

USO DO COMPÓSITO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO EM VIGA DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDA A DESCONTINUIDADE NÃO PREVISTA: REFORÇO E ANÁLISE NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS

Use of carbon fiber reinforced composite in reinforced concrete beam subjected to unplanned discontinuity: reinforcement and finite element numerical analysis

Felipe Cesário de Oliveira ¹, Kaike Manoel Barros do Nascimento ², Renan Gustavo Pacheco Soares ³, Jessyca Priscylla de Almeida Nunes Fernandes ⁴



PALAVRAS CHAVE:

Reforço Estrutural;
Compósito reforçado de fibra de Carbono;
Análise Numérica;
Elementos Finitos;
Cisalhamento.

KEYWORDS:

Structural Reinforcement;
Carbon fiber reinforced composite;
Numerical Analysis;
Finite Elements;
Shear.

RESUMO: A execução de perfurações não previstas em elementos estruturais, especialmente em vigas, tem-se tornado prática rotineira no ambiente construtivo, ocasionado pela falta de compatibilização e interação dos profissionais na etapa de projeto. Após a descontinuidade do elemento estrutural, desenvolve-se uma redistribuição e acréscimo significativo dos esforços, afetando de forma sistêmica o desempenho do elemento, necessitando da aplicação do reforço estrutural. Com isto, um dos tipos de reforços que tem sido eficaz em sua aplicação é o compósito reforçado com fibra de carbono (CRFC). Deste modo, o objetivo desse trabalho é demonstrar o processo executivo da aplicação deste reforço em vigas com descontinuidade não prevista, bem como comprovar a sua eficácia através de análise computacional. Com isto, para realização da simulação numérica, utilizou-se o método dos elementos finitos (MEF), com o auxílio do software comercial ANSYS. A princípio, modelou-se as vigas sem e com perfuração e pôr fim a implementação do CRFC. Após as análises, constatou-se que a fibra de carbono contribuiu de forma fundamental para absorção dos esforços de tração, oriundo do expressivo aumento das tensões de cisalhamento, ocasionadas pela descontinuidade no elemento.

ABSTRACT: The execution of unplanned perforations in structural elements, especially in beams, has become a routine practice in the construction environment, caused by the lack of compatibility and interaction of professionals in the design stage. After the discontinuity of the structural element, a redistribution and significant increase in efforts develop, systemically affecting the performance of the element, and requiring the application of structural reinforcement. With this, one of the types of reinforcements that have been effective in its application is the carbon fiber reinforced composite (CRFC). Thus, the objective of this work is to demonstrate the executive process of the application of this reinforcement in beams with unforeseen discontinuity, as well as to prove its effectiveness through computational analysis. For this purpose, to perform the numerical simulation, the finite element method (FEM) was used, with the aid of the commercial software ANSYS. At first, the beams were modeled without and with perforation, and finally the implementation of CRFC. After the analysis, it was found that the carbon fiber contributes fundamentally to the absorption of tensile stresses, resulting from the significant increase in shear stresses, caused by the discontinuity in the element.

* Contato com os autores:

¹ e-mail: felipecesario96@gmail.com (F. C. Oliveira)

Graduando em Engenharia Civil, Autarquia do Ensino Superior de Garanhuns (AESGA)

² e-mail: kaikebarros@aesga.edu.br (K.M.B. Nascimento)

Engenheiro Civil, Mestre, Professor, Autarquia do Ensino Superior de Garanhuns (AESGA)

³ e-mail: renangustavo@aesga.edu.br (R.G.P. Soares)

Engenheiro Civil, Doutor, Professor, Autarquia do Ensino Superior de Garanhuns (AESGA)

⁴ e-mail: jessycanunes@aesga.edu.br (J.P.A.N. Fernandes)

Engenheira Civil, Mestre, Professora, Autarquia do Ensino Superior de Garanhuns (AESGA)

Publicado em 28 de dezembro de 2023

1. INTRODUÇÃO

No decorrer do processo de elaboração dos projetos constituintes, baseado sobretudo no projeto de arquitetura, mesmo com o avanço paulatino da implementação dos recursos da metodologia BIM em obras privadas e pública, é bastante corriqueiro o conflito de elementos de diversas disciplinas na fase de execução, devido falta de compatibilização e interação dos profissionais na etapa de projeto. Sobretudo, quando ocorre esta interferência de forma não prevista, principalmente com elementos estruturais, afeta potencialmente a capacidade portante dos elementos, ocasionando acréscimo de deslocamentos, tensões de flexão, cisalhamento e por último o esgotamento da capacidade resistente, acarretando o colapso estrutural. Desta feita, para elementos que já foram submetidos a descontinuidade, devido a passagem de tubos sanitários ou eletrodutos, torna-se necessário a realização do reforço estrutural de forma imediata, levando em consideração que o tipo de reforço empregado deverá ter capacidade de se adaptar ao elemento estrutural.

Por conseguinte, dentre os reforços normativo disponíveis e que possuam tais características, destaca-se o uso dos compósitos reforçados com Fibra de carbono (CRFC), por demonstrar elevada resistência aos esforços de cisalhamento e flexão quando empregado, como também não oferece alteração nas características da seção transversal, sendo ideal para elementos que já forma submetidos a perfuração e necessitam de reforço externo.

Contudo, com o crescente número de recorrência de perfuração não previstas em elementos estruturais e por conseguinte a aplicação dos reforços externos utilizado o CRFC, torna-se necessário a ampliação dos estudos concernentes a análise do comportamento deste tipo de reforço quando empregado em elementos que já se encontram com a capacidade resistente afetada, verificando a interação e absorção dos esforços por parte da fibra de carbono.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo demonstrar o processo executivo da aplicação do CRFC em vigas com descontinuidade não prevista, bem como comprovar a sua eficácia através de análise numérica por elementos finitos (MEF), observando a absorção dos esforços após a execução do reforço.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As perfurações em elementos estruturais no âmbito construtivo sem a devida inserção das armaduras de reforço, tem-se tornado algo habitual, de acordo com a Figura 1.



FIGURA 1: Descontinuidade não prevista em viga.

FONTE: Próprios Autores (2023)

Após atualização da NBR 6118, norma que versa sobre procedimento e diretrizes para o cálculo de estruturas de concreto, da versão de 2007 para a atual NBR 6118 (2014), incorporou em seu escopo, nos itens 13.2.5 e 21.3 diretrizes normativas no que tange aberturas em elementos estruturais. Conforme o texto normativo, algumas recomendações construtivas foram inseridas, sendo elas: os furos devem ter distâncias entre os apoios de no mínimo de duas vezes a altura da viga, como também a distância entre furos deverá respeitar a mesma dimensão e diâmetro máximo de 12cm ou $h/3$. Além disso, no item 21.3 a NBR 6118 (2014) estabelece ainda que as aberturas devem ser calculadas e detalhadas considerando as redistribuições das tensões atuantes no elemento, tendo em vista que haverá uma concentração de esforços nessas aberturas, resultando na necessidade de inserção de armaduras para resistir aos esforços de tração, conforme a Figura 2.

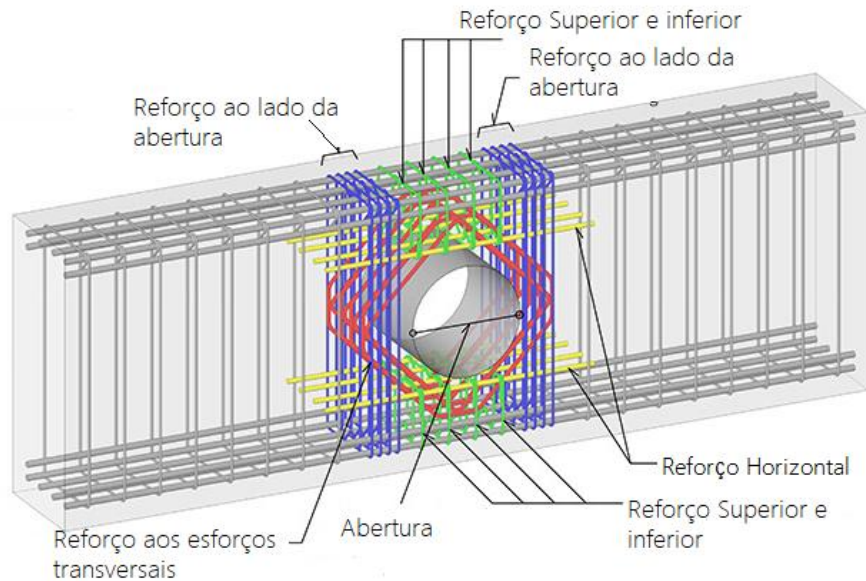


FIGURA 2: Armaduras de Reforço em aberturas

FONTE: Adaptado do Grupo Shimz.(2023)

De acordo com os estudos de Carneiro et al. (2021), sobre a contribuição das perfurações próximas aos apoios em vigas de concreto armado, observou-se no pior caso um acréscimo de aproximadamente 96,33% e 192,02% para os esforços de momento fletor e cisalhamento, respectivamente.

Corroborando com o mesmo estudo, Silva, Pontes e Silva (2016) realizaram análises experimentais de vigas com perfurações na direção vertical sem a implementação das armaduras de reforço em várias posições e após a observação dos valores de estado limite último de resistência, constatou-se que os furos mais próximos dos apoios foram os mais determinantes para o rompimento por cisalhamento, por se localizar na área de influência das bielas de compressão. Além disso, verificou-se que as vigas com perfurações tiveram sua rigidez reduzida de forma considerável, em relação a viga sem descontinuidade.

Deste modo, constata-se que a realização de furos ou aberturas sem adição de armadura adequada de reforço compromete substancialmente a capacidade resistente da peça. Diante desta descontinuidade, ocasiona, a princípio a extrapolação dos valores máximos preconizado pela NBR 6118 (ABNT, 2014), tanto o estado limite de serviço (ELS), com a aparição prematura de fissuras, como destaca a Figura 3, até ultrapassar o estado limite último (ELU), no qual existe o esgotamento da capacidade portante do elemento.



FIGURA 3: Viga com furo não previstos em região crítica
FONTE: Próprios Autores (2023)

3.1. COMPÓSITO REFORÇADO DE FIBRA DE CARBONO

O uso do CRFC nos reforços estruturais tornou-se prática comum em âmbito nacional e internacional, tendo em vista que proporciona ao elemento um elevado ganho de resistência aos esforços de flexão e cisalhamento. De acordo com Cavalcante, Lima e Uchôa (2022) uso da fibra de carbono confere vários benefícios, como: baixo impacto visual para a arquitetura, elevada resistência ao processo de corrosão, tornando-se ideal em situações de elevado grau de agressividade, além de apresentar um tempo de execução baixo.

Em consonância com Pivatto (2017), que analisou a contribuição da implementação da Fibra de Carbono para o reforço a flexão simples com ancoragem lateral, constatou-se um incremento na capacidade resistente da viga em estudo com 2 duas camadas de CRFC de aproximadamente 42,18%.

Conforme de Abdalla, Hawileh e Mhanna (2019), a implementação da CRFC em vigas resultaram em alguns casos o aumento de 114.82%, comparado com a viga de referência, tendo implementado o compósito em três faces do elemento estrutural analisado.

Nos estudos propostos por Allawi, Jasim e Oukaili (2021), que analisaram de forma experimental e numérica a contribuição da Fibra de carbono em vigas de concreto armado com aberturas retangulares em ambas as extremidades. Após a finalização dos experimentos, concluíram que houve um acréscimo entre 20 a 47% de capacidade de carga da viga com o reforço com CRFC em comparação com a viga apenas com as aberturas, conforme a Figura 4.



FIGURA 4: Ensaio Experimental de Viga de concreto armado com abertura
FONTE: Allawi, Jasim e Oukaili (2021)

Sendo específico em sua abordagem, Kareem (2014) realizou uma análise experimental da influência das aberturas em posições variáveis, como também com dimensões variáveis nas regiões críticas, nos esforços de cisalhamento na peça, bem como a contribuição da CRFC quando inserida como reforço na

região frágil. Após o rompimento dos protótipos, chegou-se à conclusão de que a aplicação da fibra de carbono aumentou a rigidez no que tange ao cisalhamento, entre 25 e 90%, entre a viga de referência. Esta por sua vez, após submetida aos esforços, percebeu-se que sua rigidez frente ao esforço de cisalhamento, foi consideravelmente reduzido, devido as aberturas próximas aos apoios.

4. METODOLOGIA

A abordagem deste trabalho divide-se em duas etapas: Execução do reforço estrutural e modelagem numérica. Os materiais empregados, bem como a execução e a descrição dos principais aspectos da modelagem numérica pelo método dos elementos finitos (MEF) será descrito nos tópicos a seguir.

4.1. REFORÇO

4.1.1. Materiais

Os materiais empregados para realizar o reforço estrutural estão descritas na Tabela 1.

TABELA 1: Características Mecânicas							
Especificações Gerais da argamassa de reparo estrutural		Especificações Gerais do CRFC		Especificações Gerais da Resina Primer		Especificações Gerais da Resina Estruturante	
Densidade Aparente (kg/cm ³)	1500	Densidade Fibra Seca (kg/cm ³)	1820	Peso Específico (kg/m ³)	1110	Peso Específico (kg/m ³)	1100
Densidade Fresca (kg/cm ³)	1900	Espessura da Fibra Seca (mm)	0,167	Viscosidade Total da mistura (cps)	350	Resistência a Tração (MPa)	62
Resistência a Compressão aos 28 dias (MPa)	34	Resistência à tração da fibra seca (MPa)	4000	Voc (g/l)	56,61	Resistência adesiva (MPa)	14

FONTE: Próprios Autores (2023)

4.2. MODELAGEM NUMÉRICA

4.2.1. Aspectos Geométricos

De acordo com a proposta da pesquisa, desenvolveu-se três modelos geométricos com o objetivo de verificar a influência dos furos, bem como a eficácia da implementação do CRFC. As dimensões dos três modelos, bem como a disposição das armaduras estão descritas nas Figuras de 5 e 6.

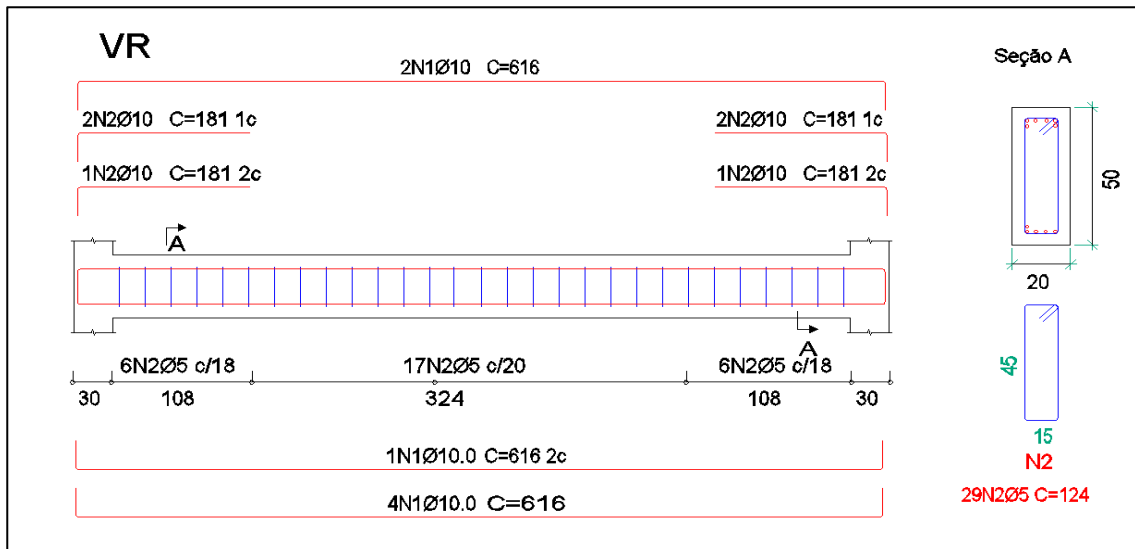


FIGURA 5: Detalhamento da viga de referência. Dimensões em centímetros
FONTE: Próprios Autores (2023)

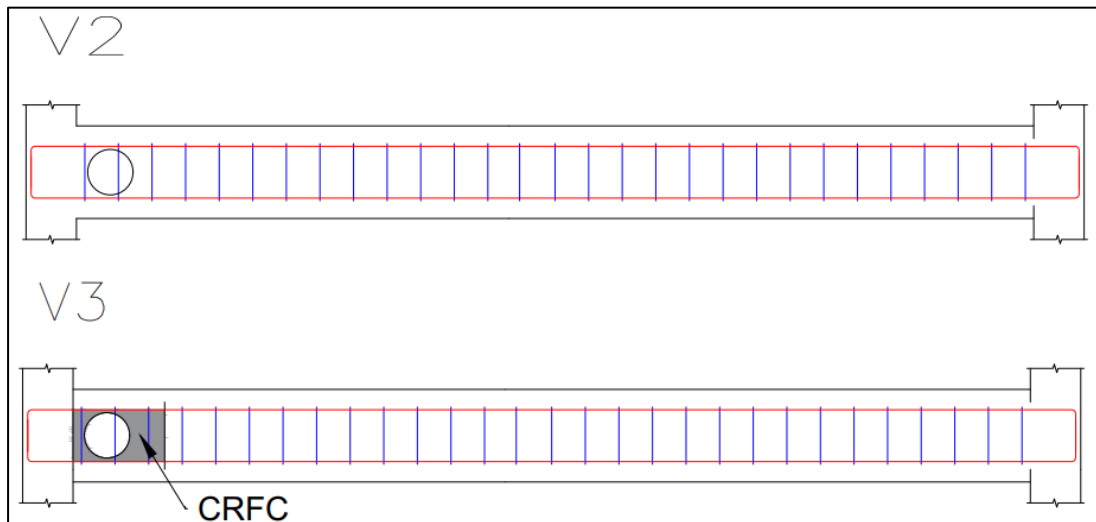


FIGURA 6: Detalhamento das vigas V2 e V3
FONTE: Próprios Autores (2023)

No Quadro 1 está descrito a nomenclatura das vigas analisadas.

QUADRO 1: Descrição dos modelos analisados	
Nº Modelo	Descrição
VR	- Viga de referência sem a perfuração
V2	- Viga com Perfuração de 18cm a 8cm de distância dos apoios
V3	- Viga com a implementação CRFC envolta do furo.

FONTE: Próprios Autores (2023)

4.2.2. Generalidades do Modelo

As análises numéricas desenvolvida neste trabalho foram realizadas com o auxílio do software de elementos Finitos ANSYS e para modelagem dos elementos, utilizou-se o software REVIT. Além disso, para a implementação das famílias de elementos, utilizou-se rotinas de programação paramétricas (APDL),

integrada ao ambiente de desenvolvimento do ANSYS. Conforme a sua vasta biblioteca de elementos, utilizou-se elementos das famílias SOLID65, para modelagem do elemento de concreto; LINK 180 para caracterização das armaduras; SHELL 181 para definição das características do CRFC e CONTA174 para a definição das interfaces de contato entre elementos. A utilização desses elementos baseia-se nos trabalhos já realizados por Silva (2016), Soares (2017), Duarte et al. (2021) e Barour et al. (2022).

No decorrer do processo de análise e modelagem, adotou-se que a viga em estudo estaria simplesmente apoiada em suas extremidades, sob a influência de um carregamento uniformemente distribuído, conforme mostra a Figura 7. A determinação dos esforços atuantes da viga, baseia-se na análise estrutural realizada in loco dos carregamentos acidentais e permanentes na estrutura, podendo, portanto, estimar de forma precisa o estado de carregamento que o elemento estrutural estava submetido. A descrição das parcelas provenientes dos carregamentos estar dispostos na Tabela 2.

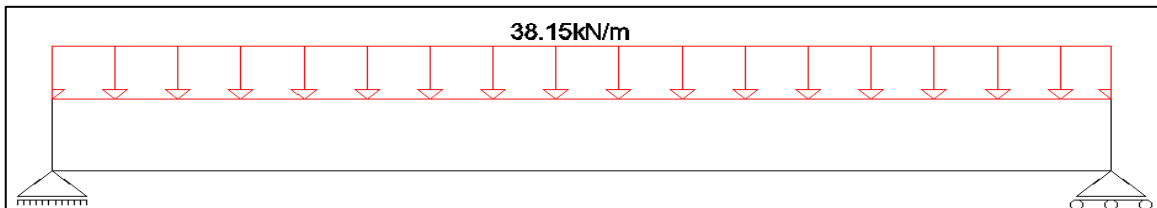


FIGURA 7: Condições de contorno do modelo

FONTE: Próprios autores (2023).

TABELA 2: Parcela dos carregamentos

Descrição	Valor
Peso Próprio (kN/m)	6
Carregamento Permanente (kN/m)	21,25
Sobrecarga (kN/m)	10,9
Total	38,15

FONTE: Próprios autores (2023)

4.2.3. Propriedades dos materiais

As características mecânicas dos elementos inseridos na modelagem numérica são apresentadas na Tabela 3:

TABELA 3: Propriedades mecânicas

Especificações Gerais do Concreto		Especificações Gerais do Aço		Especificações Gerais do CRFC	
Fck(MPa)	25	Fyk CA-50 (MPa)	500	Tensão última de Ruptura (MPa)	4000
		Fyk CA-60 (MPa)	600		
Módulo de Elasticidade (GPa)	28	Módulo de Elasticidade (GPa)	210	Módulo de Elasticidade (GPa)	230
Densidade (kg/m³)	2500	Densidade (kg/m³)	7850	Densidade (kg/m³)	1820
Coefficiente de Poisson (ν)	0,2	Coefficiente de Poisson (ν)	0,3	Coefficiente de Poisson (ν)	0,25

FONTE: Próprios Autores (2023)

5. RESULTADOS

5.1. REFORÇO ESTRUTURAL

Devido a ocorrência das perfurações não previstas na viga, conforme as figuras 2 e 3, constatou-se na vistoria a necessidade imediata da realização do reforço estrutural. A princípio, para a implementação do CRFC, necessitou-se preencher os espaços vazios, oriundos da inadequada perfuração, com argamassa de reparo estrutural específica. Após o preenchimento dos vazios, preparou-se o substrato com a aplicação da resina Primer, que tem a finalidade de estabelecer uma ponte de ancoragem entre o substrato e a fibra de carbono, de acordo com a Figura 8.

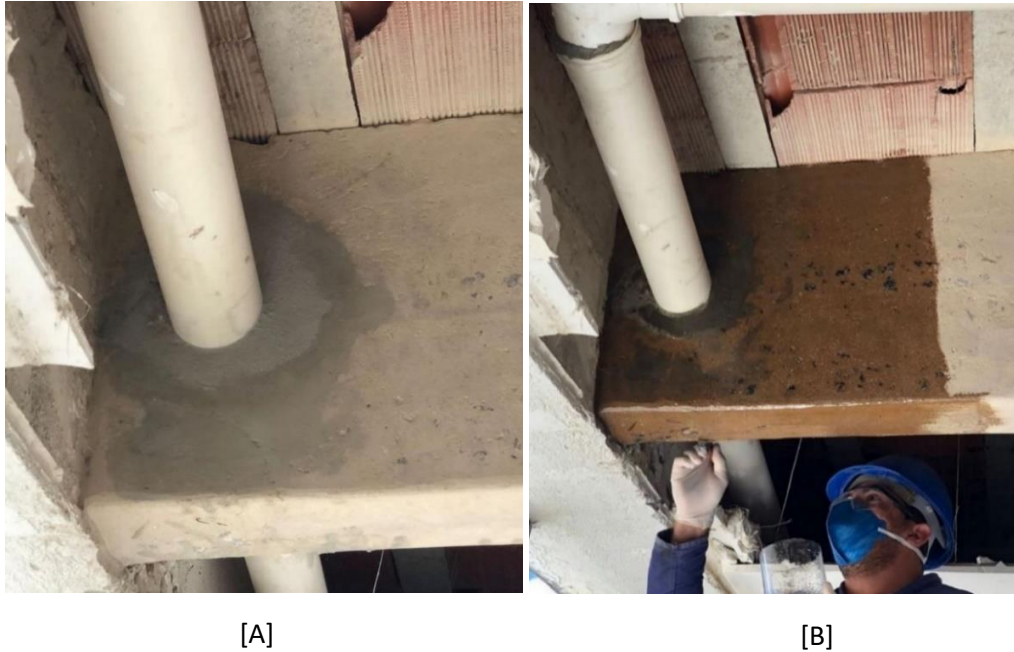


FIGURA 8: [A]-Preenchimento dos Vazios com argamassa estrutural [B]- Aplicação da Resina Primer
FONTE: Próprios Autores (2023)

Em seguida, após a penetração da resina primer no substrato, realizou-se a inserção da fibra de carbono de forma unidirecional e posterior a sua aplicação, implementou-se a resina estruturante com o auxílio rolo manual, com o objetivo de eliminar os vazios entre a resina e a fibra de carbono, conforme a Figura 9.



FIGURA 9: Aplicação da Fibra de carbono
FONTE: Próprios Autores (2023)

5.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

5.2.1. Validação do Modelo

Após a modelagem das vigas descritas, utilizou-se para o processo de validação da representação numérica, a solução analítica. Por sua vez, a princípio calculou-se as tensões de cisalhamento no plano em estudo e comparou-se com os resultados do modelo VR, após alcançar o grau de convergência através do refinamento da malha, de acordo com a Figura 10.

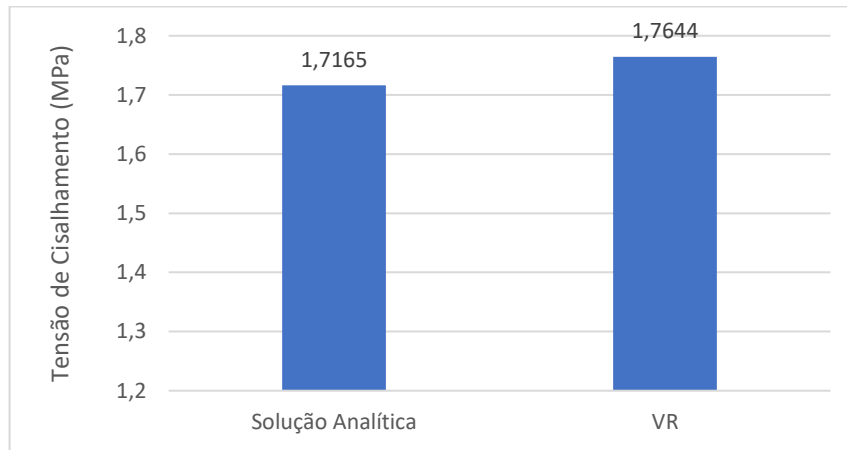


FIGURA 10: Validação do Modelo Numérico.

FONTE: Próprios Autores (2023)

De acordo com o gráfico acima, pode-se analisar a diferença de aproximadamente 2,71% entre o resultado numérico solucionado pelo MEF e a solução analítica, obtendo por conseguinte boa precisão do modelo em estudo.

5.2.2. Descontinuidade não prevista

As análises numéricas realizadas puderam ser divididas em duas etapas, a saber: A comparação da influência dos furos nas regiões críticas e o comportamento da mesma viga com a implementação do CRFC. A princípio, realizou-se a modelagem e análise dos modelos VR e V2, observando a redistribuição dos esforços de cisalhamento, bem como a considerável concentração das tensões em torno da perfuração, conforme a Figura 11 a seguir.

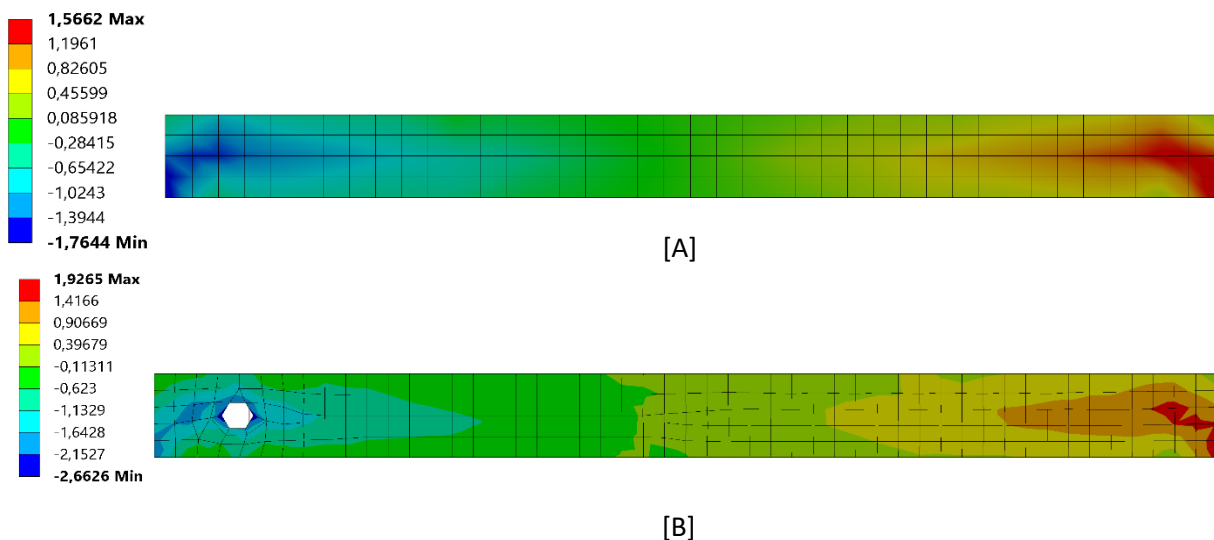


FIGURA 11: Tensões de Cisalhamento - [A] Viga VR e [B] - Viga V2 (MPa)

FONTE: Próprios Autores (2023)

De acordo com a Figura 11 [A], a diferença relativa entre as tensões de cisalhamento nas extremidades, onde localiza-se os apoios é de aproximadamente 11,23%. Essa assimetria dos resultados se dá pela formação do efeito arco nas bielas comprimidas, que podem ser verificadas na Figura 11. Percebe-se que a biela comprimida se distribui de forma inclinada, com angulação de aproximadamente 45° nas proximidades dos apoios. Desta feita, ocorre, portanto, um acréscimo de esforço de axial de tração na viga, que por conseguinte ocasionará uma redistribuição dos esforços cisalhantes. (solicitações justificadas através do fenômeno do efeito arco)

De forma clara e visível após a perfuração inadequada, é possível perceber que houve a redistribuição dos esforços, que por sua vez resultou em um elevado acréscimo nas tensões de cisalhamento, conforme observa-se na Figura 12.

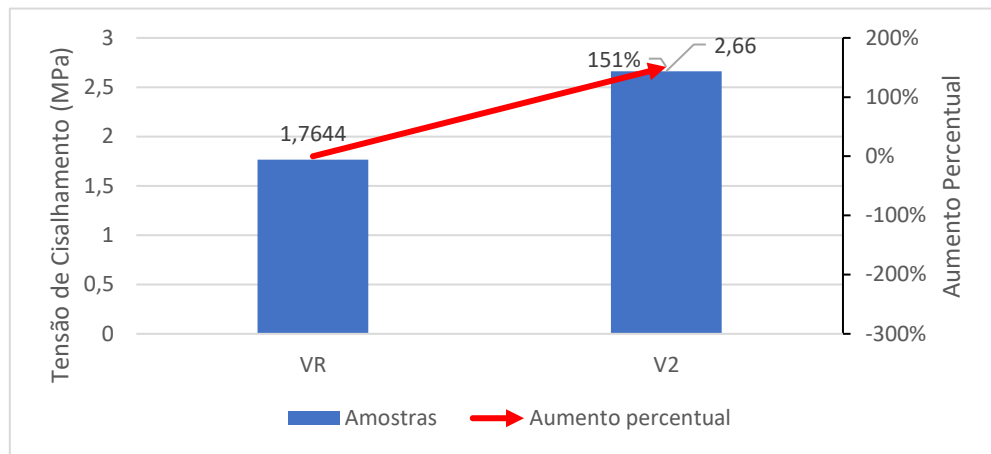


FIGURA 12: Comparação das tensões de Cisalhamento
FONTE: Próprios Autores (2023)

Além disso, os efeitos deletérios das discontinuidades não previstas em vigas, conforme as análises realizadas, não influenciam apenas nas tensões de cisalhamento, contudo afetam no comportamento local do elemento, como um leve acréscimo nas tensões de flexões de aproximadamente 0,53%. De acordo com a Figura 13, no que tange aos deslocamentos, os resultados obtidos entre as vigas VR e V2 são muito próximos, com variação percentual de apenas 0,48%.

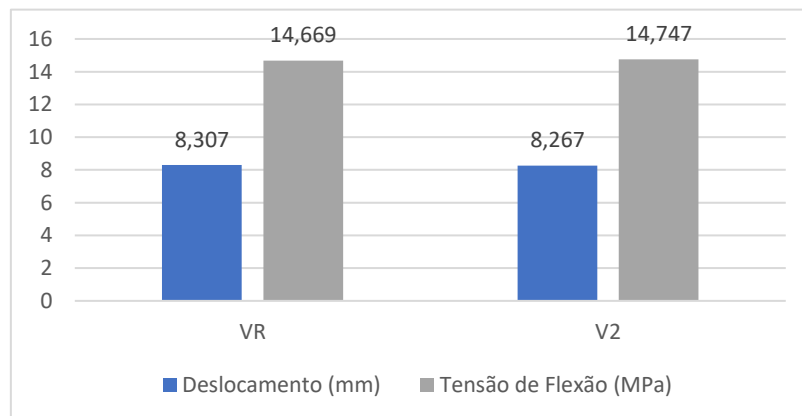


FIGURA 13: Tensões de Flexão e deslocamentos
FONTE: Próprios Autores (2023)

5.2.3. Implementação do Compósito reforçado de fibra de carbono

Nesta segunda etapa da análise numérica, efetuou-se a inserção do CRFC na viga em estudo, com a influência da descontinuidade na extremidade. Constatou-se a princípio de que houve uma redistribuição dos esforços para a fibra de carbono, conforme a figura 14, que exemplifica as tensões ao longo da viga e do CRFC. Percebe-se que após a incorporação do reforço estrutural com fibra de carbono, as tensões cisalhantes nas extremidades, comparado com o modelo V2 na Figura 11 [A], diminuem de forma substancial, como está destacado nas extremidades da viga, de acordo com a Figura 14. (solicitações justificadas com uma nova imagem, Figura 14)

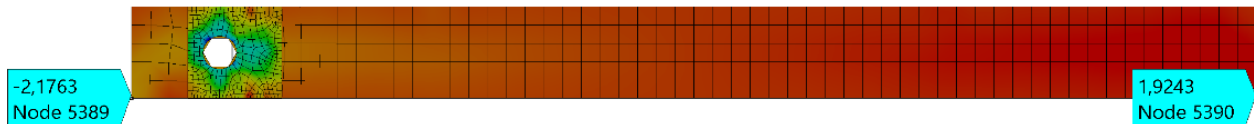


FIGURA 14: Tensões de Cisalhamento da viga V3 (MPa)
FONTE: Próprios Autores (2023)

Além disto, analisando de forma isolada a redistribuições das tensões de cisalhamento, percebe-se que as fibras do CRFC atuam predominantemente resistindo aos esforços de tração, de acordo com a Figura 15.

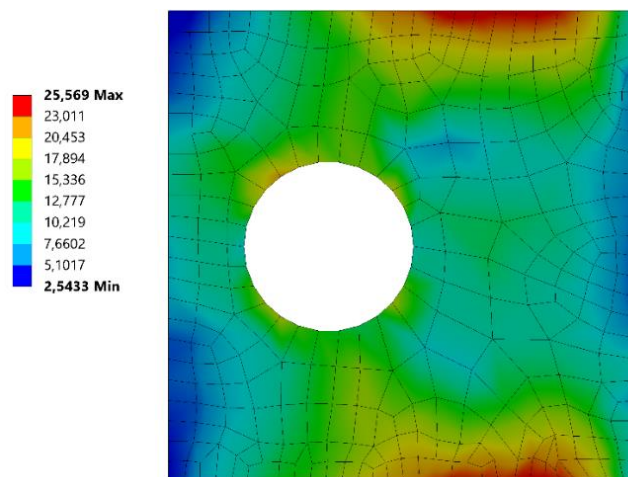
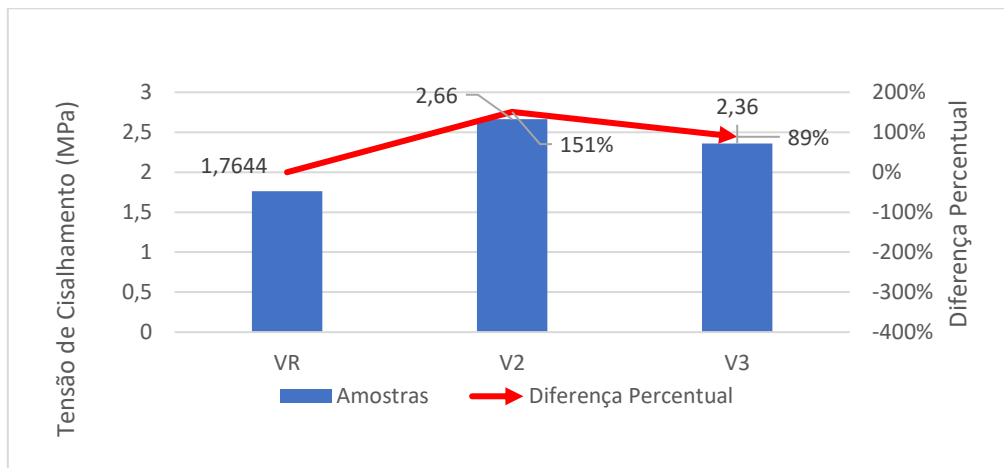


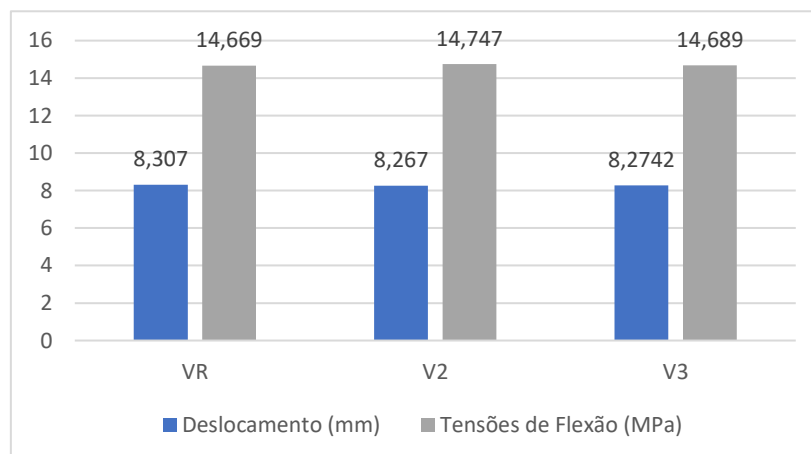
FIGURA 15: Distribuição dos esforços de Cisalhamento (MPa)
FONTE: Próprios Autores (2023)

Observando e comparando os três modelos, pode-se observar que com a implementação do CRFC, houve uma minoração dos esforços de cisalhamento presente na interface do concreto em aproximadamente 11%, de acordo com a Figura 16.

**FIGURA 16:** Aumento percentual das tensões de cisalhamento

FONTE: Próprios Autores (2023)

Ademais, em relação aos outros parâmetros de comparação, percebeu-se que a variação no que se refere ao deslocamento vertical da viga foi 0,09%, sendo, portanto, insignificante. De forma análoga, as tensões de flexão nas amostras V2 e V3 sofreram redução de aproximadamente 0,53%, conforme a Figura 17.

**FIGURA 17:** Análise comparativa dos três modelos empregados

FONTE: Próprios Autores (2023)

Diante disto, nota-se que o reforço com a inserção do CRFC, não contribui de forma significativa para o aumento da capacidade resistente às tensões de flexão, mesmo que ocorresse em locais nos quais os esforços de flexão são preponderantes. Esse fenômeno ocorre, porque para reforços de elementos com falhas ao cisalhamento, a direção das fibras deverá ser na direção vertical, enquanto para reforços à flexão, o CRFC deverá estar disposto na direção longitudinal do elemento.

5.3. ESFORÇOS DE CISALHAMENTO CONFORME NBR 6118 (ABNT, 2014)

Tendo como objetivo comprovar a transferência de esforços no elemento estrutural para o CRFC, observando o carregamento atuante no elemento, conforme na tabela 2, tornou-se necessário recalculá-los os esforços, no que tange ao cisalhamento, de acordo com as prescrições normativas da NBR 6118 (ABNT, 2014), para verificar capacidade resistente da viga em estudo. A partir disto, deu-se início ao cálculo dos esforços, conforme mostra a Equação 1.

$$V_d = \left(\frac{Q \times L}{2} \right) = 1,4 \times \left(\frac{38,15 \times 6}{2} \right) = 160,23 \text{ kN} \quad \text{Eq. [1]}$$

Em que:

Q = Carregamento uniformemente distribuído (kN/m);

L = Comprimento da Viga (m).

Em seguida, calculou-se o esforço cortante corresponde a biela de compressão, conforme o item 17.4.2.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014), como mostra a Equação 2.

$$V_{rd2} = 0,27 \times \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \times f_{cd} \times b_w \times d$$

$$V_{rd2} = 0,27 \times \left(1 - \frac{25}{250} \right) \times 1,785 \times 20 \times 46 = 399,21 \text{ kN} \quad \text{Eq. [2]}$$

$$V_d \leq V_{rd2} \rightarrow \text{OK}$$

Em que:

f_{ck} = Resistência característica do concreto (MPa);

F_{cd} = Resistência de cálculo do concreto (kN/cm²) .;

B_w = Largura da viga (cm);

d = Altura Útil da viga (cm).

De acordo com os cálculos, os esforços de compressão são plenamente resistidos pelo concreto, porém é necessário calcular a força de tração absorvida pelas armaduras, bem como o esforço redistribuído para o CRFC. Diante disto, prossegue-se o cálculo dos esforços de tração, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014):

$$V_{rd3} = V_{sd} = V_c + V_{sw} \quad \text{Eq. [3]}$$

Em que:

V_c = Esforço cortante resistido pelo concreto (MPa);

V_{sw} = Esforço cortante para cálculo da armadura (kN).

A contribuição do concreto a tração, pode ser calculado pela Equação 4:

$$V_c = 0,6 \times \left(\frac{0,7 \times 0,3}{\gamma_c} \right) \times b_w \times d$$

$$V_c = 0,6 \times \left(\frac{0,7 \times 0,3}{1,4} \right) \times 20 \times 46 = 70,793 \text{ kN} \quad \text{Eq. [4]}$$

Em que:

γ_c = Coeficiente de ponderação do concreto.

Após realizar o cálculo das parcelas provenientes de tração absorvidas pelo concreto, encontra-se o esforço resistente das armaduras que já estão inseridas no modelo, de acordo com o seguinte desenvolvimento:

$$V_{sw} = \frac{A_{sw}}{s} \times (0,9 \times d \times f_{ywk} \times (\sin\alpha + \cos\alpha))$$

$$V_{sw} = (0,022) \times (0,9 \times 46 \times 60) \times ((\sin 90^\circ + \cos 90^\circ))$$

$$V_{sw} = 54,65 \text{ kN}$$

$$V_{rdi} = V_c + V_{sw} = 54,65 + 70,793 = 125,443 \text{ kN}$$

Diante disto, em consonância com os estudos de Silva (2016), torna-se necessário calcular os esforços excedentes que o elemento estrutural não poderá resistir e desta feita ser redistribuído para o CRFC. A equação que descreve essas variáveis está descrita a seguir:

$$V_f = \frac{(V_d - V_{rdi})}{(\phi \times \Psi_f)}$$

$$V_f = \frac{(160,23 - 125,443)}{(0,75 \times 0,85)} = 54,57 \text{ kN}$$

Em que:

ϕ = Fator de redução da resistência do CRFC.

Ψ_f = Fator de redução adicional aplicado à contribuição do CRFC na resistência à flexão.

Em consonância com os resultados encontrados, observa-se que ocorre uma redistribuição dos esforços excedentes do elemento de concreto, juntamente com o aço dos estribos, para o CRFC, que por sua vez atua absorvendo os esforços de tração que foram acrescentados, pela descontinuidade não prevista.

6. CONCLUSÕES

Através das análises numéricas utilizando o MEF nesta presente pesquisa, comprovou-se primeiramente as consequências desfavoráveis da realização das perfurações nas vigas em regiões em que os esforços de cisalhamento são preponderantes, aproximando-se de forma significativa com os resultados obtidos por Carneiro et al. (2021).

Além disto, a implementação do CRFC na região fragilizada do elemento, proporcionou um acréscimo considerável da rigidez da viga no local de aplicação do reforço, frente aos esforços de cisalhamento atuantes na perfuração, por ter inserido a fibra de carbono nas três faces do elemento estrutural.

Entretanto, devido ao nível de complexidade da inserção da resina estruturante no modelo numérico, optou-se nesta pesquisa por apenas representar o CRFC como elemento de reforço, sem realizar a modelagem da resina estruturante. Diante disto, justifica-se a pequena absorção dos esforços pela fibra de carbono, tendo em vista que a resina estruturante possui ótima resistência tanto aos esforços axiais (tração e compressão), como para os esforços de cisalhamento.

O presente trabalho contribui de forma significativa no que tange a aplicação do CRFC, em elementos estruturais que já foram submetidos a descontinuidade, demonstrando o reordenamento dos esforços e sua respectiva transferência. Por isto, torna-se cada vez mais necessário a ampliação dos estudos concernentes a esse tipo de reforço, implementando no modelo numérico as camadas da resina estruturante. Desta feita, é possível obter uma representatividade mais próxima da realidade executada, bem como uma maior precisão no valor dos esforços nas camadas de reforço e pôr fim a ampliação da utilização do CRFC em diversas áreas da engenharia de estruturas.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Autarquia do Ensino Superior de Garanhuns (AESGA) pelo suporte para o desenvolvimento da presente pesquisa.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, J.A.HAWILEH, R.A.MHANNA, H.H. **Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using CFRP Wraps**. Procedia Structural Integrity. Vol. 17, 2019, 214-221 p.

ALLAWI, A.A. JASIM, W.A. OUKAILI, N.K. **Strength compensation of deep beams with large web openings using carbon fiber-reinforced polymer sheets**. Advances in Structural Engineering. Vol. 24, n. 1, 2021, 165–182 p.

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

BAROUR, S. BOUZIADI, F. DEMERDASH, W.E.E. KALOOP, M.R. ZERGUA, A. **Nonlinear Numerical and Analytical Assessment of the Shear Strength of RC and SFRC Beams Externally Strengthened with CFRP Sheets**. Hindawi Advances in Civil Engineering. Vol. 22, 2022, 17p.

CARNEIRO, A.M.P. MELO, J.J. OLIVEIRA, R.A RODRIGUES, G.G.O. SOARES, R.G.P. **Análise numérica via elementos finitos em vigas de concreto armado quando submetidas a descontinuidades não previstas na etapa de projeto**. Brazilian Journal of Development. Vol. 7, n. 2, 2021. 20445-20461 p.

CAVALCANTE, J R,D. LIMA, Y O. UCHÔA, B.C.L. . **Método para reforço de viga submetida à flexão por colagem externa de compósitos reforçados com fibras de carbono**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Goiânia, v. 18, n. 2, p. 29–45, 2022. DOI: 10.5216/reec.v18i2.68761. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/68761>. Acesso em: 8 jun. 2023

DUARTE., I.O. FORTI, N.C.S. FUGIYAMA , M.M. JACINTHO, A.E.P.G.A. PIMENTEL, L ,L. SANTOS, J.D. **Estudos numérico-experimentais de vigas de concreto armado com reforço de fibra de carbono**. Revista matéria. 2021. Vol. 24, N.4, 16 p.

Grupo Shimz. Site Oficial. Disponível em: <<https://www.shimz.co.jp/en/company/about/news-release/2018/2018004.html>>. Acesso em 14 de julho de 2023.

KAREEM, A.H.A **Finite element analysis of reinforced concrete beams with opening strengthened using FRP**. Advances in Concrete Construction, Vol. 2, n. 4, 2014, 281-300 p.

PIVATTO, A. B. **Análise experimental e computacional de vigas biapoiadas de concreto armado reforçadas à flexão com crfc**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PPGEC, Curitiba, PR, 2017, 229 p.

SILVA, R.J.C .PONTES, A.E.A. SILVA, R.F. **Análise Experimental de Vigas de Concreto Armado com Furos na Vertical**. Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural, 2016. Vol. 13, 21-41 p.

SILVA. A. S. C. **Análise de vigas de concreto armado reforçadas à flexão e ao cisalhamento com fibras de carbono: abordagem teórica e computacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Bahia, PPEE, Salvador, BA, 2016, 220 p.

SOARES. R.G.P. **Análise dos fatores intervenientes da fissuração de placa de piso de concreto apoiada sobre lajes de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, PPGCAM, Caruaru, PE, 2017, 104 p.