ, ABNT, 2014.

BENJEDDOU, O.; OUEZDOU, M. B.; BEDDAY, A. "Damaged RC beams repaired by bonding of CFRP laminates", **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 6, p. 1301–1310, 2007. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.01.008.



BROEK, D. **Elementary engineering fracture mechanics**. 3th rev. ed ed. Dordrecht ; Boston : Hingham, Mass., U.S.A, M. Nijhoff ; Distributors for the U.S. and Canada, Kluwer Academic, 1984.

BUYLE-BODIN, F.; DAVID, E. "Use of Carbon Fibre Textile to Control Premature Failure of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Bonded CFRP Plates", **Journal of Industrial Textiles**, v. 33, n. 3, p. 145–157, 2004. DOI: 10.1177/1528083704039251.

CAMANHO, P. P.; DÁVILA, C. G. "Mixed-Mode Decohesion Finite Elements for the Simulation of Delamination in Composite Materials", **Composite Materials**, n. NASA/TM-2002–211737, p. 1–37, 2002.

CAMPILHO, R. D. S. G.; BANEJA, M. D.; NETO, J. A. B. P.; SILVA, L. F. M. "Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer", **International journal of adhesion and adhesives**, v. 44, p. 48–56, 2013.

CARREIRA, D. J.; CHU, K.-H. "Stress-strain relationship for plain concrete in compression". 82, 1985. **Anais [...]** [S.l: s.n.], 1985. p. 797–804.

CZADERSKI-FORCHMANN, C. **Strengthening of reinforced concrete members by prestressed, externally bonded reinforcement with gradient anchorage**. 2012. ETH Zurich, 2012. DOI: 10.3929/ETHZ-A-007569614.

DALFRÉ, G. M. **Polímeros reforçados com fibras na construção civil: dimensionamento de sistemas de reforço e armaduras não metálicas à flexão e ao cisalhamento segundo normas ACI**. 1. ed. São Carlos - SP, EdUFSCar, 2022.

DASSAULT SYSTÈMES. **Abaqus® 6.14-1 Documentation**. [S.l.], Analysis User's Manual, 2014.

EARLS, C. J. "On the inelastic failure of high strength steel I-shaped beams", **Journal of Constructional Steel Research**, v. 49, n. 1, p. 1–24, 1999. DOI: 10.1016/S0143-974X(98)00204-1.

ELGHAZY, M.; EL REFAI, A.; EBEAD, U.; NANNI, A. "Experimental results and modelling of corrosion-damaged concrete beams strengthened with externally-bonded composites", **Engineering Structures**, v. 172, p. 172–186, 2018. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.037.

FERREIRA, D. C. **Avaliação da degradação de vigas reforçadas com FRP quando expostas ao intemperismo**. 2019. 138 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, São Carlos - SP, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12121>. Acesso em: 30 abr. 2021.



GRACE, N. F.; SINGH, S. B. "Design approach for carbon fiber-reinforced polymer prestressed concrete bridge beams", **ACI Structural Journal**, v. 100, n. 3, p. 365–376, 2003. .

HAMRAT, M.; BOUZIADI, F.; BOULEKBACHE, B.; DAOUADJI, T. H.; CHERGUI, S.; LABED, A.; AMZIANE, S. "Experimental and numerical investigation on the deflection behavior of pre-cracked and repaired reinforced concrete beams with fiber-reinforced polymer", **Construction and Building Materials**, v. 249, p. 118745, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118745.

JANKOWIAK, T.; ŁODYGOWSKI, T. "Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model", **Foundations of Civil and Environmental Engineering**, n. No. 6, p. 53–69, 2005.

KABIR, M. Z.; ESHAGHIAN, M. "Flexural Upgrading of Steel-Concrete Composite Girders Using Externally Bonded CFRP Reinforcement", **Applied Composite Materials**, v. 17, n. 2, p. 209–224, 2010. DOI: 10.1007/s10443-009-9113-7.

KHAN, A. R., "Role of U-shaped anchorages on performance of RC beams strengthened by CFRP plates". **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II**, [S.l.], CRC Press, 2008.

KIM, S.-H.; HAN, K.-B.; KIM, K.-S.; PARK, S.-K. "Stress–strain and deflection relationships of RC beam bonded with FRPs under sustained load", **Composites Part B: Engineering**, v. 40, n. 4, p. 292–304, 2009. DOI: 10.1016/j.compositesb.2008.12.003.

KOTYNIA, R.; CHOLOSTIAKOW, S. "New Proposal for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using CFRP T-Shaped Profiles", **Polymers**, v. 7, n. 11, p. 2461–2477, 2015. DOI: 10.3390/polym7111524.

MACHADO, J. J. M.; GAMARRA, P. M.-R.; MARQUES, E. A. S.; SILVA, L. F. M. "Numerical study of the behaviour of composite mixed adhesive joints under impact strength for the automotive industry", **Composite Structures**, v. 185, p. 373–380, 2018. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.11.045.

MARTI, P.; ALVAREZ, M.; KAUFMANN, W.; SIGRIST, V. "Load behavior of reinforced concrete", **Advanced training course for civil engineers**, Accepted: 2017-10-19T07:55:56Z, v. 8, 1999. DOI: 10.3929/ethz-a-004470343Disponível em: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/95676>. Acesso em: 27 mar. 2022.

MASHREI, M. A.; MAKKI, J. S.; SULTAN, A. A. "Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets with Grooves", **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 16, n. 4, p. e176, 2019. DOI: 10.1590/1679-78255514.



MICHELS, J.; ZILE, E.; CZADERSKI, C.; MOTAVALLI, M. "Debonding failure mechanisms in prestressed CFRP/epoxy/concrete connections", **Engineering Fracture Mechanics**, v. 132, p. 16–37, 2014. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.10.012.

MOSTOFINEJAD, D.; HOSSEINI, S. A.; RAZAVI, S. B. "Influence of different bonding and wrapping techniques on performance of beams strengthened in shear using CFRP reinforcement", **Construction and Building Materials**, v. 116, p. 310–320, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.113.

NIU, H.; WU, Z. "Numerical Analysis of Debonding Mechanisms in FRP-Strengthened RC Beams", **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 20, n. 5, p. 354–368, 2005. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2005.00402.x.

OEHLERS, D. J.; SERACINO, R. **Design of FRP and Steel Plated RC Structures - Retrofitting Beams and Slabs for Strength, Stiffness and Ductility**. Book, Chapter 2, pages 24-45, 2004.

PEREIRA, M. F.; DALFRÉ, G. M.; LUCA, L. C. S. D.; OLIVEIRA, J. R. de; CANATO, R. L. "Análise da influência da corrosão das armaduras em elemento de concreto armado reforçado com mantas CFRP em seu comportamento estrutural", **Revista Tecnológica**, v. 30, n. 1, p. 87–106, 2021. DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591.

REZAZADEH, M.; BARROS, J. "A new hybrid methodology according to near surface mounted carbon fiber reinforced polymer technique for the flexural strengthening of reinforced concrete beams", **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 33, n. 21, p. 1993–2009, 2014. DOI: 10.1177/0731684414551374.

SABZI, J.; ESFAHANI, M. R.; OZBAKKALOGLU, T.; FARAHI, B. "Effect of concrete strength and longitudinal reinforcement arrangement on the performance of reinforced concrete beams strengthened using EBR and EBROG methods", **Engineering Structures**, v. 205, p. 110072, 2020. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110072.

SALEEM, M. U.; KHURRAM, N.; AMIN, M. N.; KHAN, K. "Finite element simulation of RC beams under flexure strengthened with different layouts of externally bonded fiber reinforced polymer (FRP) sheets", **Revista de la construcción**, v. 17, n. 3, p. 383–400, 2019. DOI: 10.7764/RDLC.17.2.383.

SEN, T.; REDDY, H. N. J. "Flexural strengthening of RC beams using natural sisal and artificial carbon and glass fabric reinforced composite system", **Sustainable Cities and Society**, v. 10, p. 195–206, 2014. DOI: 10.1016/j.scs.2013.09.003.

SHARDAKOV, I. N.; SHESTAKOV, A. P.; BYKOV, A. A. "Delamination of carbon-fiber strengthening layer from concrete beam during deformation (infrared thermography)", **Frattura ed Integrità Strutturale**, v. 10, n. 38, p. 331–338, 2016. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.38.43.



SUNDARRAJA, M. C.; RAJAMOHAN, S. "Flexural Strengthening Effect on RC Beams by Bonded Composite Fabrics", **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 27, n. 14, p. 1497–1513, 2008. DOI: 10.1177/0731684407081377.

TOUTANJI, H.; ZHAO, L.; ZHANG, Y. "Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix", **Engineering Structures**, v. 28, n. 4, p. 557–566, 2006. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.09.011.

WU, E. M.; REUTER, J. **Crack extension in fiberglass reinforced plastics**. [S.l.], University of Illinois, 1965. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0613576>. Acesso em: 27 mar. 2022.

YANG, J.; HAGHANI, R.; BLANKSVÄRD, T.; LUNDGREN, K. "Experimental study of FRP-strengthened concrete beams with corroded reinforcement", **Construction and Building Materials**, v. 301, p. 124076, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124076.

YANG, J.; JOHANSSON, M.; AL-EMRANI, M.; HAGHANI, R. "Innovative flexural strengthening of RC beams using self-anchored prestressed CFRP plates: Experimental and numerical investigations", **Engineering Structures**, v. 243, p. 112687, 2021. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112687.

ZHELYAZOV, T. "Structural Materials: Identification of the Constitutive Models and Assessment of the Material Response in Structural Elements Strengthened with Externally-Bonded Composite Material", **Materials**, v. 13, n. 6, p. 1272, 2020. DOI: 10.3390/ma13061272.