

Estudos numérico-experimentais de vigas de concreto armado com reforço de fibra de carbono

Numerical-experimental studies of reinforced concrete beams reinforced with carbon fiber

Michele Miwa Fugiyama¹, Nádia Cazarim da Silva Forti¹,
Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila Jacintho¹, Lia Lorena Pimentel¹,
Isabela Oliveira Duarte¹, Jakeline Dutra dos Santos¹

¹ Pontifícia Universidade Católica de Campinas (*PUC-Campinas*), Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia (CEATEC), Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Rua Professor Doutor Euryclides de Jesus Zerbini, 1516, CEP: 13087-571, São Paulo, Campinas, Brasil.

e-mail: michele.mf1@puccampinas.edu.br, isabela.od1@puccampinas.edu.br, jakeline.ds1@puccampinas.edu.br, nadia.cazarim@puc-campinas.edu.br, anajacintho@puc-campinas.edu.br, lialp@puc-campinas.edu.br.

RESUMO

Em algumas construções são necessárias intervenções para restabelecer ou aumentar a capacidade de suporte da estrutura antes de atingir um estado limite. Os Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (CFRP) são um dos mais adequados como elemento de reforço estrutural por ser um material de alto desempenho mecânico e elevado módulo de elasticidade, resistência à fadiga e baixo peso específico. Este trabalho teve como objetivo analisar a eficiência de materiais compósitos de Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (CFRP) como reforço estrutural em vigas de concreto armado, por meio de ensaios experimentais e simulação numérica. Nos ensaios, a armadura da viga de concreto foi dimensionada com resistência insuficiente ao cisalhamento. Nas vigas de referência, inicialmente, surgiram fissuras de cisalhamento, e em seguida as vigas romperam-se à flexão. Nas vigas com CFRP, que foram dimensionadas como reforço ao cisalhamento, as vigas não apresentaram fissuras de cisalhamento e romperam à flexão. Não houve acréscimo significativo da carga máxima. Em apenas uma viga houve o descolamento da fibra de carbono em um dos bordos da estrutura, mostrando boa eficiência do adesivo utilizado. As simulações numéricas foram realizadas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) no software ANSYS 18.1. Os resultados obtidos no modelo numérico ficaram próximos aos resultados experimentais.

Palavras-chave: Reforço estrutural, Fibra de carbono, Experimental, Simulação numérica.

ABSTRACT

Eventually, some buildings must be restored or their structural capacity increased. Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) are the most indicated as structural reinforcement due to their high mechanical performance with high Young's modulus, resistance to fatigue and low density. This work aimed at the efficiency of composite materials of CFRP as a structural reinforcement in concrete beams. The mechanical behavior is studied by means of experimental tests and numerical simulations. Steel bars and stirrups were designed with insufficient resistance to shear efforts. In reference beams, i.e. without CFRP reinforcement, shear cracks appear initially, but then the beams failed in flexure. The CFRP reinforcement were designed to increase shear capacity. Thus, shear cracks do not appear and the beams failed in flexure. The maximum load values did not increase significantly. Only one CFRP strip detached during the tests, indicating a good efficiency of the adhesive used. Numerical simulations were performed using the Finite Element Method (FEM) in ANSYS 18.1 software. The numerical and experimental results are in good agreement.

Keywords: Structural reinforcement, Carbon fiber, Experimental, Numerical simulation.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas são construídas com a garantia de que serão atendidas suas condições de utilização e não apresentarão danos que possam comprometer suas funções para as quais foram planejadas. Sendo assim, as construções devem atender aos requisitos mínimos de qualidade baseados em normas técnicas, garantindo resistência, durabilidade e desempenho de serviço.

Em algumas estruturas de concreto existentes se faz necessário aplicação de reforço para resistir a cargas de projeto mais elevadas, corrigir a perda de resistência devido à deterioração, corrigir deficiências de projeto, construção ou aumentar a ductilidade. Para isso, são utilizados materiais convencionais e técnicas de construção como, chapas de aço e perfis metálicos, encamisamento com aço ou concreto com fibras metálicas e protensão externa. Materiais compósitos feitos a partir de fibras em uma resina polimérica, conhecidas como Polímero Reforçado com Fibra (FRP) surgiram como alternativa para elementos tradicionais em reparos e reabilitações de estruturas. São materiais leves, não corrosivos e apresentam alta resistência à tração [1].

A pesquisa e utilização de materiais compósitos na construção civil teve início no Japão, em meados da década de 80, em decorrência dos inúmeros abalos sísmicos que atingem o país. Como consequência destes tremores, surgiram frequentes problemas e danos para as estruturas e, assim, tornou-se necessária a busca por soluções para recuperar as construções e reforçá-las, a fim de permitir maior segurança. Nos Estados Unidos esse material foi inicialmente utilizado pela NASA em projetos aeroespaciais, com posterior aplicação na indústria automobilística e bélica [2].

Polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP) em forma de placa e laminado podem aumentar a capacidade de flexão e cisalhamento de vigas de concreto. Os materiais compósitos de CFRP apresentam algumas vantagens sobre os elementos tradicionais de reforço como facilidade de aplicação, baixa densidade, alta resistência à tração e propriedades anti-corrosivas [3].

HAWILEH *et al.* [4], em seus estudos, analisou o efeito de mantas de CFRP aplicadas externamente na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto. Foi examinado a contribuição da taxa de armadura longitudinal de flexão no aumento da resistência ao cisalhamento das vigas. Treze vigas sem armadura transversal no vão de cisalhamento foram moldadas e divididas em três grupos com diferentes relações de armadura longitudinal. As amostras romperam ao cisalhamento em decorrência de uma fissura próxima aos apoios. O aumento na capacidade de cisalhamento do concreto de corpos de prova reforçados estava na faixa de 10% a 70% em comparação com as amostras de controle. Isso conclui que a taxa de armadura longitudinal à flexão tem um efeito significativo na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado.

MAHENDRA *et al.* [5] elaborou uma análise experimental em que foram moldadas vigas de concreto armado utilizando reforço de fibra de carbono e fibra de vidro. Este estudo tinha como objetivo apresentar a melhor técnica de reforço para vigas na flexão e no cisalhamento utilizando fibras de carbono e de vidro. Na análise experimental foram moldadas vigas de referência e reforçadas com CFRP. Em uma viga, o reforço foi aplicado totalmente na parte inferior. Na segunda, foram utilizadas faixas de 50 mm espaçadas a cada 50 mm nas laterais da viga, em ambos os lados. A terceira foi reforçada com a fibra de carbono aplicada na parte inferior e também com as faixas de 50 mm nas laterais, em ambos os lados. Observou-se que a viga utilizando reforço de carbono se mostrou mais resistente, além disso, a viga que apresentou melhor resultado foi a terceira, em que houve um acréscimo de 65% da carga em relação às vigas de referência. Isso mostra a qualidade dessa técnica para o reforço de vigas, tanto na flexão quanto no cisalhamento.

Nos estudos de AKROUSH *et al.* [6], investigou-se a aplicação do reforço ao cisalhamento de CFRP em vigas de concreto nas zonas combinadas de cisalhamento e tensões normais. Para este propósito, vigas contínuas de dois vãos foram reforçadas nas proximidades do suporte com folhas de polímeros reforçados com fibra de carbono, envolta em U. Oito vigas foram ensaiadas em que duas eram amostras de controle sem a utilização de reforço e as seis restantes com a aplicação de malha de CFRP em diferentes configurações. Os resultados do ensaio mostraram que a lâmina de CFRP apresentou contribuição significativa para resistência ao cisalhamento, em que a carga resistida pela viga até o surgimento da primeira fissura foi de 21% a 47% maior nas vigas reforçadas. Este aumento da resistência é mais alto nas vigas que foram envoltas pelo reforço ao longo de toda a extensão da viga.

OLLER, PUJOL e MARÍ [7] realizaram um ensaio experimental em que foram reforçadas vigas T ao cisalhamento com mantas de CFRP como reforços externos com configurações em U, contínuas e descontínuas, com e sem ancoragens mecânicas. Os resultados mostraram que a existência da ancoragem atrasou ou evitou o descolamento da fibra de carbono, desempenhando uma melhor performance.

HABIB *et al.* [8] tinha como foco em seus estudos analisar o reforço de vigas de concreto armado com CFRP utilizando análise não linear de elementos finitos. ANSYS foi utilizado para a construção de modelos e

para o estudo dos efeitos de parâmetros importantes na resposta de vigas reforçadas à flexão e ao cisalhamento. Os resultados numéricos apresentam valores mais altos para a capacidade de carga que pode ser devido a suposição de ligação perfeita entre aço e o concreto e concreto com o CFRP, além de desprezar as microfissuras do concreto. Concluiu-se, por fim, que a capacidade ao cisalhamento e à flexão aumentaram com a utilização das camadas de CFRP e envoltórios em U, sendo que foi mais efetivo o envoltório em U se comparado as camadas de reforço.

PIVATTO [9], em seu trabalho, elaborou uma análise com o objetivo de verificar o comportamento de vigas biapoiadas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono (CRFC), por meio de análise experimental e por simulação numérica. Foram moldadas vigas de referência com 1 camada de reforço e outra com 2 camadas de fibra de carbono. Nos gráficos comparativos entre os ensaios de laboratório e as simulações pode-se observar uma similaridade entre as curvas de deslocamento dos modelos computacionais em comparação aos resultados dos ensaios experimentais, principalmente no caso da viga com 2 camadas de CRFC. Apenas a simulação da viga de referência apresentou um deslocamento consideravelmente inferior ao encontrado em laboratório. O modelo computacional da viga de referência se mostrou como uma boa representação do ensaio experimental, visto que o valor da carga de ruptura foi 3,5% inferior ao experimental. Observou-se que a utilização de 2 camadas influenciou no deslocamento vertical máximo sofrido pela viga. Para a viga reforçada com duas camadas, o deslocamento foi 48% menor que o da viga referência. Além disso, com o reforço, houve um aumento de aproximadamente 30 kN na resistência da viga na flexão.

O presente trabalho tem como objetivo a análise do comportamento de vigas de concreto armado com reforço externo de fibra de carbono, por meio de ensaios experimentais e de simulação numérica, a fim de maior esclarecimento sobre o comportamento do elemento utilizando esse tipo de reforço.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Programa experimental

O programa experimental foi desenvolvido para a verificação do comportamento mecânico de vigas submetidas à flexão em um ensaio a quatro pontos, como pode ser visto na Figura 1.

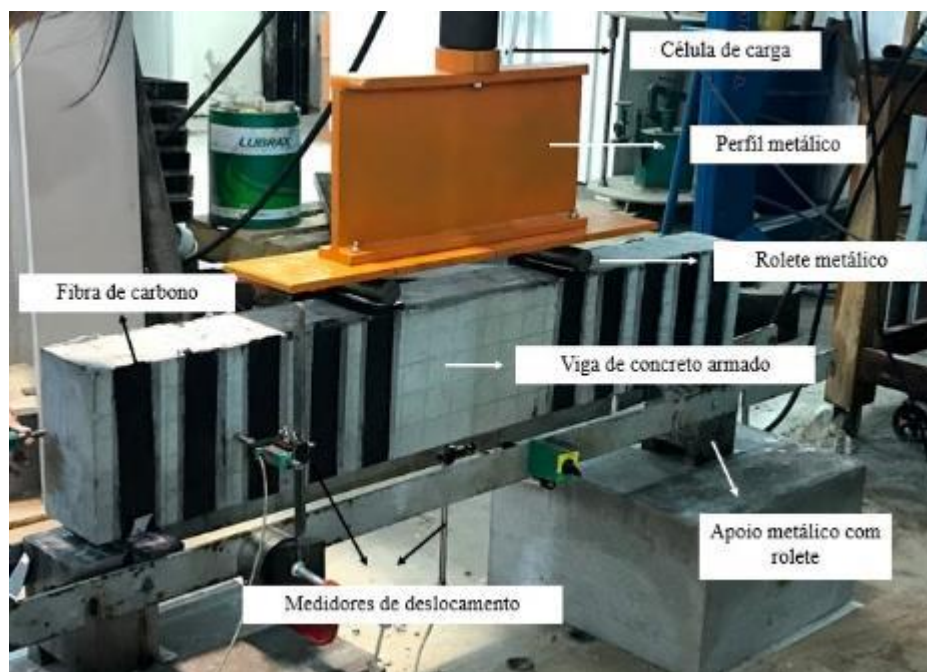


Figura 1: Esquema do ensaio.

As vigas de concreto foram dimensionadas com armadura transversal insuficiente. Dessa forma, pretendeu-se induzir a ruptura do elemento por cisalhamento, acentuando a solicitação dos estribos. Foram molda-

das seis vigas, sendo três utilizadas para referência (sem reforço) e três para aplicação de reforço de CFRP. Também foram moldados doze corpos de prova cilíndricos para ensaios de compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e quatro corpos de prova prismáticos para determinação da resistência à tração na flexão. Para as vigas moldadas, as dimensões podem ser vistas na Figura 2.

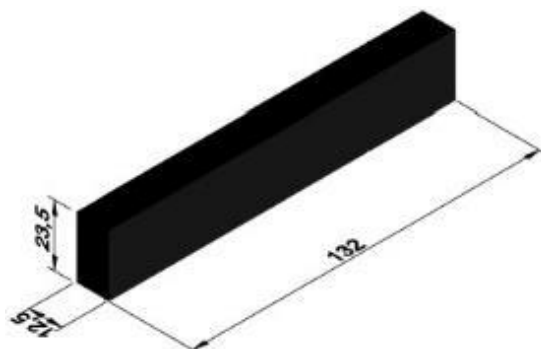


Figura 2: Dimensões da viga de concreto armado confeccionada.

A Figura 3 apresenta o detalhamento da armadura da viga, bem como a disposição dos extensômetros indicados por E1 e E2, que fizeram a leitura da deformação da armadura.

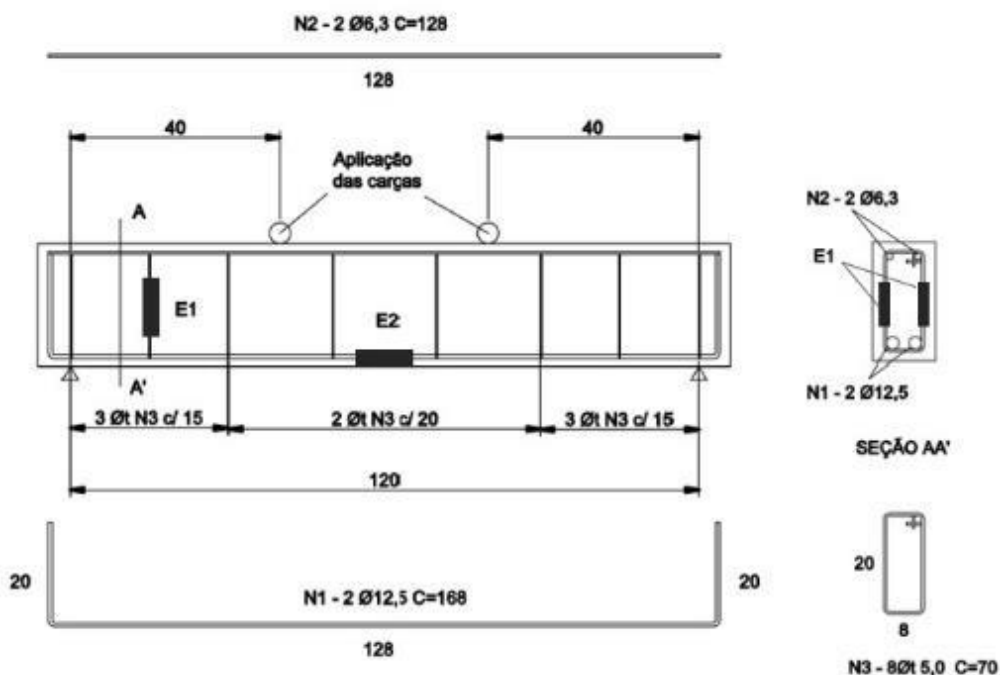


Figura 3: Detalhamento da armadura da viga.

As vigas foram dimensionadas com armadura transversal insuficiente a fim de induzir a ruptura do elemento por cisalhamento e acentuar a sollicitação dos estribos. A Figura 4 apresenta o detalhamento da fibra de carbono aplicada dimensionado para reforçar a estrutura ao cisalhamento. Para tanto foram utilizadas faixas em forma de U com 5 cm espaçadas a cada 10 cm a partir do eixo.

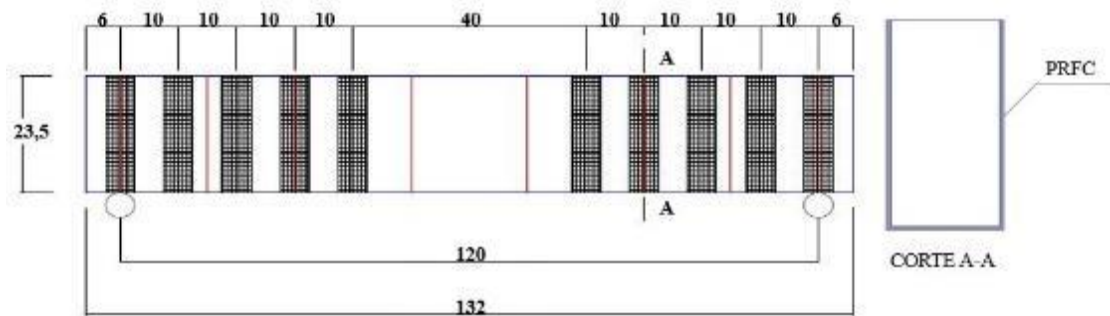


Figura 4: Detalhamento do reforço de CFRP.

2.2 Materiais

Os materiais utilizados para a moldagem das vigas estão apresentados nos itens a seguir:

- o cimento utilizado foi o CP V Ari, com massa específica de $3,13 \text{ g/cm}^3$. É um produto de rápida desforma e possui alta resistência inicial, oferecendo maior plasticidade;
- o agregado graúdo possui dimensão máxima característica de $19,0 \text{ mm}$ e massa específica de $2,74 \text{ g/cm}^3$. O agregado miúdo apresentou módulo de finura de $2,52$ e massa específica $2,65 \text{ g/cm}^3$. A curva granulométrica dos agregados miúdo e graúdo, respectivamente, estão apresentadas na Figura 5;
- o aditivo utilizado tinha base em policarboxilato, desenvolvido para dar extrema trabalhabilidade sem causar segregação ao concreto, de massa específica $1,06 \text{ g/cm}^3$;
- o sistema de reforço de fibra de carbono utilizado foi o MC-DUR CF-Sheets e suas características fornecidas pelo fabricante podem ser vistas na Tabela 1.

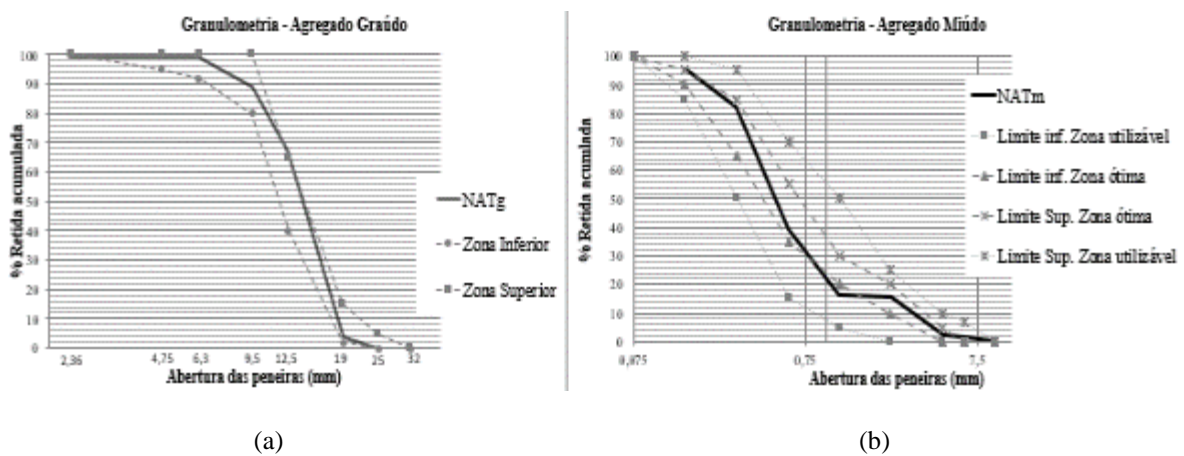


Figura 5: Granulometria dos agregados graúdo (a) e miúdo (b).

Tabela 1: Especificações da fibra de carbono MC-DUR CF-Sheets.

PESO PRÓPRIO (g/m ²)	ESPESSURA (mm)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	E (GPa)	LARGURA (mm)	SENTIDO DAS FIBRAS
300	0,172	3860	242	300	Fibras unidirecionais

1.

A dosagem do concreto se encontra na Tabela 2.

Tabela 2: Dosagem do concreto.

CIMENTO (kg/m ³)	ÁGUA (kg/m ³)	AGREGADO MIÚDO (kg/m ³)	AGREGADO GRAÚDO (kg/m ³)	ADITIVO (kg/m ³)
406	203	728,5	1075,9	0,406

2.3 Aplicação do reforço de fibra de carbono

A sequência para a execução dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono pode ser assim resumida:

- imprimação da superfície com imprimador epoxídico com alto teor de sólidos a fim de estabelecer uma ponte de aderência entre o substrato e o compósito, também regulariza as imperfeições superficiais, melhorando a aderência entre a superfície e o reforço [10];
- aplicação da primeira camada de resina para impregnar (saturar) a lâmina de fibra de carbono e aderir-la à superfície. O adesivo epóxi deve ser aplicado no substrato usando uma desempenadeira metálica, com espessura de pelo menos 0,5 mm [10, 11] (Figura 6-a);
- a manta de fibra de carbono é pressionada contra o adesivo ainda fresco usando um rolo apropriado com discos metálicos e, em seguida, a manta é impregnada com a resina de laminação aplicada com rolo de cerdas curtas. Deve-se tomar cuidado durante a aplicação, para que a manta de fibra de carbono seja completamente saturada com a resina [11] (Figura 6-b);
- aplicação da segunda camada de resina para completar a impregnação e terminando de conformar a matriz que envelopa o sistema [10];
- se for usada em superfícies expostas à intempérie, a manta de fibra de carbono deve ser protegida contra a incidência de sol pela aplicação de um sistema de proteção superficial [11].


Figura 6: Aplicação da resina (a) e colocação da manta de fibra de carbono (b).

2.4 Modelagem numérica

Na simulação numérica, utilizando o software ANSYS, foram modeladas duas vigas de concreto armado, sendo uma referência e uma reforçada com fibra de carbono. Os elementos utilizados para a sua representação foram o SOLID65 para o concreto, LINK180 para as barras e estribos de aço e SHELL181 para a manta de reforço de fibra de carbono.

O elemento SOLID65 (Figura 7) possui 8 nós, cada nó com três graus de liberdade, sendo eles translações nas direções x, y e z. Ele pode representar a compressão e a tração no concreto, apresentando fissuras e deformação plástica e se destaca pela capacidade de representar propriedades não lineares do concreto.

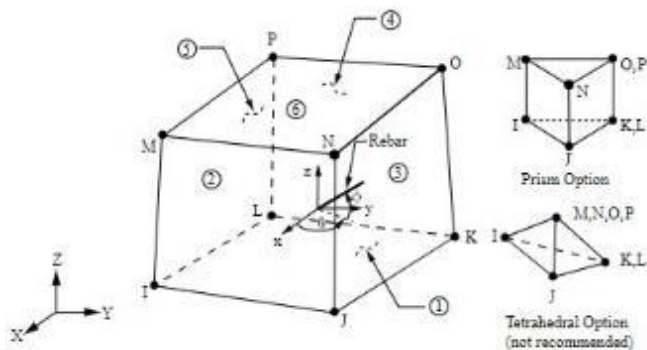


Figura 7: SOLID65 [13].

A armadura de aço foi representada pelo elemento LINK180 (Figura 8). Este elemento apresenta dois nós com três graus de liberdade cada. Pode representar a deformação plástica e lei de endurecimento [12].



Figura 8: LINK180 [12].

O elemento SHELL181 (Figura 9), que representa o reforço de fibra de carbono, é um elemento bidimensional. Tem quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó, 3 translações e 3 rotações. Quando aplicada a opção de membrana, como utilizado neste trabalho, o elemento tem apenas graus de liberdade de translação [12].

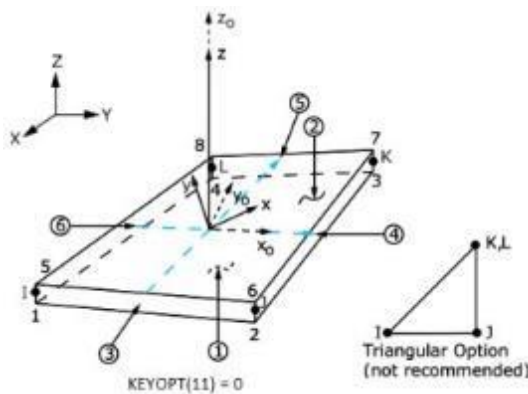


Figura 9: SHELL181 [13].

Com relação ao SOLID65, elemento que representa o concreto, foi feito um estudo para obter o melhor resultado, assim, calibrando o modelo numérico. O critério de falha de Drucker-Prager consiste em uma modificação do critério de Von Mises, em que se aplica a sensibilidade à pressão hidrostática. O critério também pode ser visto como uma suavização da superfície de Mohr-Coulomb [13]. O critério estabelece que o escoamento plástico do material se inicia quando o segundo invariante do tensor deviatórico de tensões J_2 e a pressão hidrostática p atingem a combinação crítica:

$$\Phi = \sqrt{J_2} + \eta p - \bar{c} \quad (1)$$

em que η e \bar{c} são parâmetros do material. No modelo de Drucker-Prager implementado no Ansys, o material tem comportamento elastoplástico-perfeito, i.e., a superfície Φ dada pela equação (1) é constante, sem encruamento. O programa Ansys utiliza os parâmetros do critério de Mohr-Coulomb como dados de entrada: o ângulo de atrito interno ϕ e a coesão c do material. Neste trabalho, foram adotados conforme as equações (2) e (3), que se baseiam nas resistências de tração e compressão do ensaio uniaxial, onde f_c corresponde a resistência à compressão e f_t resistência à tração do concreto:

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{f_c - f_t}{f_c + f_t} \right) \quad (2)$$

$$c = \frac{f_c f_t}{f_c - f_t} \tan \phi \quad (3)$$

No estudo de ARANDA [14], o autor reduz o módulo de elasticidade do concreto buscando-se representar o comportamento do concreto fissurado. O autor argumenta que para modelar elementos fissurados em vigas de concreto armado, deveriam ser atribuídas pequenas porcentagens do módulo de elasticidade. Se o valor do módulo fosse nulo ($E_c=0$) haveria uma singularidade na matriz de rigidez dos modelos. Esta técnica foi usada para modelagem, no estado fissurado, em estruturas de alvenaria. Então, reduz-se o módulo de elasticidade do concreto ao multiplicar por um fator de redução R_{agr} , desse modo, determina-se um módulo de rigidez equivalente E_{eq} , como pode ser visto na equação (4).

$$E_{eq} = E_c R_{agr} \quad (4)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaios experimentais

Aos 28 dias de idade foram realizados ensaios do concreto no estado endurecido a fim de determinar a resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão e tração por compressão diametral. Para o ensaio de resistência à compressão do concreto foi utilizado a NBR 5739 [15] e moldados 4 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm. Os resultados do ensaio estão na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados de resistência à compressão do concreto.

CORPO DE PROVA	f_c (MPa)	MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)
1	29,10	27,98	1,582
2	28,97		
3	28,14		
4	25,69		

O ensaio de módulo de elasticidade do concreto, segundo a NBR 8522 [16], foi realizado utilizando 3 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm e seus resultados se encontram na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados do módulo de elasticidade.

CORPO DE PROVA	E (GPa)	MÉDIA (GPa)	DESVIO PADRÃO (GPa)
1	36,53	35,41	1,687
2	36,23		
3	33,47		

De acordo com a NBR 12142 [17] foi realizado o ensaio de resistência à tração na flexão em 4 corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 x 10 x 40 cm e seus resultados se encontram na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados de resistência à tração na flexão.

CORPO DE PROVA	ft (MPa)	MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)
1	4,62	4,97	0,2901
2	4,95		
3	5,33		
4	4,97		

Para a determinação da tração por compressão diametral foi realizado o ensaio em 4 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, de acordo com a NBR 7222 [18] e os resultados podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados da resistência à tração por compressão diametral.

CORPO DE PROVA	ft (MPa)	MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)
1	5,01	4,764	0,2704
2	4,92		
3	4,74		
4	4,39		

Nos ensaios experimentais das vigas, foram moldadas 6 vigas de concreto armado, sendo 3 vigas utilizadas como referência e nas restantes foram aplicadas o reforço de CFRP. As vigas foram dimensionadas com armadura transversal insuficiente para induzir a ruptura por cisalhamento e acentuar a solicitação dos estribos. Além disso, o reforço de CFRP foi dimensionado como reforço ao cisalhamento. No procedimento experimental, as vigas foram submetidas a ensaio de flexão a quatro pontos. Como resultado, foi obtido o gráfico de Carga (kN) por Deslocamento (mm), como mostra a Figura 10.

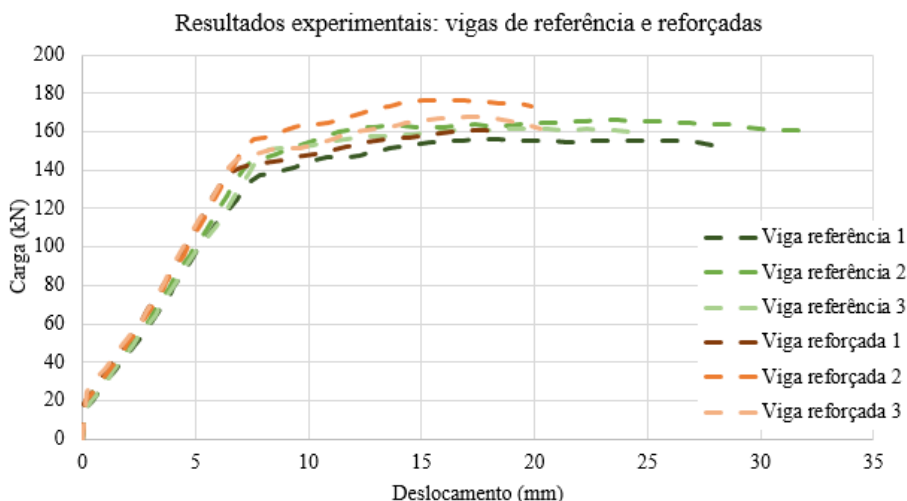


Figura 10: Resultados dos ensaios experimentais.

Observando o gráfico da Figura 10, nota-se que o comportamento inicial das curvas, tanto das vigas de referência como das vigas reforçadas, é muito similar. Também, para as vigas com reforço estrutural de CFRP houve um pequeno acréscimo de resistência, com um deslocamento menor se comparado às vigas de referência.

Os resultados dos ensaios experimentais também podem ser vistos na Tabela 7, sendo possível analisar em valores mais exatos a força a qual cada viga resistiu. Com a média das cargas aplicadas, pode-se observar que com a aplicação de reforço estrutural para o cisalhamento em uma viga com armadura transversal insuficiente houve aumento de 10%, mostrando alguma eficácia do reforço. Os modos de colapso das vigas podem ser vistos na Figura 11 e Figura 12.

Tabela 7: Carga última das vigas submetidas à flexão em um ensaio de quatro pontos.

CORPO DE PROVA	CARGA (kN)	MÉDIA (kN)	COEF. VARIAÇÃO (%)
Viga referência 1	153,15	157,86	2,56
Viga referência 2	160,28		
Viga referência 3	160,16		
Viga reforçada 1	160,27	164,93	1,5
Viga reforçada 2	173,19		
Viga reforçada 3	161,34		



Figura 11: Viga referência.



Figura 12: Viga reforçada com CFRP.

Ao longo dos ensaios, apenas em uma viga houve o descolamento de apenas uma faixa do polímero reforçado com fibra de carbono, o que mostra boa eficiência da resina utilizada, mas necessidade de atenção na aplicação da resina e preparos na superfície de concreto (Figura 13).



Figura 13: Descolamento do reforço de CFRP.

A carga máxima resistida pelas vigas reforçadas variaram de 160 a 173 kN. Os resultados são similares a MOSTOFINEJAD *et al.* [19], que ensaiaram vigas de $120 \times 160 \times 1400$ mm com mantas de CFRP em forma de U para reforço ao cisalhamento. Eles obtiveram cargas máximas entre 164 e 178 kN, aproximadamente.

No caso do estudo de AMAIREH *et al.* [20], o reforço ao cisalhamento de CFRP foi aplicado internamente ao concreto, acoplado à armadura, em formas de faixas. A aplicação do reforço aumentou de maneira significativa a resistência da viga e, assim como o presente estudo, aumentou a rigidez das vigas.

AKROUSH *et al.* [6] mostrou que o reforço de CFRP apresentou contribuição significativa na resistência ao cisalhamento de 21% a 47% maior do que as vigas sem reforço. Nesse caso, não foram utilizadas faixas como no presente estudo, mas sim lâminas que envolviam grande parte da viga nas zonas combinadas de cisalhamento e tensões normais.

3.2 Simulação numérica

No software ANSYS foram modeladas duas vigas, de referência sem reforço e viga reforçada com CFRP. A viga possuiu dois apoios móveis a 60 cm de cada extremidade, impedindo o deslocamento na direção vertical (Y). A linha central da viga (linha de simetria) é restrita na direção horizontal em X, evitando movimentos de corpo rígido. Um ponto dessa linha central tem seu deslocamento em Z impedido, também para que não ocorresse movimento de corpo rígido. A Figura 14 mostra as regiões de apoio, o eixo central com suas restrições e o local de aplicação de deslocamento. Os apoios inseridos para impedir movimento de corpo rígido têm como reação de apoio o valor numericamente nulo, uma vez que são compatíveis com a cinemática do problema, e não afetam a sua solução.

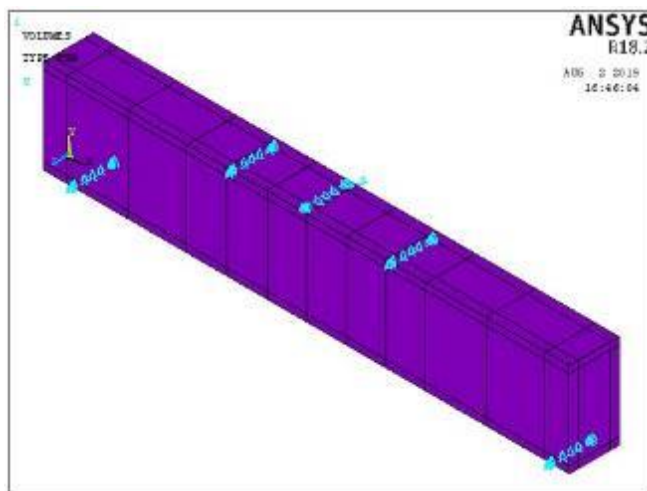


Figura 14: Condições de contorno.

Realizou-se um estudo de convergência de malha, a fim de obter melhores resultados. Inicialmente, foi feita uma simulação utilizando malha com elementos de tamanho característico de aproximadamente 25 mm para a viga de concreto armado com reforço de CFRP. Após, fez-se o refinamento da malha para elementos menores, com 15 mm. O objetivo deste estudo é verificar a convergência da solução com o refinamento da malha e enriquecimento do espaço de aproximação de elementos finitos. Foi feito um gráfico para analisar o comportamento e as curvas coincidiram, com diferença imperceptível, por isso, optou-se pela malha de 25 mm pois, além de produzir resultados equivalentes ao de uma malha menor, o seu custo computacional é menor.

As simulações são realizadas em duas etapas. Na primeira etapa o concreto é simulado com seu módulo de elasticidade de 35410 MPa, obtido nos ensaios de corpos de prova cilíndricos. Na segunda etapa, o módulo de elasticidade do concreto é reduzido, buscando-se representar o comportamento do concreto fissurado. Segundo DOMINGUEZ *et al.* [21] a literatura traz diversos fatores de redução da rigidez do concreto fissurado: alguns trabalhos utilizam valores entre 0.45 e 0.95 enquanto outros estudos chegam a adotar valores iguais a zero. O concreto foi modelado utilizando 5% do seu módulo de elasticidade, seguindo ARANDA [14]. Também foram feitas simulações com 10% do módulo de elasticidade, para comparação. Foram modeladas vigas de concreto armado com a mesma insuficiência de resistência ao cisalhamento da armadura utilizado no processo experimental, além do reforço de fibra de carbono que foi aplicado da mesma maneira. Na Tabela 8 se encontram os dados inseridos no programa para o elemento SOLID65. Na Tabela 9 são apresentados os dados inseridos para o elemento LINK180, para as armaduras longitudinais e transversais de aço, com modelo constitutivo Von Mises e comportamento elastoplástico perfeito. As propriedades do reforço de fibra de carbono foram os mesmos da análise experimental.

Tabela 8: Dados de entrada para o SOLID65.

MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)		35410
COEFICIENTE DE POISSON		0,2
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)		2,8
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		27,98
DRUCKER-PRAGER	COESÃO (MPa)	4,43
	ÂNGULO DE ATRITO (°)	54,89

Tabela 9: Dados de entrada para o LINK180.

TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	E (GPa)	POISSON
550	210	0,3

A viga de referência sem reforço e viga reforçada com CFRP foram simuladas. Foram gerados gráficos Carga por Deslocamento (Figura 15 e Figura 16), comparando os resultados numéricos com seus respectivos ensaios experimentais. A curva com módulo de elasticidade E_c total visa representar os estágios iniciais de carregamento; com módulo de elasticidade reduzido visa representar o concreto fissurado.

Por meio dos extensômetros aplicados nas armaduras longitudinal e transversal (E1 e E2), foi possível a realização da leitura da deformação da barra longitudinal. Gerou-se um gráfico comparando essa deformação obtida experimentalmente e numericamente (Figura 17). Observa-se que a simulação com módulo de elasticidade total representa muito bem o início do ensaio até o carregamento em torno de 30 kN. A simulação com módulo de elasticidade reduzido tem boa concordância com o experimento para carregamentos entre 40 e 120 kN.

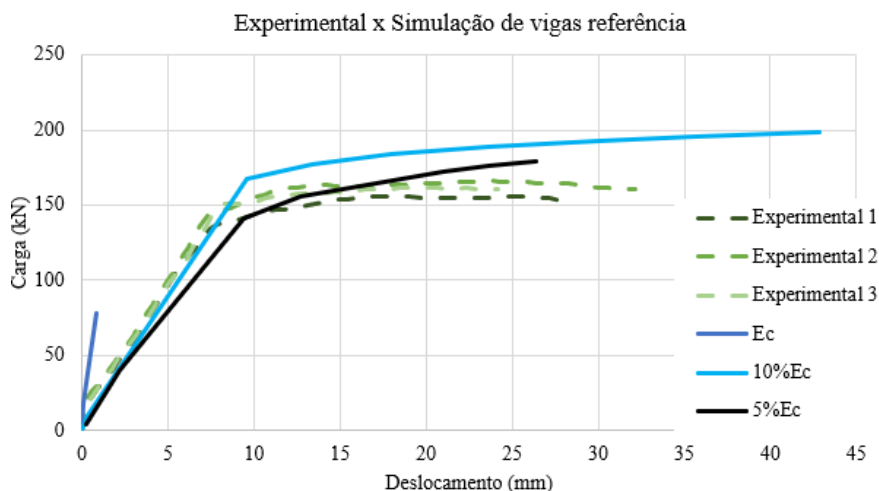


Figura 15: Resultados da simulação numérica para vigas referência.

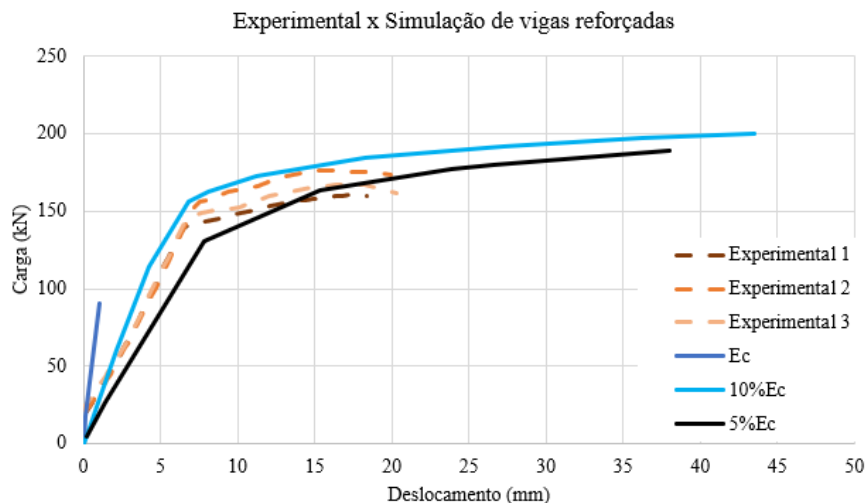


Figura 16: Resultados da simulação numérica para vigas reforçadas.

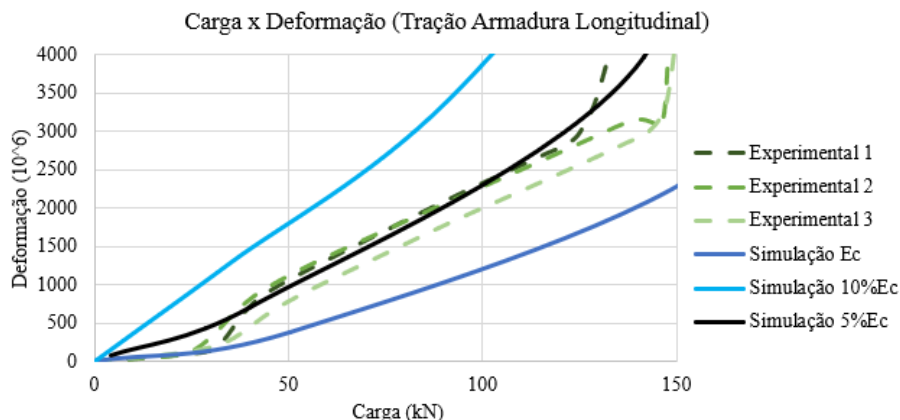


Figura 17: Deformação da armadura longitudinal.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a eficiência de fibras de carbono como elemento de reforço estrutural, por meio de ensaios experimentais e simulação numérica. A armadura foi dimensionada com resistência insuficiente ao cisalhamento.

Nas vigas de referência, inicialmente, surgiram fissuras ao cisalhamento, ou seja, próximo aos apoios, em seguida, as vigas romperam-se à flexão. As vigas com reforço de CFRP foram dimensionadas com reforço ao cisalhamento, no entanto, próximo a resistência à flexão, assim, a viga não foi capaz de resistir a maiores acréscimos de carga.

Em apenas uma viga houve o descolamento de uma fibra de carbono em um dos bordos da estrutura, mostrando boa eficiência do adesivo utilizado e evidenciando a necessidade de atenção na aplicação da resina e preparos na superfície de concreto. O reforço de carbono diminuiu o deslocamento vertical final da estrutura. Nas vigas de referência houveram rupturas por esforço combinado de cisalhamento e flexão. Nas vigas reforçadas com CFRP, as rupturas aconteceram por flexão. Na carga máxima de ruptura também foi possível acompanhar o esmagamento do concreto na região central e nas fibras superiores da viga.

No caso da simulação, para a representação do concreto (SOLID65) foi utilizado o critério de Drucker-Prager, em que o modelo apresenta um comportamento elastoplástico perfeito. A simulação foi feita em duas etapas. Para o estágio inicial de carregamento, adota-se o módulo de elasticidade total do concreto, em que os materiais ainda se comportam aproximadamente de forma linear. Para representar o comportamento do concreto fissurado, adotou-se um módulo de elasticidade reduzido, seguindo os estudos de ARANDA [14].

O modelo numérico se mostrou compatível com o experimental, principalmente devido aos resultados de deformação da armadura longitudinal, em que a curva da simulação obtida foi bastante próxima ao resultado experimental.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Pedra Consultoria, à MC- Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda e a LafargeHolcim pela doação de materiais.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI Committee 440.2R-02, USA, 2002.
- [2] FERNANDES, E., RAMOS, J., *et al.*, “Avaliação do uso de compósito de fibras de carbono como elemento de reforço em estruturas de concreto”, In: *Anais da Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas*, v. 1, n. 1, Recife, agosto, 2017.
- [3] NAWAZ, W., *et al.*, “Effect of longitudinal carbon fiber-reinforced polymer plates on shear strength of reinforced concrete beams”, *ACI Structural Journal*, v. 113, n. 3, pp. 577-589, May-Jun. 2016.
- [4] HAWILEH, R.A., *et al.*, “Effect of flexural CFRP sheets on shear resistance of reinforced concrete beams”, *Composite Structures*, v. 122, pp. 468-476, 2014.
- [5] MAHENDRA, P.U., *et al.*, “Experimental study of CFRP & GFRP strengthened reinforced concrete beam in flexure & shear”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 5, n. 3, pp. 2062-2067, Mar. 2018.
- [6] AKROUSH, N., *et al.*, “CFRP shear strengthening of reinforced concrete beams in zones of combined shear and normal stresses”, *Composite Structure*, v. 162, pp. 47-53, 2017.
- [7] OLLER, E., PUJOL, M., MARÍ, A. Contribution of externally bonded FRP shear reinforcement to the shear strength of RC beams. **Composites Part B: Engineering**, v. 164, n. July 2018, p. 235–248, 2019.
- [8] HABIB, M., *et al.*, Non-Linear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete (RC) Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets for Flexure and Shear using ANSYS. **Asian Journal of Mathematics and Computer Research**, v. 24, n. January, p. 21, 2018.
- [9] PIVATTO, A.B., *Análise experimental e computacional de vigas biapoiadas de concreto armado reforçadas com CRFC*, Tese de M.Sc, UTFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2017.
- [10] RANGEL, G.W.A., *Avaliação do desempenho estrutural de painéis de alvenaria de blocos de concreto reforçados com PRFC*, Tese de M.Sc. UFU, Uberlândia, MG, Brasil, 2013.
- [11] MC BAUCHEMIE, <https://www.mc-bauchemie.com.br/>. Acessado em 18 janeiro de 2020.
- [12] MM, DEPARTMENT OF APPLIED MECHANICS, https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID65.html. Acessado em janeiro de 2020.
- [13] SOUZA NETO, E., PERIC, D., OWENS, D., Computational methods for plasticity: theory and applications. Civil and Computational Engineering Centre, Swansea University, 2008.
- [14] ARANDA, H.I.A., *Comportamiento a cortante de trabes acarteladas de concreto reforzado*, Tese de M.Sc, UNAM, Mexico City, México, 2004.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- [19] MOSTOFINEJAD, D., *et al.*, “Influence of different bonding and wrapping techniques on performance of beams strengthened in shear using CFRP reinforcement”, *Construction and Building Materials*, v. 116, pp. 310-320, 2016.
- [20] AMAIREH, L., *et al.*, “Integration of CFRP strips as an internal shear reinforcement in reinforced concrete beams”, *Structures*, v. 23, pp. 13-19, 2020.
- [21] GODÍNEZ-DOMÍNGUEZ, E.A., TENA-COLUNGA, A., JUÁREZ-LUNA, G. “Nonlinear finite element modeling of reinforced concrete haunched beams designed to develop a shear failure”, *Engineering Structures*, v. 105, p. 99–122, 2015.

ORCID

Michele Miwa Fugiyama

<https://orcid.org/0000-0003-0121-9568>

Nádia Cazarim da Silva Forti

<https://orcid.org/0000-0001-9994-5546>

Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho

<https://orcid.org/0000-0001-5401-2160>

Isabela Oliveira Duarte

<https://orcid.org/0000-0002-3802-6244>

Jakeline Dutra dos Santos

<https://orcid.org/0000-0003-3557-1789>

Lia Lorena Pimentel

<https://orcid.org/0000-0001-5146-0451>