

Análises experimental e numérica de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com barras de aço usando a técnica near-surface mounted (NSM)

Experimental and numerical analysis of reinforced concrete beams strengthened in shear with steel bars using the near-surface mounted (NSM) technique

Leonardo Medeiros Costa¹ , Tiago Ancelmo de Carvalho Pires² , José Jéferson do Rêgo Silva² ,
Geilson Márcio de Alburquerque Vasconcelos³ 

¹Universidade Estadual da Paraíba. Rua Coronel Pedro Targino, s/n, Araruna, PB, Brasil.

²Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE, Brasil.

³Universidade Federal de Alagoas. Maceió, AL, Brasil.

e-mail: lmcosta@servidor.uepb.edu.br, tiago.poliveira@ufpe.br, jose.jrsilva@ufpe.br, geilson.vasconcelos@arapiraca.ufal.br

RESUMO

Há uma necessidade crescente de intervenção nas estruturas de concreto armado existentes para recuperar ou aumentar a sua capacidade resistente. O uso de materiais compósitos, como a fibra de carbono, tem sido eficiente, mas o custo ainda é um entrave. A aplicação de barras de aço como elemento de reforço apresenta-se como material alternativo e tecnicamente viável, porém existem poucos trabalhos na literatura. Desse modo, este trabalho realizou uma série experimental com três vigas de concreto armado sem armadura transversal, e reforçadas ao cisalhamento com barras de aço utilizando a técnica *near-surface mounted* (NSM). Foram monitorados no experimento a carga, o deslocamento e o padrão de fissuração. Os resultados demonstraram a eficiência do reforço com aumento de 69% da carga última e 63% da carga para surgimento das primeiras fissuras comparados a viga de referência. O reforço também aumentou a ductibilidade das vigas antes da ruptura brusca por cisalhamento. Modelos numéricos via método dos elementos finitos (MEF) foram realizados no *software* ABAQUS utilizando diferentes tipos de elementos e malhas. Os resultados numéricos foram validados com os resultados experimentais e foi observado que o uso de elementos quadráticos comparados a elementos lineares consegue representar melhor o padrão de fissuração e a capacidade de carga das vigas. A relação média dos resultados numérico/experimental para carga máxima das vigas reforçadas foi de 0,94.

Palavras-chave: Reforço estrutural; barras de aço; cisalhamento.

ABSTRACT

There is a growing need for intervention in existing structures to recover or increase strength capacity. The use of composite materials, such as carbon fiber, has been efficient, but cost is an obstacle. The application of steel bars as a strengthening element is an alternative and technically viable material, but there are few studies in the literature. This work carried out an experimental series with three reinforced concrete beams without transverse reinforcement, and strengthened in shear with steel bars using the near-surface mounted (NSM) technique. The load, displacement and cracking pattern were monitored in the experiment. The results demonstrated the efficiency of the strengthening with an increase of 69% in the ultimate load and 63% in the load for the appearance of the first cracks compared to the reference beam. The strengthening also increased the ductility of the beams before sudden shear failure. Numerical models via the finite element method (FEM) were carried out in the ABAQUS software using different elements and meshes. The numerical results were validated with the experimental results, and it was observed that the use of quadratic elements compared to linear elements can better represent the cracking pattern and the load capacity of the beams. The mean ratio of numerical/experimental results for maximum load of strengthening beams was 0.94.

Keywords: Structural strengthening; steel bars; shear.

1. INTRODUÇÃO

O reforço de estruturas de concreto armado tem diversas motivações, como: mudança do uso e ocupação, erros de projeto/execução, adequação a exigências normativas, danos causados por manifestações patológicas, situações de incêndio, entre outras.

A análise e compreensão das cargas atuantes e capacidades resistentes de um elemento estrutural, então, é imprescindível para definição do tipo de intervenção e do reforço necessário na estrutura. Neste sentido, destaca-se que as vigas de concreto armado requerem o aumento não apenas da capacidade resistente à flexão, mas também da capacidade resistente ao cisalhamento, conforme ressaltam RAHAL e RUMAIH [1]. Quanto às técnicas de reforço, ABDULLAH e KADIR [2] elencam os métodos clássicos: encamisamento, placas de aço coladas ou parafusadas, uso de materiais compósitos (FRP – *Fiber-Reinforced Polymer*) colados externamente (EBR – *Externally Bonded Reinforcement*) ou inseridos no concreto (NSM – *Near-Surface Mounted*).

Dentre os métodos e materiais, no uso de polímeros reforçados com fibra (FRP), a técnica NSM tem a sua comprovada eficiência e melhor desempenho comparado com a técnica EBR, conforme COELHO *et al.* [3]. Já a aplicação de barras de aço inseridas no concreto como reforço estrutural tem início nos anos 50, mas apenas nos anos 60, a indústria de epóxi implementou o adesivo no campo estrutural e levou a técnica NSM a um passo adiante [4]. Mais recentemente, nas últimas duas décadas, é que houve uma expansão dos trabalhos acerca da técnica NSM no reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado com o uso de barras e laminados de CFRP (*Carbon Fiber Reinforcement Polymer*), ver os primeiros trabalhos [5–8].

As pesquisas utilizando o aço convencional inserido no concreto se destacam porque não precisam aumentar a seção do elemento, como no encamisamento, e tem custo inferior comparado aos FRP. Apesar dessas vantagens, trabalhos experimentais sobre o reforço de vigas ao cisalhamento ainda são escassos e recentes, com destaque para RAHAL e RUMAIH [1], BREVEGLIERI *et al.* [9], KAMONNA e AL-ISSAWI [10], e AL-ISSAWI e KAMONNA [4]. Observa-se que o uso do aço tem apresentado um bom custo/benefício com o aumento de resistência, rigidez e ductibilidade, mas a quantidade de dados experimentais disponíveis e modelos numéricos para compreensão do sistema ainda não são suficientes para predição de uma recomendação normativa.

O reforço de vigas com o uso de barras de aço inseridas no concreto também apresenta quantidade limitada de trabalhos analisando o reforço à flexão, a saber: HOSEN *et al.* [11], DIAB *et al.* [12], e SALMAN e MANSOR [13]. Quanto ao reforço à torção destacam-se os trabalhos de ASKANDAR e MAHMOOD [14–16]. Estudos também foram conduzidos no reforço de consoles em vigas por Shakir e Alliwe [17] e paredes de alvenaria por BANADAKI *et al.* [18]. Essas pesquisas destacam o grande campo de aplicação e a necessidade de compreensão sobre o uso de aço convencional no reforço de estruturas sob diferentes solicitações, como se observa nos resultados encontrados pelos autores supracitados e descritos a seguir.

RAHAL e RUMAIH [1] apresentaram os resultados experimentais de quatro vigas reforçadas ao cisalhamento usando a técnica NSM com barras de FRP e aço convencional. Observaram aumento entre 37 a 92% da resistência ao cisalhamento, e o FRP apresentou uma carga em torno de 10% maior do que o reforço convencional de aço. BREVEGLIERI *et al.* [9] analisaram o reforço ao cisalhamento com barras de aço convencional usando a técnica ETS (*Embedded Through Section*), foi observado um aumento de 109 e 136% para vigas com e sem estribos, respectivamente.

KAMONNA e AL-ISSAWI [10] apresentaram uma proposta analítica para determinar a capacidade de resistência ao cisalhamento do reforço com aço e técnica NSM. Em seguida, AL-ISSAWI e KAMONNA [4] analisaram experimentalmente vigas com relação vão de cisalhamento (a/d) menor do que 2, classificação de viga-parede de acordo com a ACI 318 [19]. As vigas de referência não tinham estribos e foram analisados diferentes inclinações e espaçamentos para os reforços de aço convencional. O reforço mostrou-se eficiente e representou aumento de até 20,6%, sendo o aumento maior quando: o diâmetro do reforço aumentou, o espaçamento diminuiu e com a barra inclinada.

Os trabalhos com reforço à flexão de destaque, são: HOSEN *et al.* [11] que observaram um aumento significativo da capacidade de carga com reforço à flexão. DIAB *et al.* [12] analisaram a redistribuição de momentos no reforço à flexão de vigas com barras de aço e barras de CFRP, onde as vigas reforçadas com aço apresentaram menor deflexão de serviço. SALMAN e MANSOR [13] reforçaram vigas à flexão usando a técnica NSM com barras de aço e barras de GFRP (*Glass Fiber Reinforcement Polymer*) para diferentes adesivos. As capacidades à flexão das vigas reforçadas com barras de aço convencional foram maiores do que GFRP, no entanto, as barras de GFRP eram de menor diâmetro.

Os trabalhos com reforço à torção disponíveis são de ASKANDAR e MAHMOOD [14] que apresentaram resultados experimentais de vigas reforçadas à torção usando barras de aço e a técnica NSM comparadas com mantas de CFRP e técnica EBR. O reforço de aço se mostrou efetivo, mas a capacidade à torção com CFRP

foi mais eficiente. ASKANDAR e MAHMOOD [15] identificaram que para torção, as barras a 90° com o eixo da viga foram mais eficientes do que a 45° , e que o menor espaçamento entre os estribos inseridos aumenta a capacidade de carga. ASKANDAR e MAHMOOD [16] observaram que o uso de aço em espiral no reforço se mostrou ainda mais eficiente.

Trabalhos experimentais são importantes para compreensão do comportamento das estruturas. Porém, os custos elevados que demandam e a necessidade de uma infraestrutura laboratorial adequada, sinaliza a importância de desenvolver modelos numéricos que possam avaliar e representar o comportamento dos vários sistemas estruturais. Neste sentido, trabalhos recentes como os desenvolvidos por FUGIYAMA *et al.* [20] e SABAKA e MASHREIB [21] apresentam alternativas de modelos simplificados na utilização de *softwares* em elementos finitos, como o ANSYS e ABAQUS, respectivamente.

A quantidade limitada de trabalhos sobre o reforço de vigas de concreto, como apresentado, ressalta a necessidade de mais pesquisas experimentais e desenvolvimento de modelos numéricos haja vista a comprovada eficiência do reforço para diferentes solicitações (cisalhamento, flexão, torção). Portanto, o presente trabalho apresenta uma série experimental de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com barras de aço convencional inseridas no cobrimento do concreto, discutindo acerca da capacidade de carga, rigidez e modo de falha das vigas. Além disso, foi desenvolvido e apresentado também um modelo numérico para análise e validação da eficiência da técnica de reforço, analisando o tipo do elemento, o tipo de malha e o custo computacional envolvidos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Programa experimental

2.1.1. Amostras

Três vigas de concreto armado foram confeccionadas com seção transversal $100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$, comprimento de 1460 mm e vão livre de 1260 mm . As vigas foram moldadas sem armadura de cisalhamento e reforçadas posteriormente com barras de aço de $6,3\text{ mm}$ inseridas no cobrimento de 30 mm de concreto (técnica NSM) e coladas com adesivo epóxi, conforme apresentado na Figura 1. As barras de aço foram espaçadas a cada 250 mm com inclinação de 45° em relação ao eixo da viga, mantendo a mesma taxa de reforço e a previsão de falha por cisalhamento mesmo após o reforço.

As vigas foram identificadas como VSR (Viga sem Reforço) e VCR (Viga com Reforço). A diferença entre as vigas reforçadas está na ranhura com 10 mm de profundidade e 200 mm de comprimento realizada paralela ao eixo longitudinal da viga VCR-20. O corte longitudinal foi realizado com objetivo de avaliar a sua influência no direcionamento da fissura diagonal de cisalhamento, na hipótese de intercepção de uma maior quantidade de barras de reforço e consequentemente atingir uma capacidade de carga maior.

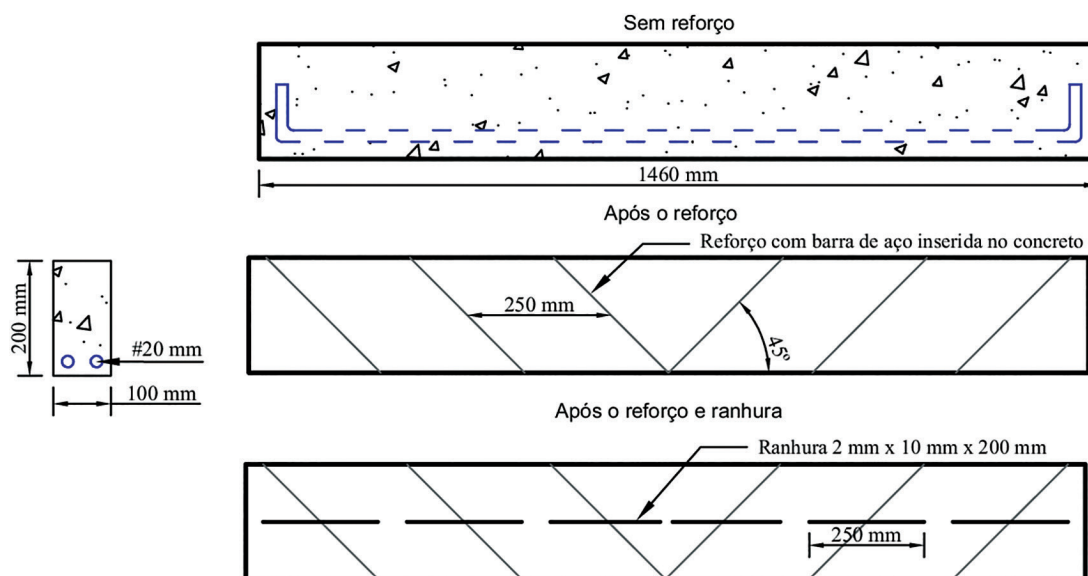


Figura 1: Seção transversal e detalhamento das vigas.

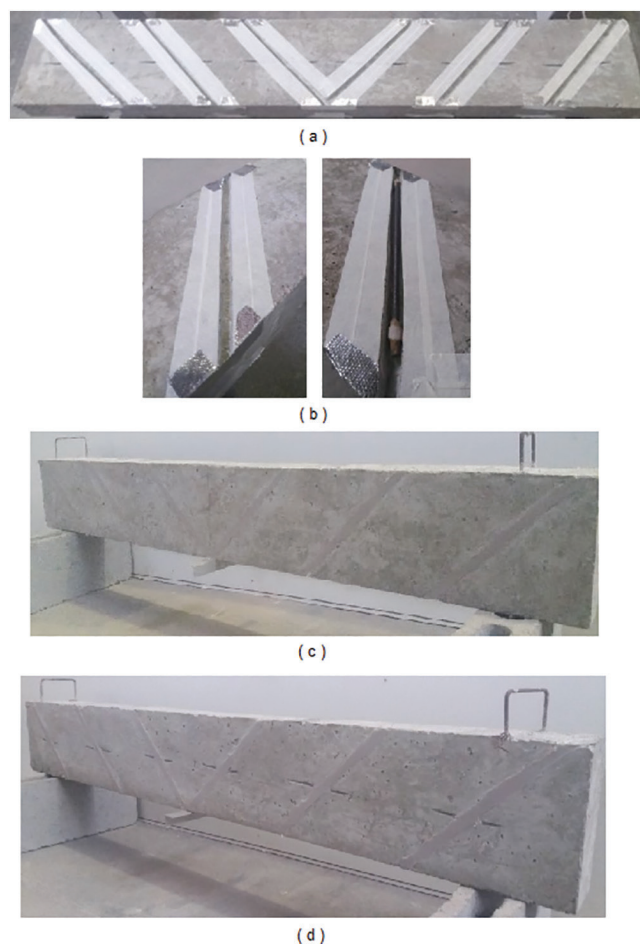


Figura 2: Detalhes (a) cortes para o reforço; (b) detalhe do corte e inserção da barra; (c) viga VCR-0 e (d) viga VCR-20.

Para inserção das barras de aço foram realizados cortes de $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ no cobrimento do concreto utilizando serra mármore e aplicado adesivo epóxi para preenchimento da ranhura e promover a aderência entre a barra de aço e o concreto. A Figura 2 apresenta a sequência para execução do reforço.

As vigas foram curadas por 28 dias antes da realização dos cortes e a aplicação do reforço. O ensaio mecânico de flexão a 3 pontos foi realizado 7 dias após a realização completa do reforço, onde todas as vigas, com e sem reforço, foram ensaiadas no mesmo dia.

2.1.2. Materiais

A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas do concreto, aço e adesivo. O concreto utilizado foi da classe C40 (f_{cm} de 39,5 MPa). Na oportunidade da confecção das vigas foram moldados três corpos de prova cilíndricos de $10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ para cada ensaio de compressão, de tração por compressão diametral e de módulo de elasticidade, conforme as normas NBR 5739 (ABNT, 2018) [22], NBR 7222 (ABNT, 2011) [23] e NBR 8522-1 (ABNT, 2021) [24], respectivamente.

O aço utilizado foi de classe CA-50 para as barras com diâmetros de 20 mm e 6,3 mm, e o adesivo epóxi foi o SIKADUR® Epóxi cujas as propriedades mecânicas foram especificadas pelos fabricantes. O modelo adotado na análise numérica para o aço e o adesivo epóxi foi o elástico-linear. A tensão de escoamento para o aço foi de 500 MPa e módulo de elasticidade de 210 GPa. As propriedades mecânicas do adesivo epóxi foram adotadas conforme informações do fabricante apresentadas na Tabela 1.

Para a análise numérica o modelo constitutivo adotado para o concreto foi o *Simplified Concrete Damage Plasticity* proposto por HAFEZOLGHORANI *et al.* [25], utilizando as propriedades mecânicas encontradas experimentalmente nesta pesquisa. A Figura 3 apresenta o modelo plástico adotado para o concreto.

Ainda para o modelo numérico foram adotados os parâmetros de plasticidade referentes ao modelo *Concrete Damaged Plasticity* foram *Dilation angle* (31°), *Eccentricity* (0,1), F_{b0}/f_{c0} (1,16), *K* (0,667), e *Viscosity* (10^{-5}).

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos materiais.

CONCRETO (MPa)		AÇO (MPa)		ADESIVO EPÓXI (MPa)	
f_{cm}	39,5	f_y	500	f_{ta}	60
f_{tm}	3,4	E_s	210.000	f_{fa}	35
E_c	27.800	ν	0,3	E_a	4970
ν	0,2	—	—	ν	0,37

Nota: f_{cm} : resistência média à compressão do concreto; f_{tm} : resistência média à tração do concreto; E : módulo de elasticidade; f_y : tensão de escoamento do aço; f_{ta} : resistência à compressão do adesivo aos 7 dias; f_{fa} : resistência à flexão do adesivo aos 7 dias; ν : coeficiente Poisson.

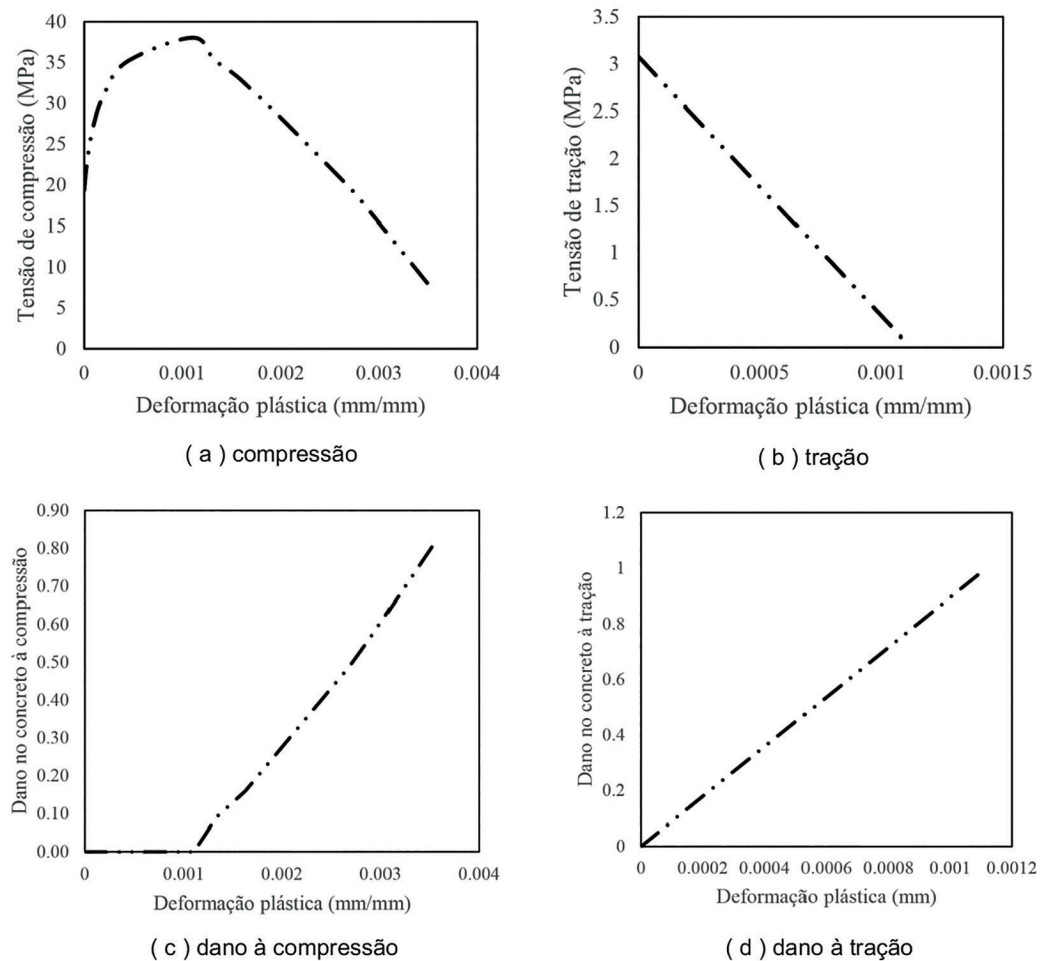


Figura 3: Modelo de dano plástico do concreto.

2.1.3. Teste experimental

A Figura 4 mostra o esquema de ensaio identificando a largura de cisalhamento (a/d) de 3,93, onde “ a ” é a distância da carga aplicada ao apoio e “ d ” é altura útil da viga. A série experimental discute sobre a eficiência do reforço ao cisalhamento na capacidade resistente da viga, na rigidez, no padrão de fissuração do concreto e no modo de falha das vigas. Para tanto, o ensaio de flexão em 3 pontos da viga (1), conforme disposto na Figura 5, contém instrumentação para medir deslocamento vertical no meio do vão (2) e carga aplicada (3).

O ensaio de flexão foi realizado em prensa hidráulica de capacidade de 3000 kN, a uma taxa média de aplicação de carga de 13 kN/mm. A carga foi monitorada com célula de carga de 500 kN e o deslocamento foi medido com LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) de 50 mm de curso. Um sistema composto com equipamento QuantumX, *software* Catman® e computador foram utilizados para aquisição de dados.

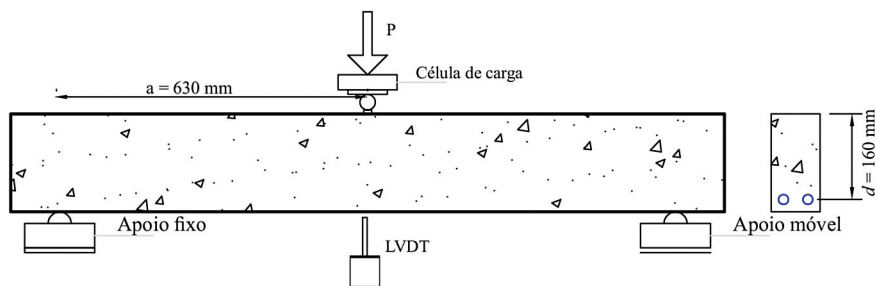


Figura 4: Esquema de flexão em 3 pontos.

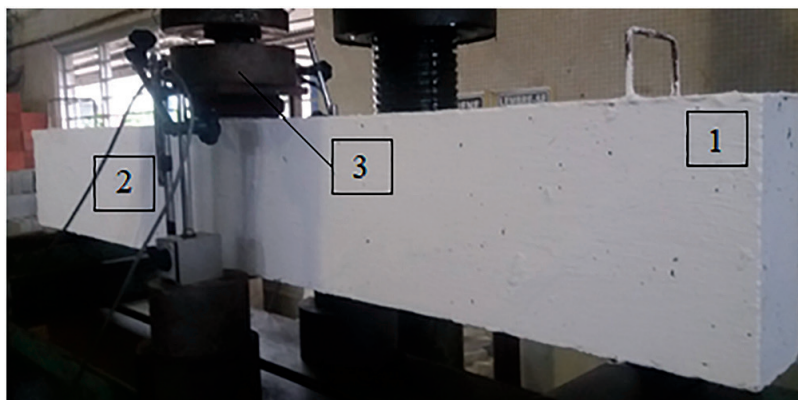


Figura 5: Ensaio de flexão e instrumentação.

2.2. Análise numérica

A análise numérica através de um modelo em elementos finitos foi desenvolvida no *software* CAE/ABAQUS [26]. Nesta análise foram avaliados o tipo de elemento, o tamanho da malha e o custo computacional, a fim de identificar o modelo que melhor estime a capacidade de carga da viga e o comportamento das fissuras encontradas experimentalmente. O tempo computacional foi avaliado com base em um computador com processador i7-4790 CPU @ 3.6 GHz com 8 GB de memória RAM.

2.2.1. Tipos de elemento finito e discretização

A escolha do tipo de elemento finito para o modelo ficou condicionado à geometria da viga de concreto e a opção de geração automática da malha. Neste sentido, foi adotado o mesmo elemento para as vigas com e sem reforço, e foram avaliados para o concreto dois elementos tetraédricos: C3D4 e C3D10, com ordens geométricas linear (4 nós) e quadrática (10 nós), respectivamente. A Figura 6 mostra os elementos utilizados para o concreto.

Já para as barras de aço longitudinal e transversal foram adotados os elementos B31 e T3D2, respectivamente, e para o adesivo epóxi foi o C3D8R. Os modelos analisados utilizaram elementos para o concreto com tamanhos máximos de 50 mm, 40 mm, 30 mm e 20 mm. A discretização e refino da malha foram usados para inferir sobre o modelo numérico que mais se aproxima do experimental com menor custo computacional.

Os resultados numéricos das vigas são apresentados seguindo a notação V-E-M, onde V é o tipo de viga (VSR ou VCR), E é o tipo de elemento (C3D4 ou C3D10) e M é o tamanho do elemento finito (50, 40, 30 e 20 mm). Então, a amostra VCR-C3D10-40mm representa a viga com reforço usando o elemento finito de ordem quadrática C3D10 e tamanho de 40 mm.

2.2.2. Modelagem numérica

As interações entre os materiais foram simplificadas. A ligação entre o concreto-aço na viga de concreto armado e adesivo-aço foi do tipo *Embedded Region*, a ligação entre adesivo-concreto foi colagem perfeita entre superfícies do tipo *Tie*, simplificações também adotadas por OBAIDAT *et al.* [27], OUDAH e EL-HACHA [28], ADEL *et al.* [29], e ABDALLAH *et al.* [30]. A Figura 7 mostra os modelos para as vigas sem reforço (VSR) e com reforço (VCR). Nela, é possível observar os materiais constituintes, detalhes e discretização.

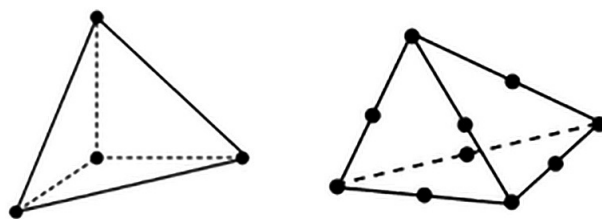


Figura 6: Tipos de elementos adotados para o concreto [23].

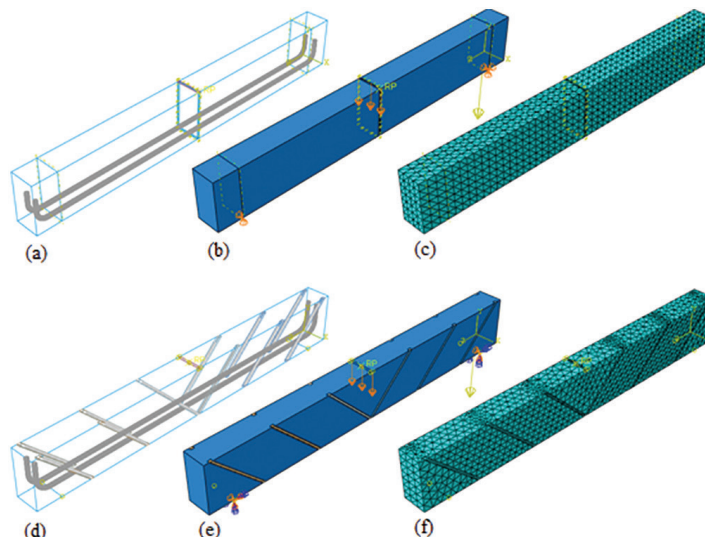


Figura 7: Modelos para as vigas sem reforço (a; b; c) e vigas com reforço (d; e; f).

3. RESULTADOS

3.1. Resultados da análise experimental

3.1.1. Modos de falha e padrão de fissuração

A falha das vigas, como projetado, foi por cisalhamento mesmo após o reforço (ver Figura 8). Os padrões de fissuração entre as vigas foram bem semelhantes, porém não foi observado sob esse critério, nenhuma influência dos cortes longitudinais no condicionamento das fissuras.

É perceptível, no entanto, que a fissura diagonal nas vigas reforçadas (VCR-0 e VCR-20) seguiu inclinada do ponto de aplicação da carga em direção à armadura longitudinal e, então, continuou paralela à armadura longitudinal até o apoio. Este fato pode ter sido motivado pela presença do reforço que transpassa a armadura de flexão na região tracionada, transmitindo esforços solicitantes da barra de reforço até a armadura de flexão.

Quanto ao surgimento de fissuras no concreto, as primeiras fissuras observadas foram de flexão para as cargas de 23 kN, 35 kN e 40 kN referente às vigas VSR, VCR-0 e VCR-20, respectivamente. Representando uma carga média de 63% maior na primeira fissura para as vigas com reforço, resultado dentro do intervalo de 23 a 85% observado por RAHAL e RUMAIH [1].

3.1.2. Capacidade resistente

A Figura 9 apresenta as curvas carga-deslocamento no meio do vão para as três vigas. As cargas máximas foram de 40,2 kN, 66,9 kN e 69,3 kN para as vigas VSR, VCR-0 e VCR-20, respectivamente.

Analisando a Figura 9 pode-se observar que a viga VCR-20 teve uma rigidez levemente superior, no entanto, apresentou uma perda de carga mais repentina do que VCR-0 após a carga máxima. Comparadas com a amostra de referência VSR, as vigas reforçadas apresentaram uma ruptura com comportamento dúctil, enquanto a viga sem reforço a falha foi brusca.

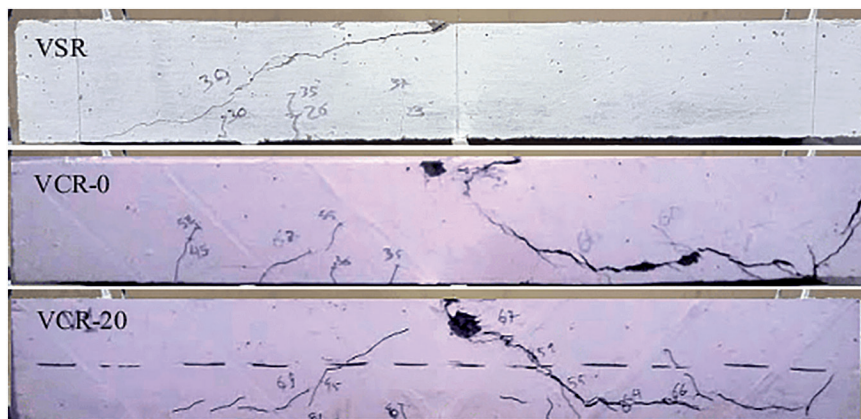


Figura 8: Fissuração e falha por cisalhamento das vigas.

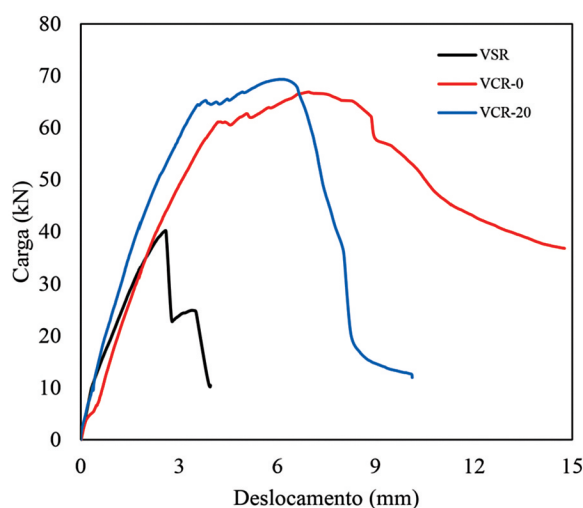


Figura 9: Curvas carga vs. deslocamento.

Houve uma diferença percentual de 3,68% para carga máxima entre as vigas reforçadas, resultado alinhado com o padrão de fissuração encontrado. Quando comparado ao resultado de referência sem reforço (VSR), o aumento médio foi 69,5% para as vigas reforçadas, aumento de mesma magnitude também observado por RAHAL e RUMAIH [1] que foi de 75% para vigas com seção transversal T e reforço a 45°.

3.2. Resultados da análise numérica

3.2.1. Vigas sem reforço

A Figura 10 ilustra o modo de falha observado experimental e numericamente para as vigas analisadas sem reforço.

Percebe-se nas Figuras 10(a) e 10(c) que o modelo com maior quantidade de nós (C3D10) consegue apresentar um padrão mais suave e com densidade de fissuras mais próximas ao experimento, com destaque para a fissura diagonal típica da falha por cisalhamento observada no experimento.

A Figura 11 mostra os resultados numéricos encontrados para curva carga-deslocamento das vigas de concreto armado sem reforço (VSR) utilizando os elementos (a) C3D4 e (b) C3D10. A Tabela 2 resume as cargas máximas encontradas e o custo computacional de cada modelo.

É possível verificar que os modelos com elementos de C3D4 apresentaram, para as malhas analisadas, maiores cargas máximas e um custo computacional muito abaixo dos modelos com elementos C3D10 que tem um aumento exponencial do custo computacional quando a malha é refinada.

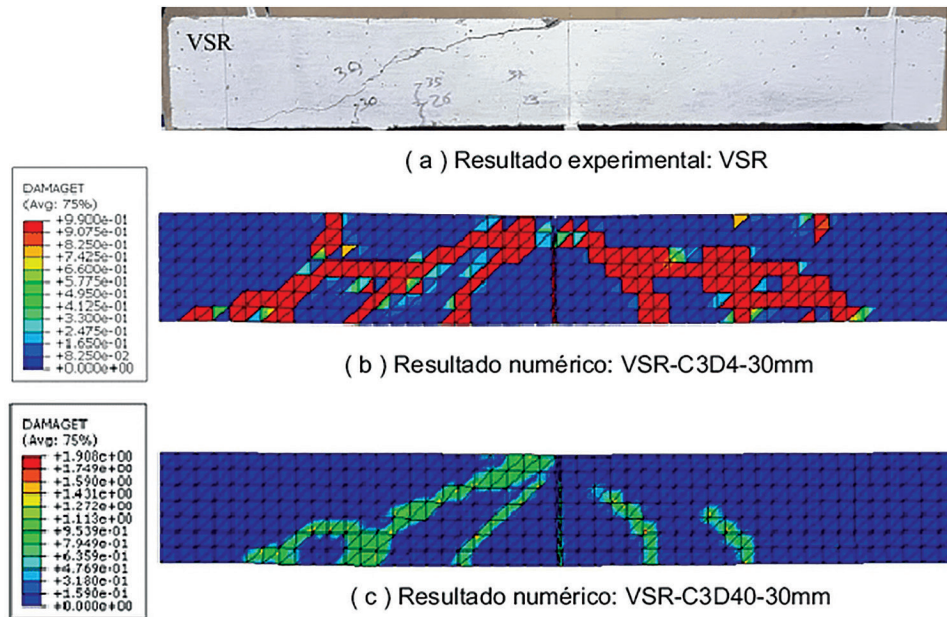


Figura 10: Padrão de fissuração na falha para viga sem reforço (a) experimental (b) numérico C3D4 e (c) numérico C3D10.

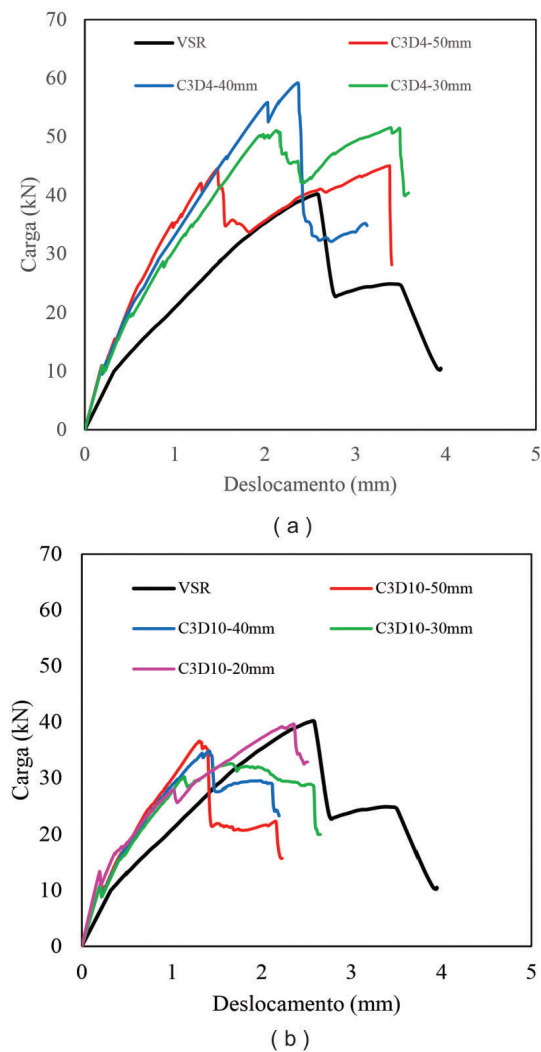
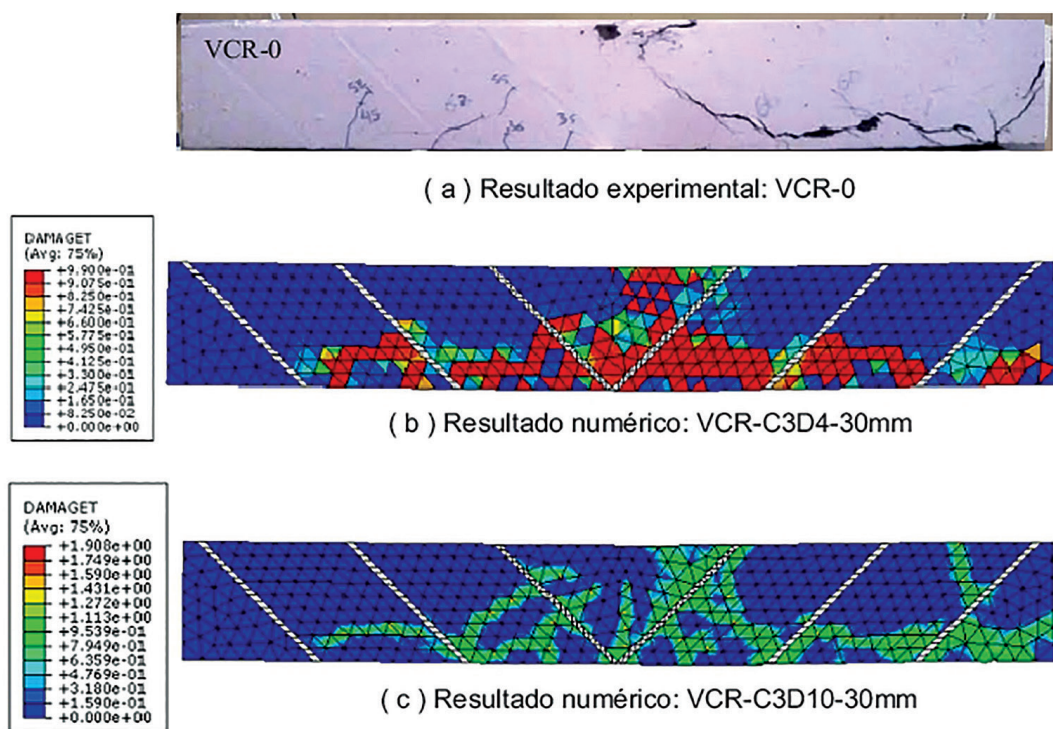


Figura 11: Carga-deslocamento para vigas sem reforço com elementos (a) C3D4 e (b) C3D10.

Tabela 2: Cargas máximas e custo computacional para vigas sem reforço.

ID	P	P_{num}/P_{exp}	TEMPO CPU
—	kN	—	h
Experimental	40,2	—	—
C3D10-50mm	36,6	0,91	3,03
C3D4-50mm	45,0	1,12	0,18
C3D10-40mm	34,8	0,86	9,03
C3D4-40mm	59,2	1,47	0,62
C3D10-30mm	32,5	0,81	17,03
C3D4-30mm	51,5	1,28	1,72

**Figura 12:** Padrão de fissuração na falha para resultado (a) experimental (b) numérico C3D4 e (c) numérico C3D10.

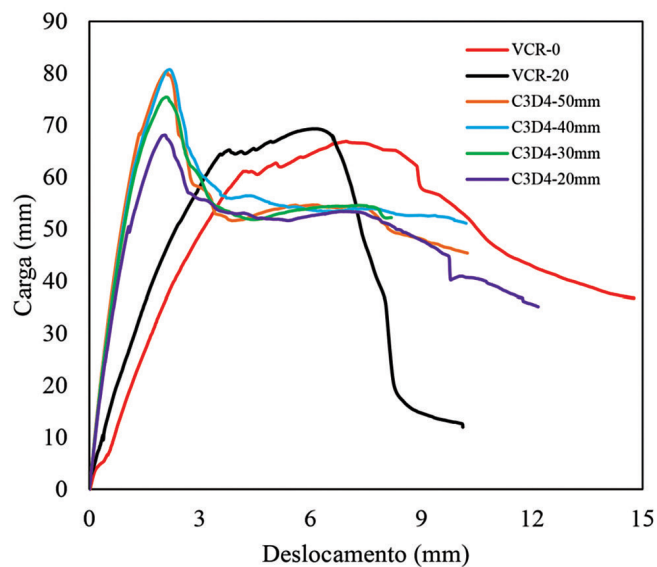
3.2.2. Vigas com reforço

A Figura 12 mostra o modo de falha encontrado nos modelos numéricos comparados ao observado experimentalmente na viga VCR-0, não sendo apresentada a VCR-20 pelo comportamento similar.

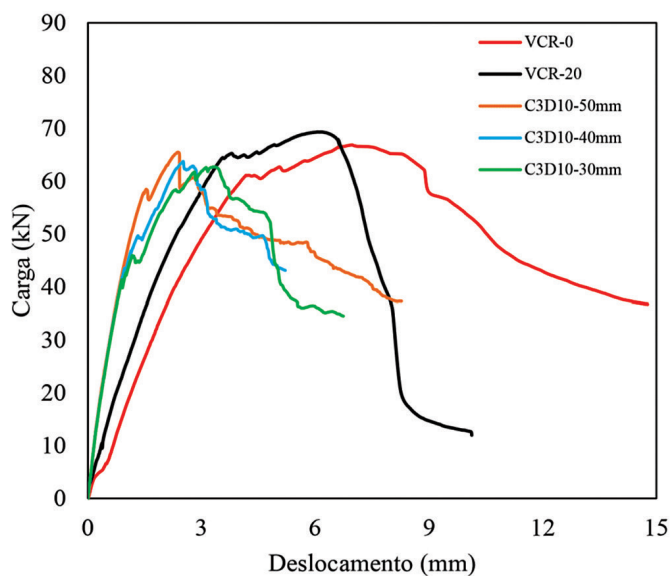
O padrão de fissuração e dano no concreto devido à tração nos modelos numéricos foram idênticos aos observados experimentalmente. Percebe-se também que o modelo com maior quantidade de nós (quadrático) consegue apresentar um padrão mais suave e com densidade de fissuras mais próximas ao experimento.

A Figura 13 mostra os resultados numéricos para as curvas carga-deslocamento das vigas de concreto armado com reforço (VCR) para elementos (a) C3D4 e (b) C3D10. A Tabela 3 resume as cargas máximas encontradas e o custo computacional de cada modelo.

É nítido o alto custo computacional do modelo utilizando o elemento C3D10. Percebe-se também que o refino da malha com elemento C3D4 tende a aproximar a carga máxima ao valor encontrado experimentalmente, tendo o valor exato para o modelo C3D4-20mm. Já no modelo com elemento C3D10, o refino tendeu a uma convergência, não justificando malhas menores (C3D10-20mm) devido ao alto custo computacional, cujo o valor médio para P_{num}/P_{exp} foi de 0,94.



(a)



(b)

Figura 13: Carga-deslocamento para vigas reforçadas com elementos (a) C3D4 e (b) C3D10.**Tabela 3:** Cargas máximas e custo computacional para vigas com reforço.

MODELO	P kN	P_{num}/P_{exp} —	TEMPO CPU h
Experimental	68,1*	—	—
C3D10-50mm	65,5	0,96	16,01
C3D4-50mm	80,3	1,18	0,60
C3D10-40mm	63,8	0,94	42,00
C3D4-40mm	80,6	1,18	0,74
C3D10-30mm	62,7	0,92	77,00
C3D4-30mm	75,4	1,11	1,33
C3D4-20mm	68,1	1,00	8,05

*valor médio.

Como é possível notar, os modelos numéricos conseguiram prever com razoável precisão visto que simplificações acerca da aderência entre os materiais foram incorporados aos modelos. Tanto os resultados experimentais quando numéricos convergiram para a efetividade da técnica NSM e o uso do aço no reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado, inclusive contemplando o mesmo padrão de fissuração na falha com as vigas reforçadas apresentando uma fissura paralela à armadura longitudinal.

4. CONCLUSÕES

Uma série experimental com vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com barras de aço inseridas no cobrimento do concreto e uma análise numérica foram realizados. Das análises dos resultados, foi possível concluir:

- O reforço ao esforço cortante com barras de aço inseridas no concreto e coladas com adesivo epóxi, utilizando a técnica NSM, é efetivo no aumento da capacidade de carga;
- As vigas reforçadas aumentaram a capacidade de carga em até 69%;
- O padrão de fissuração no concreto foi alterado com a presença do reforço, apresentando comportamento dúctil das vigas antes da falha;
- A carga para surgimento das primeiras fissuras foi 63% maior para as vigas reforçadas, melhorando o desempenho de serviço das mesmas;
- O modelo numérico desenvolvido foi capaz de prever a capacidade de carga com razoável precisão com os resultados experimentais.
- Os elementos finitos quadráticos apresentaram melhor comportamento. A relação média numérico/experimental para as cargas últimas foram de 0,86 e 0,94 para as vigas sem reforço e com reforço, respectivamente.

O método e o material apresentados para o reforço de estruturas de concreto, como observado, foram eficientes e apresentam-se como alternativa viável no reforço de vigas ao cisalhamento. É pertinente destacar que o presente estudo apresentou limitações no estudo experimental por não variar a resistência do concreto, a taxa de reforço, e a esbeltez da viga. Já o modelo numérico apresentou limitações quanto ao processador utilizado, simplificações ao modelar as interfaces entre os materiais e no tamanho das malhas. Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se avaliar essas limitações, através de programas experimentais e/ou numéricos.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] RAHAL, K., RUMAIH, H.A., “Tests on reinforced concrete beams strengthened in shear using near surface mounted CFRP and steel bars”, *Engineering Structures*, v. 33, n. 1, pp. 53–62, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.017>.
- [2] ABDULLAH, A.H., KADIR, D.R.A., “NSM FRP reinforcement for strengthening reinforced concrete beams-overview”, In: *1st International Conference on Engineering and Innovative Technology*, Erbil, Kurdistan Region, Iraq, 12–14 April 2016.
- [3] COELHO, M.R.F., SENA-CRUZ, J.M., NEVES, L.A.C., “A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 93, pp. 1157–1169, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.010>.
- [4] AL-ISSAWI, A.S.H., KAMONNA, H.H., “Experimental study of RC deep beams strengthened by NSM steel bars”, *Materials Today: Proceedings*, v. 20, n. pt. 4, pp. 540–547, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.186>.
- [5] DE LORENZIS, L., NANNI, A., “Shear strengthening of reinforced concrete beams with near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods”, *ACI Structural Journal Technical Paper*, v. 98, n. 1, pp. 60–68, 2001. doi: <https://doi.org/10.14359/10147>.
- [6] NANNI, A., DI LUDOVICO, M., PARRETTI, R., “Shear strengthening of a PC bridge girder with NSM CFRP rectangular bars”, *Advances in Structural Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 297–309, 2004. doi: <https://doi.org/10.1260/1369433041653570>.
- [7] DIAS, S.J.E., “Investigação experimental e analítica no reforço ao corte de vigas de betão armado com a técnica da inserção de laminados de CFRP”, Tese de D.Sc., Universidade do Minho, Braga, 2008.
- [8] ANWARUL ISLAM, A.K.M., “Effective methods of using CFRP bars in shear strengthening of concrete girders”, *Engineering Structures*, v. 31, n. 3, pp. 709–714, 2009. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.11.016>.

- [9] BREVEGLIERI, M., APRILE, A., BARROS, J.A.O., “Shear strengthening of reinforced concrete beams strengthened using embedded through section steel bars”, *Engineering Structures*, v. 81, pp. 76–87, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.026>.
- [10] KAMONNA, H.H., AL-ISSAWI, A.S.H., “Estimation of maximum shear capacity of RC deep beams strengthened by NSM steel bars”, *Journal of University of Babylon, Engineering and Science*, v. 26, n. 3, pp. 13–22, 2018.
- [11] HOSEN, M.A., *et al.*, “Flexural strengthening of RC beams with NSM steel bars”, *International Conference on Food, Agriculture and Biology*, pp. 8–13, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.15242/IICBE.C61451>.
- [12] DIAB, H.M.A., *et al.*, “Moment redistribution and flexural performance of RC continuous T-beams strengthened with NSM FRP or steel bars”, *Structures*, v. 28, pp. 1516–1538, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.003>.
- [13] SALMAN, W.D., MANSOR, A.A., “Fibrous geopolymer paste composites for near-surface-mounted strengthening of reinforced concrete beams in flexure”, *Case Studies in Construction Materials*, v. 14, pp. e0052, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00529>.
- [14] ASKANDAR, N., MAHMOOD, A., “Comparative investigation on torsional behaviour of RC beam strengthened with CFRP Fabric Wrapping and Near-Surface Mounted (NSM) steel bar”, *Advances in Civil Engineering*, pp. 9061703, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2019/9061703>.
- [15] ASKANDAR, N., MAHMOOD, A., “Torsional strengthening of RC beams with near-surface mounted steel bars”, *Advances in Civil Engineering*, pp. 1492980, 2020. doi: <https://doi.org/10.1155/2020/1492980>.
- [16] ASKANDAR, N., MAHMOOD, A., “Torsional strengthening of RC Beams with continuous spiral near-surface mounted steel wire rope”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 14, pp. 7, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1186/s40069-019-0386-4>.
- [17] SHAKIR, Q.M. and ALLIWE, R., “Strengthening the self compacting reinforced concrete dapped ends with Near Surface Mounted (NSM) steel bar technique”, *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, v. 11, n. 2, pp. 663–673, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.18517/ijaseit.11.2.8059>.
- [18] BANADAKI, H.M., *et al.*, “Near-surface-mounted retrofitting of damaged/undamaged adobe walls using steel bars: Analytical evaluation of experimental results”, *Structures*, v. 28, pp. 2111–2121, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.020>.
- [19] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, *ACI 318R-19: Building Code Requirements for Structural Concrete*, Indianapolis, American Concrete Institute, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.14359/51716937>.
- [20] FUGIYAMA, M.M., *et al.*, “Estudos numérico-experimentais de vigas de concreto armado com reforço de fibra de carbono”, *Revista Matéria*, pp. e13093, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210004.1393>.
- [21] SAKBANA, A., MASHREIB, M., “Análisis de elementos finitos de Vigas de Hormigón Armado CFRP”, *Revista de Ingeniería de Construcción*, v. 35, n. 2, pp. 148–169, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732020000200148>.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 5739: Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7222: Concreto e Argamassa — Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2011.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos Módulos de Elasticidade e de Deformação, Parte 1: Módulos Estáticos à Compressão*, Rio de Janeiro, ABNT, 2021.
- [25] HAFEZOLGHORANI, M., HEJAZI, F., VAGHEI, R., *et al.*, “Simplified damage plasticity model for concrete”, *Structural Engineering International*, v. 1, n. 1, pp. 68–78, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.2749/101686616X1081>.
- [26] SIMULIA CAE/ABAQUS, *Analysis user’s manual. ABAQUS 2019 Documentation*, Providence, SIMULIA CAE/ABAQUS, 2019.
- [27] OBAIDAT, Y.T., HEYDEN, S., DAHLBLOM, O., “The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modelling retrofitted RC beams with FEM”, *Composite Structures*, v. 92, n. 6, pp. 1391–1398, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.11.008>.

- [28] OUDAH, F., EL-HACHA, R., “Non-linear finite element modeling of RC beams strengthened using prestressed NSM CFRP rods under cyclic loading”, In: *Conference: The 6th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures* (ACMBS, 2012), Kingston, Ontario, Canada, 22–25 May 2012.
- [29] ADEL, B., *et al.*, “Modeling of CFRP strengthened RC beams using the SNSM technique, proposed as an alternative to NSM and EBR techniques”, *Frattura ed Integrità Strutturale*, v. 14, n. 54, pp. 21–35, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.3221/IGF-ESIS.54.02>.
- [30] ABDALLAH, M., AL MAHMOUD, F., TABET-DERRAZ, M.I., *et al.*, “Experimental and numerical investigation on the effectiveness of NSM and side-NSM CFRP bars for strengthening continuous two-span RC beams”, *Journal of Building Engineering*, v. 41, pp. 102723, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102723>.