

Análise experimental de vigas biapoiadas de concreto armado reforçadas a flexão por CRFC

Experimental analysis of reinforced concrete beams strengthened in bending with CFRP sheets

Amanda Brandenburg Pivatto(1); Rogério Francisco Küster Puppi(2); Érica Kimura(3); Wellington Mazer(4)

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, PR, Brasil.

E-mail: a.bpivatto@gmail.com

2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, PR, Brasil.

E-mail: rfkpuppi@gmail.com

3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, PR, Brasil.

4 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, PR, Brasil.

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 7, n. 2, p. 1-19, Julho-Dezembro, 2020 - ISSN 2358-6508

[Recebido: Janeiro 31, 2020; Aceito: Setembro 28, 2020]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2020.v7i2.3864>

Endereço correspondente / Correspondence address

Endereço de correspondência completo

Avenida Santa Catarina, 190

Dionísio Cerqueira – SC

CEP 89950-000

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editores: Richard Thomas Lermen

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui! / click here!](#)

Resumo

Este trabalho tem como objetivo examinar a eficiência do reforço estrutural utilizando Compósitos Reforçados com Fibra de Carbono (CRFC), avaliando o aumento da resistência de vigas biapoiadas de concreto armado. Para isto, vigas de concreto armado receberam a implantação de camadas de CRFC, para que fossem verificadas as diferenças de deformações, as mudanças nos valores de carga de ruptura e os modos de falha destas vigas. Foi feita a previsão das cargas de ruptura das vigas reforçadas por meio do método de dimensionamento utilizado. As vigas foram rompidas em laboratório pelo ensaio de flexão a quatro pontos até o seu colapso. Os ensaios experimentais comprovaram a efetividade deste método de reforço estrutural. No que concerne os resultados, foi possível perceber que a utilização do reforço estrutural com CRFC foi capaz de aumentar a resistência das vigas em até 34%. Além disso, observou-se que a implantação do CRFC pode mudar significativamente a ductilidade da viga reforçada. Para mais, a utilização dos incrementos de ancoragem mostrou um aumento de até 42% na carga última e aumento na deformação de tração de até 102% em relação a viga de referência, dando origem a um maior aparecimento de fissuras.

Palavras-chave: Concreto armado. Reforço estrutural. CRFC. Ancoragem.

Abstract

This paper has the objective to present the efficiency of the structural reinforce with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), evaluating the increase of the resistance of reinforced concrete beams. For this purpose, reinforced concrete beams received the installation of CFRP layers, testing the difference between the displacements, strains, the ultimate loads and the failure modes changing. The previous of the reinforced beams failure loads was made by the methods proposed by Machado (2011), based on ACI 440.2R (2008). The beams achieved the rupture in experimental analysis by the four points bendind assay. As results, it was possible to observe that the CFRF reinforce utilization can increase the beams resistance by 34%. In addition, the CFRP utilization can change significantly the ductibility of the reinforced beams. Furthermore, the utilization of the anchorage increments showed an increase in the ultimate load from to 42% and a larger tension strain, with more cracking.

Keywords: Reinforced concrete. Structural reinforcement. CFRP. Anchorage.

1 Introdução

Fatores como processos de deterioração das estruturas, falhas humanas durante a fase de projeto, de construção e de utilização, problemas de causas naturais, falta de manutenção, entre outros fatores podem contribuir para que uma peça de concreto armado passe por uma redução em seu desempenho estrutural. Além disso, o desempenho de uma estrutura pode ser reduzido pelo aumento de cargas solicitantes, pela presença de carregamentos desconsiderados na fase de dimensionamento ou pela mudança de finalidade do sistema estrutural à que constitui. Tudo isso pode possibilitar que a peça apresente manifestações patológicas e sofra danos ao longo do tempo.

A deterioração de peças estruturais pode causar fissuração e gerar vulnerabilidade à agentes agressivos em uma peça estrutural (SOUSA, 2008), o que pode levar ao surgimento de manifestações patológicas. Segundo Helene (1992), a formação de problemas patológicos é oriunda principalmente pelas cargas, pela variação da umidade, pelas variações térmicas intrínsecas e extrínsecas ao concreto, por agentes biológicos, por incompatibilidade de materiais, agentes atmosféricos e entre outros. As manifestações patológicas mais frequentes em estruturas de concreto são as fissuras, as eflorescências, as flechas excessivas, a corrosão das armaduras e as manchas no concreto (HELENE, 1992).

Na ocasião onde a peça não necessitar ser demolida, ela pode ter seu desempenho corrigido pelo restabelecimento de sua capacidade resistente: a chamada reabilitação estrutural (RIPPER; SOUZA, 1998). Uma das formas de reabilitação estrutural é a realização do reforço estrutural, o qual promove a restituição ou a ampliação da capacidade de resistência a cargas.

As soluções de reforço estrutural por encamisamento (CANAVAL et al., 2018) e por chapas de aço (PALIGA et al., 2019; SIMÕES; SANTO, 2019) também são opções para melhorar o desempenho de vigas a flexão. Entretanto, as soluções podem levar a um significativo aumento do peso próprio da peça reforçada, o que pode ser um problema para o sistema estrutural em questão como um todo. Além disso, no caso das chapas de aço, apesar da simplicidade de aplicação do sistema, a visualização de fissuras na peça original e de corrosão na parte interna das chapas pode ser um ponto negativo para esta solução de reforço (PIVATTO, 2014).

De acordo com Ripper & Souza (1998), na década de 1980 cientistas japoneses pesquisavam novas tecnologias para estruturas com riscos de sofrer abalos sísmicos e foi nessa época que os Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono (CRFC) passaram a ser utilizados como reforço estrutural em estruturas de edifícios, apesar de que já vinham sendo utilizados nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, naval e automobilística (JUVANDES, 2002). Além disso, com o desenvolvimento de estudos no campo dos Compósitos Reforçados com Fibras (CRF) e por meio da maior facilidade de

aquisição do material frente à redução dos custos, com o passar do tempo, passou-se a ter uma maior utilização do material também na construção civil.

Entretanto, uma das adversidades do uso do reforço com CRFC é a possibilidade de modo de ruptura prematuro. Isto é causado pela elevada tensão na interface entre o concreto e o reforço, levando a elevada fissuração, com deslocamento do concreto de cobrimento ou descolamento do reforço (TENG et al., 2002).

Muitos autores recomendam a utilização de sistemas de ancoragem (MOSTAFA; RAZAQPUR, 2013; FERRARI et al., 2002; SKUTURNA; VALIVONIS, 2016) a fim de evitar o rompimento prematuro das vigas reforçadas com CRFC, além de poder aumentar a carga última dessas vigas por meio destes incrementos de ancoragem (DEMAKOS et al., 2013; RAZAQPUR; MOSTAFA, 2015).

Com o propósito de avaliar a eficiência do método de reforço com CRFC, o objetivo desta pesquisa é verificar o comportamento de vigas biapoiadas de concreto armado reforçadas à flexão com CRFC, alterando o número de camadas de reforço e analisando a influência do incremento de ancoragem lateral junto ao reforço. Para isto foi elaborado um programa experimental em que a variação de deformações e de deslocamentos (nas fibras mais tracionadas e mais comprimidas) e a fissuração correspondentes ao acréscimo de carga em vigas de concreto armado foram monitorados. Além disso, nesta pesquisa foi feita uma comparação entre os valores de resistência destas vigas calculados conforme o dimensionamento proposto por Machado (2011) – baseado no ACI 440.2R (2008) – com os valores obtidos experimentalmente.

2 Estudo Analítico

Para calcular a resistência da viga sem o reforço de CRFC foi utilizada a ABNT NBR 6118 (2014) e o método de equilíbrio de forças. Já para o caso das vigas reforçadas com 1 e 2 camadas de CRFC foi utilizado o dimensionamento proposto por Machado (2011), baseado no ACI 440.2R (2008).

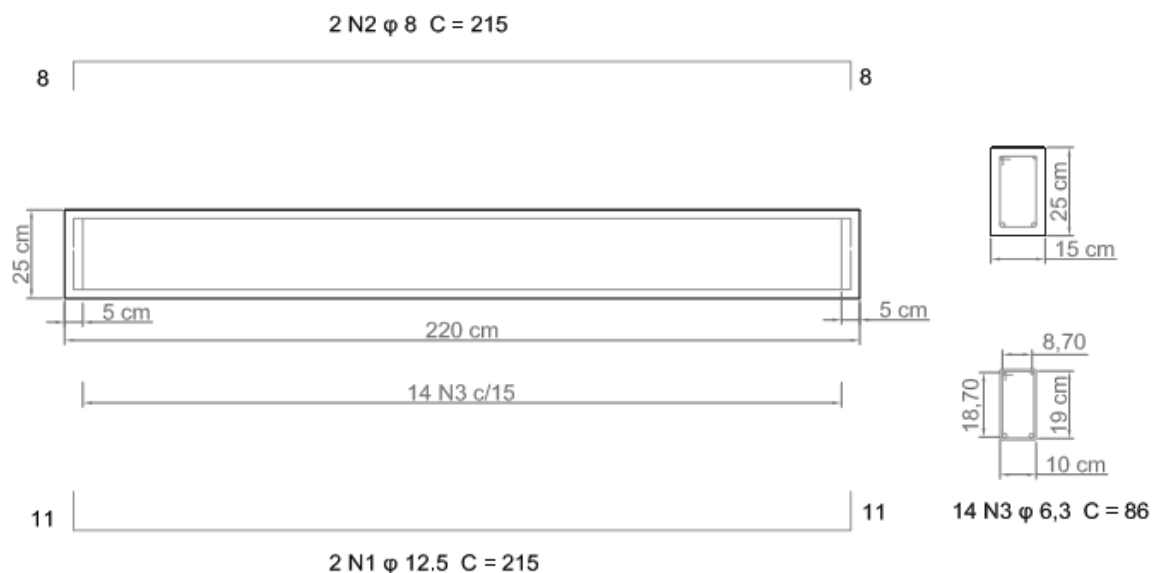
As vigas tinham seção transversal de 15 cm de largura por 25 cm de altura e 220 cm de comprimento, sendo 200 cm de vão livre. A armadura longitudinal de tração foi formada por 2 barras de aço CA-50 de 12,5 mm, a armadura longitudinal de compressão por 2 barras de aço CA-50 de 8 mm e a armadura transversal foi composta por estribos de barras de aço CA-60 de 6,3 mm espaçados a cada 15 cm. O detalhamento da armadura pode ser visto na Figura 1, sendo seguidas as especificações da ABNT NBR 12655 (2006).

Primeiramente foi elaborado um estudo analítico para estimar a carga de ruptura da viga de estudo, com e sem a implantação do reforço estrutural. Foram utilizados para o cálculo os valores de resistência do concreto e do aço obtidos experimentalmente, por meio de rompimento dos corpos de prova. Maiores detalhes sobre a obtenção destes valores serão apresentados na seção 3.

Como resultado do estudo analítico, a carga última encontrada para a viga sem reforço foi de 80,1 kN, para a viga com 1 camada de CRFC foi de 125,75 kN e para a viga com 2 camadas de CRFC foi de 132,15 kN.

Foi verificada também, a resistência ao esforço cortante da viga de estudo, obtendo-se um valor de 77,28 kN para a força cortante que a peça resistiria, sem romper por cisalhamento.

Figura 1. Detalhamento das armaduras das vigas de estudo (dimensões em cm)



Fonte: Autoria própria (2020).

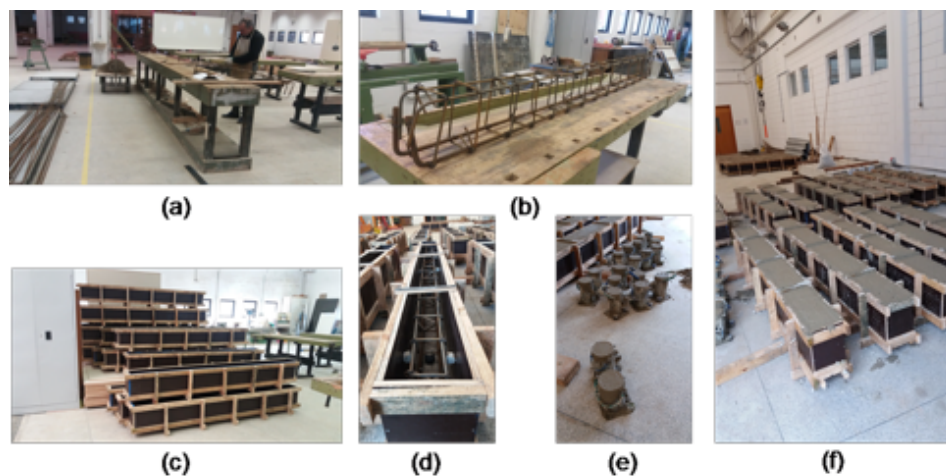
3 Programa experimental

3.1 Elaboração das vigas

Foram elaboradas 15 vigas de concreto armado, conforme o detalhamento descrito no item anterior. A execução das formas, o corte e dobra das armaduras, visto na Figura 2, foram realizados no canteiro de obras da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Todas as vigas foram concretadas no mesmo dia, com utilização de concreto usinado, fazendo uso de lançamento manual e adensamento mecânico, por meio de vibrador de imersão. Os materiais componentes do concreto utilizado estão descritos na Tabela 1.

Também foram concretados corpos de prova de concreto, conforme ABNT NBR 5738 (2008). Três corpos de prova de concreto foram ensaiados à compressão e outros três foram ensaiados à tração por compressão diametral, seguindo a ABNT NBR 5739 (2007) e a ABNT NBR 7222 (1994). Estes ensaios foram realizados no Laboratório da UTFPR, utilizando uma prensa EMIC. Os resultados destes ensaios estão apresentados nas Figuras 3 e 4.

Figura 2. Sequência de execução: Corte e dobra (a); Armadura das vigas (b); Execução das formas (c); Posicionamento das armaduras nas formas (d); Concretagem dos corpos de prova (e); Vigas concretadas (f)

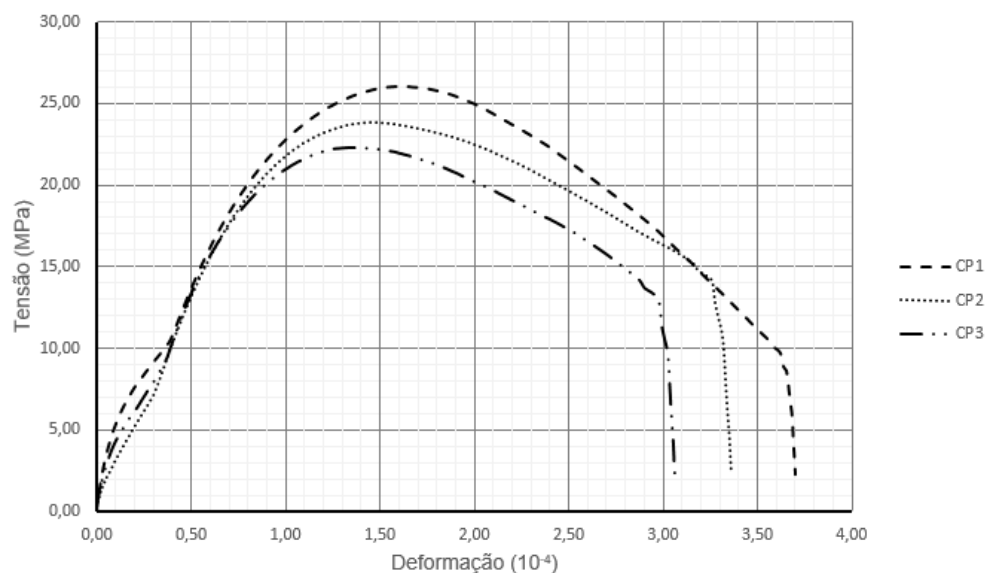


Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 1. Componentes do concreto (dados fornecidos por SUPERMIX¹)

Material	Tipo	Coef/m ³	Umidade (%)
Cimento	CPII 40 Votorantim Rio Branco	215	-
Areia	Natural Cava Fina	0,347	5,9
Areia	Artificial Gnaiss Grossa	0,33	5,2
Brita	Gnaiss I	0,756	-
Aditivo	Masterpolyheed 38	1,398	-

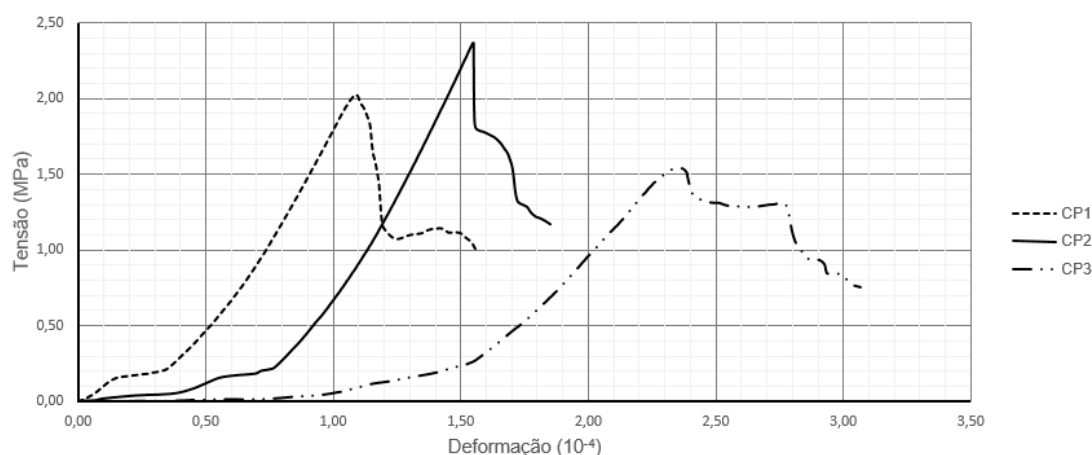
Figura 3. Resultado dos ensaios de compressão dos corpos de prova (CPs)



Fonte: Autoria própria (2020).

1 Empresa de Serviço de Concretagem.

Figura 4. Resultado dos ensaios de tração por compressão diametral dos corpos de prova (CPs)



Fonte: Autoria própria (2020).

Para a resistência à compressão, o valor médio encontrado foi de 24,1 MPa e para a resistência à tração por compressão diametral, o valor adotado foi de 2,2 MPa.

Além disso, também foram extraídas três amostras do aço constituinte da armadura das vigas para a elaboração de ensaios de tração, os quais, da mesma forma, foram realizados na UTFPR por meio de prensa EMIC, seguindo a ABNT NBR 6152 (2002). Os resultados dos ensaios estão apresentados na Figura 5, em que o valor encontrado para a tensão média de escoamento do aço foi de 550 MPa.

Tabela 2. Dados para cálculo das resistências das vigas, com e sem reforço estrutural

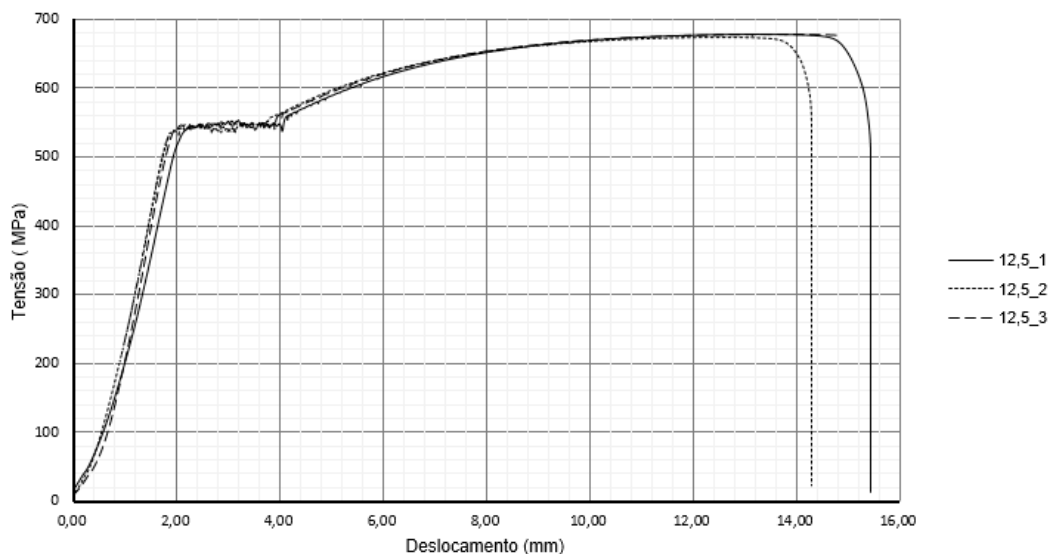
Base da viga	bw (mm)	150
Altura da viga	h (mm)	250
Resistência média do concreto à compressão	f_c (MPa)	24,1
Módulo de elasticidade inicial do concreto	E_c (MPa)	25714
Módulo de elasticidade do aço	E_s (MPa)	21000
Área de armadura de compressão	A_s (mm ²)	245,44
Altura útil da viga	d (mm)	100,53
Distância entre fibra mais comprimida e centro de gravidade da armadura de compressão	d' (mm)	35,3
Distância entre o centro de gravidade da armadura inferior até a fibra mais tracionada	t (mm)	37,55
Vão livre da viga	L (mm)	2000
Tensão de escoamento do aço (armadura de tração)	f_y (MPa)	550
Tensão de escoamento do aço (armadura de compressão)	f'_y (MPa)	550

Fonte: Autoria própria (2020).

Os resultados obtidos por meio dos ensaios dos corpos de prova de concreto e das amostras do aço foram utilizados no estudo analítico, com o objetivo de comparar

ambas análises. Estes estão apresentados na Tabela 2, assim como os demais valores correspondentes à configuração das vigas.

Figura 5. Resultado dos ensaios de tração do aço (barras de 12,5 mm de diâmetro)



Fonte: Autoria própria (2020).

3.2 Implantação do reforço estrutural com CRFC

As vigas elaboradas para este estudo foram mantidas sob cura úmida e armazenadas em laboratório até a data de ensaio. Com a desforma das peças, foi realizada a preparação da base para a implantação do reforço estrutural com CRFC.

Para isso, foi executado o apiloamento da base das vigas, por meio da utilização de discos de desbaste acoplados à uma esmerilhadeira. Deste modo, a nata de cimento foi removida e o agregado ficou parcialmente exposto, formando uma superfície rugosa, mas regular, de forma a obter uma melhor aderência entre o concreto e o reforço (MACHADO, 2002). Na sequência, o pó e qualquer sujidade que poderiam prejudicar a aderência entre o concreto e o reforço foram removidos da base das vigas, por meio de limpeza.

O material composto para reforço estrutural utilizado nesta pesquisa foi o da marca S&P – Clever Reinforcement Company, com a manta de fibra de carbono do tipo C-Sheet 240 (cujas características estão apresentadas na Tabela 3) e resinas tipo Resin 50 e Resin 55 (epóxi primer e epóxi saturante, respectivamente).

A implantação do reforço foi realizada seguindo os critérios especificados pelo fabricante, nas seguintes etapas: aplicação de uma camada de primer bicomponente (proporção de 2:1), aplicação de uma camada de epóxi saturante bicomponente (proporção de 2:1) e posicionamento da manta de fibra de carbono intercalada com nova aplicação de epóxi saturante. Nas vigas que tiveram a instalação de mais de uma camada de CRFC, foi repetida a aplicação da resina saturante, o posicionamento da

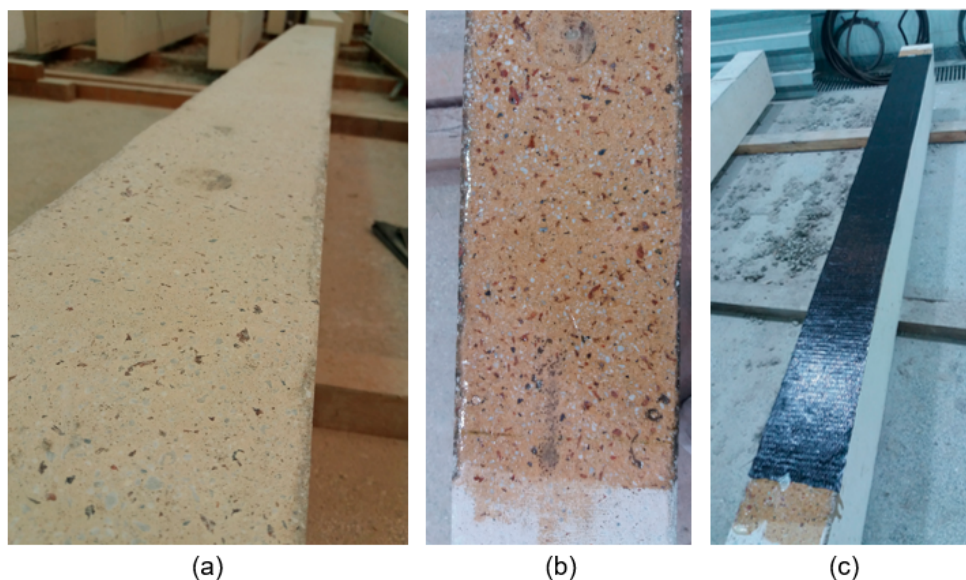
manta de fibra de carbono e a nova aplicação de resina saturante. O tempo, o modo de mistura e de colagem determinados pelo fabricante do reforço foram seguidos. A sequência executiva da implantação do reforço com CRFC pode ser vista na Figura 6.

Tabela 3. Características da manta de fibra de carbono utilizada, de acordo com a ficha técnica do produto

Módulo de elasticidade (MPa)	240000
Resistência última à tração (MPa)	3800
Espessura de cada camada (mm)	0,176

Fonte: Ficha técnica S&P – *Clever Reinforcement Company* (2016).

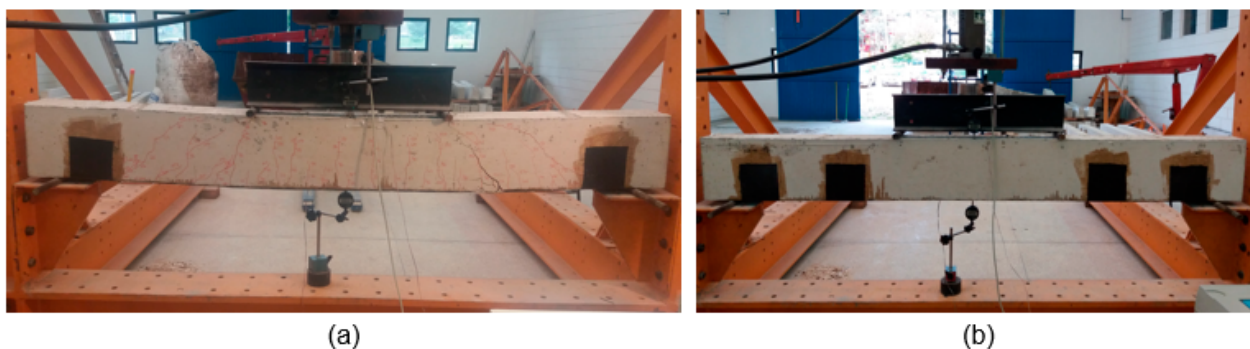
Figura 6. Implantação do reforço de CRFC: (a) Base da viga com o apiloamento da superfície; (b) Aplicação da resina; (c) Aplicação da manta de fibra de carbono



Fonte: Autoria própria (2020).

As vigas que receberam incremento de ancoragem tiveram a aplicação de reforço de CRFC com 15 cm de altura de cada lado das vigas (sendo 25 cm a altura total da viga), para simular uma situação real, onde parte da viga está dentro da laje, impossibilitando o reforço de toda a sua lateral. Foram elaboradas duas formas de adição de incrementos de ancoragem, onde uma delas apresenta um incremento de ancoragem em cada lateral das vigas (Figura 7a) e a outra apresenta dois incrementos de ancoragem em cada lateral da viga (Figura 7b).

Figura 7. Adição de um incremento de ancoragem em cada lateral da viga (a); Adição de dois incrementos de ancoragem em cada lateral da viga (b)

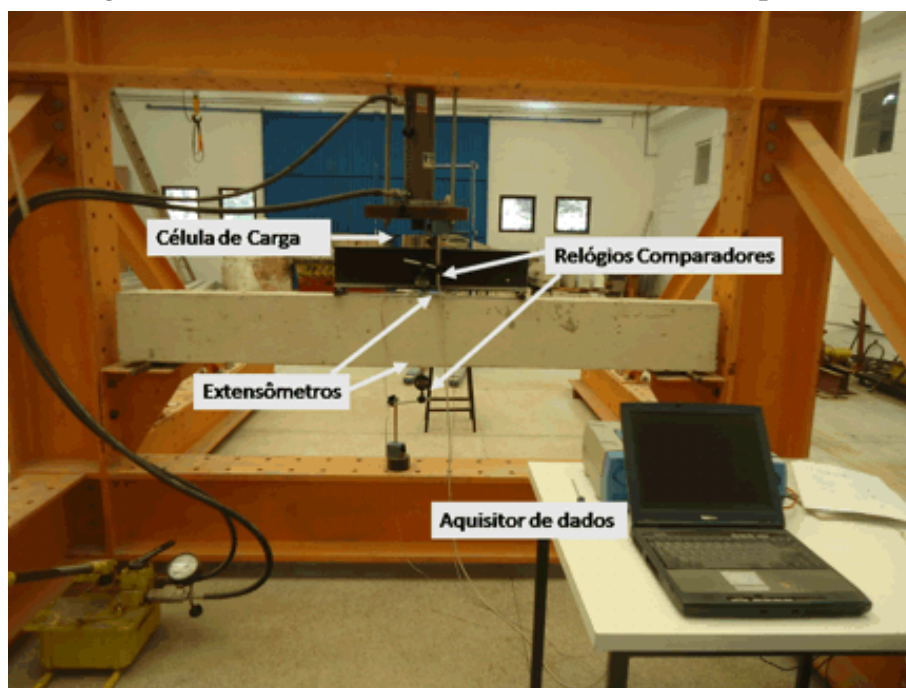


Fonte: Autoria própria (2019).

3.3 Realização dos ensaios experimentais

A realização dos ensaios ocorreu sete dias depois da instalação dos reforços estruturais para total secagem do sistema. Os experimentos foram feitos no Laboratório de Estruturas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), com o monitoramento dos deslocamentos e deformações (nas fibra mais tracionada e mais comprimida), além das fissuras correspondentes ao acréscimo de carga.

Figura 8. Instrumentação do ensaio de flexão a 4 pontos

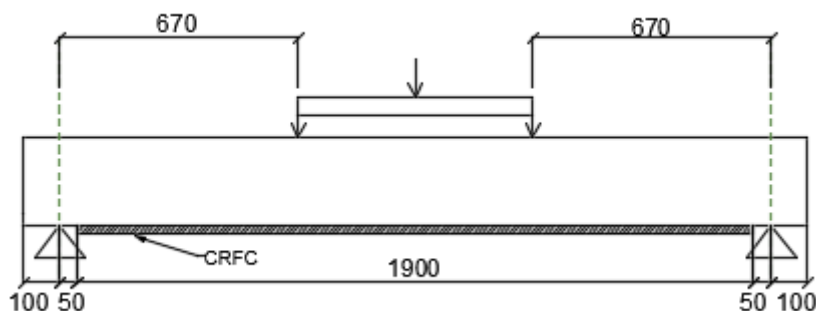


Fonte: Autoria própria (2020).

Para isto, foram utilizados relógios comparadores e extensômetros, os quais foram posicionados nas faces superior e inferior das vigas, a meio vão (Figura 8). A leitura da flecha medida pelos relógios comparadores foi feita a cada 5 kN de acréscimo

de carga. A carga e as deformações foram registradas por meio de um aquisitor de dados. As vigas foram ensaiadas em um pórtico e a carga foi aplicada por meio de um cilindro hidráulico e um macaco hidráulico manual. O ensaio realizado foi o de flexão a quatro pontos, onde a carga foi dividida em 2 pontos de aplicação (Figura 9). O monitoramento das fissuras foi realizado a cada 10 kN de aumento de carga.

Figura 9. Esquema de ensaio (dimensões em mm)



Fonte: Autoria própria (2020).

Das quinze vigas ensaiadas, três foram ensaiadas para cada uma das cinco configurações de viga analisadas: referência (VR), uma camada de CRFC (V1), duas camadas de CRFC (V2), um incremento de ancoragem lateral (VA) e dois incrementos de ancoragem lateral (VAA). Para comparação dos resultados foi feita a média simples dos valores encontrados para as três vigas analisadas em cada configuração de estudo.

4 Resultados e Discussões

4.1 Cargas e modos de ruptura

De acordo com Teng & Yao (2005) e Teng (2001) existem diferentes formas de ruptura para uma viga de concreto reforçada com CRFC: por esmagamento do concreto à compressão, por ruptura no reforço, por cisalhamento e por ruínas prematuras (que são aquelas que acontecem antes de se alcançar a carga máxima prevista com o reforço).

No que se trata das ruínas prematuras, estas podem ocorrer devido ao surgimento de uma fissura intermediária na viga, levando ao descolamento do reforço no ponto da fissura; ruína por ruptura do concreto de cobrimento; por descolamento do reforço e deslocamento do concreto de cobrimento; e ruína pelo aparecimento de fissura diagonal e consequente descolamento do reforço (TENG; YAO, 2005; TENG, 2001).

Na Figura 10 estão apresentadas as configurações de ruptura das vigas ensaiadas. A viga de referência apresentou a maior parte de suas fissuras na forma vertical, com aparecimento da primeira fissura visível com a carga de 25 kN. Nas vigas com uma

e duas camadas de reforço houve o descolamento de grande parte do reforço, com deslocamento de uma porção do concreto de cobrimento.

As vigas reforçadas com uma camada de CRFC e adição de um incremento de ancoragem lateral alcançaram a ruptura devido ao aparecimento de fissuras inclinadas próximas às suas extremidades, com descolamento da camada de reforço. Tais fissuras demonstram ser causadas por cisalhamento. Entretanto, nestas vigas o esforço cortante foi de no máximo 60 kN, valor inferior ao valor de cortante máximo resistente de 77 kN, calculado no estudo analítico. Deste modo, entende-se que o crescimento das fissuras de cisalhamento acarretou no descolamento do reforço de CRFC. A viga, sem a contribuição do reforço descolado, acabou alcançando a ruptura devido à carga solicitante elevada.

Figura 10. Análise dos modos de ruptura das vigas ensaiadas, esquema de ensaio

Tipo de viga	Modo de ruptura	Imagem
Referência	Flexão	
1 camada	Separação da camada de concreto	
2 camadas	Separação da camada de concreto/ Descolamento do reforço por aparecimento de fissura intermediária	
1 camada e 1 Ancoragem	Descolamento do reforço por aparecimento de fissura intermediária	
1 camada e 2 Ancoragens	Descolamento do reforço por aparecimento de fissura intermediária	

Fonte: Autoria própria (2020).

As vigas reforçadas com uma camada de CRFC e dois incrementos de ancoragem tiveram predominância de modo de falha pelo aparecimento de fissuras no trecho central do vão, com posterior descolamento do CRFC, partindo do centro para as extremidades da viga. Nestes casos, ficou clara a percepção do modo de ruptura por descolamento do reforço devido a uma fissura intermediária, que já havia ocorrido no caso de vigas com uma ancoragem. Neste tipo de ruptura, também considerada prematura, uma fissura referente à flexão ou à flexão-cisalhamento leva a iniciação e a propagação do descolamento do reforço (TENG, 2001). Nestas vigas, até mesmo o sistema de ancoragem ficou danificado pelo esforço que ocasionou o descolamento do CRFC. Desta forma, é possível perceber que, apesar de a adição de incrementos de ancoragem ocasionar em um aumento da carga resistente suportada pela viga, em relação àquelas vigas sem ancoragem, o sistema de ancoragem imposto neste estudo não evitou o rompimento por descolamento do reforço, como ocorreu no estudo de

Ferrari et al., 2012. Na pesquisa elaborada por estes autores a implantação do sistema de ancoragem levou a ruptura das vigas por tração do CRF, sem a falha prematura por destacamento do reforço.

Na Tabela 4 estão apresentadas as cargas últimas médias das vigas ensaiadas, juntamente com os valores de ruptura calculados pelo modelo analítico e a diferença entre eles. É possível perceber que a carga média de ruptura encontrada pelo ensaio experimental ficou próxima do valor calculado, com uma variação de um pouco mais de 6%.

Tabela 4. Comparação dos valores de carga experimental (média simples dos valores obtidos) e analítico. *VR – viga de referência

Tipo	Experimental		Analítico	
	Carga experimental média (kN)	Aumento em relação à VR (%)	Carga analítica (kN)	Aumento em relação à VR (%)
Referência	85,00	-	80,10	-
1 camada	112,67	32,55	125,75	56,99
2 camadas	114,41	34,60	132,15	64,98
1 ancoragem	117,74	38,52	-	-
2 ancoragens	120,85	42,18	-	-

Fonte: Autoria própria (2020).

Entretanto, para os casos das vigas reforçadas, o modelo analítico previa um aumento de quase 57% de resistência para a viga com uma camada, enquanto que o modelo experimental apresentou um aumento de apenas 32,55% em relação a viga de referência experimental. O mesmo aconteceu para a viga com duas camadas de CRFC, onde o modelo analítico previu um aumento de até 67% de resistência e o ensaio experimental alcançou um aumento de resistência de apenas 34,60%.

Apesar disso, é possível observar que a implantação do reforço estrutural com CRFC levou a viga reforçada a uma carga de ruptura superior àquela da viga sem o reforço. Para mais, é possível observar que, na análise experimental elaborada nesta pesquisa, a utilização de duas camadas de reforço com CRFC não levou a um aumento significativo de resistência se comparado ao caso da viga com uma camada de reforço. Isto porque, o aumento da resistência da viga com duas camadas em relação à viga com uma camada foi em torno de 2 kN (para os valores médios encontrados).

Entretanto, a adição de incrementos de ancoragens promoveu maior ganho de resistência do que o aumento do número de camadas, sendo 38,52% para a viga com uma ancoragem e 42,18% para a viga com duas ancoragens.

4.2 Análise dos deslocamentos e deformações

Na Tabela 5 estão apresentados os deslocamentos alcançados para cada tipo de viga em sua carga última, comparando-os com o deslocamento alcançado pela viga de referência (sem reforço), bem como a variação das deformações obtidas. Os valores contidos nesta tabela são referentes a média dos valores encontrados nos ensaios experimentais.

Tabela 5. Análise dos deslocamentos e deformações

Tipo	Carga experim. média (kN)	Aumento em relação à VR (%)	Desloc. Máx. médio (mm)	Variação em relação à VR (%)	Defor. Máx. média compressão (%)	Defor. Máx. média tração (%)
Referência	85,00	-	23,45	-	0,099	-
1 Camada	112,67	32,55	19,44	-17,10	0,147	0,642
2 Camadas	114,41	34,60	13,18	-43,80	0,137	0,379
1 Ancoragem	117,74	38,52	21,40	-8,74	0,101	0,715
2 Ancoragens	120,85	42,18	24,70	5,33	0,200	0,848

Fonte: Autoria própria (2020).

Em relação aos deslocamentos, percebeu-se que o aumento do número de camadas de reforço levou a uma diminuição do valor do deslocamento. Porém, as vigas com adição de incrementos de ancoragem alcançaram um deslocamento muito próximo à viga de referência e maiores que o deslocamento da viga com uma camada de CRFC, com pouca variação entre o deslocamento alcançado pela viga com um incremento de ancoragem e a viga com dois incrementos de ancoragem.

O gráfico de força versus deslocamento de uma das vigas para cada configuração estão apresentadas na Figura 11. Possíveis diferenças entre os valores do gráfico e da tabela podem acontecer, pois a tabela apresenta os valores médios obtidos, enquanto o gráfico mostra o resultado de um ensaio para cada tipo de viga ensaiada.

Em relação às deformações, observou-se que as vigas reforçadas com uma camada de CRFC alcançaram uma deformação à compressão maior do que a viga de referência. Entretanto, o acréscimo de mais uma camada de CRFC (duas camadas) diminuiu a deformação à compressão e à tração, em relação à viga com uma camada.

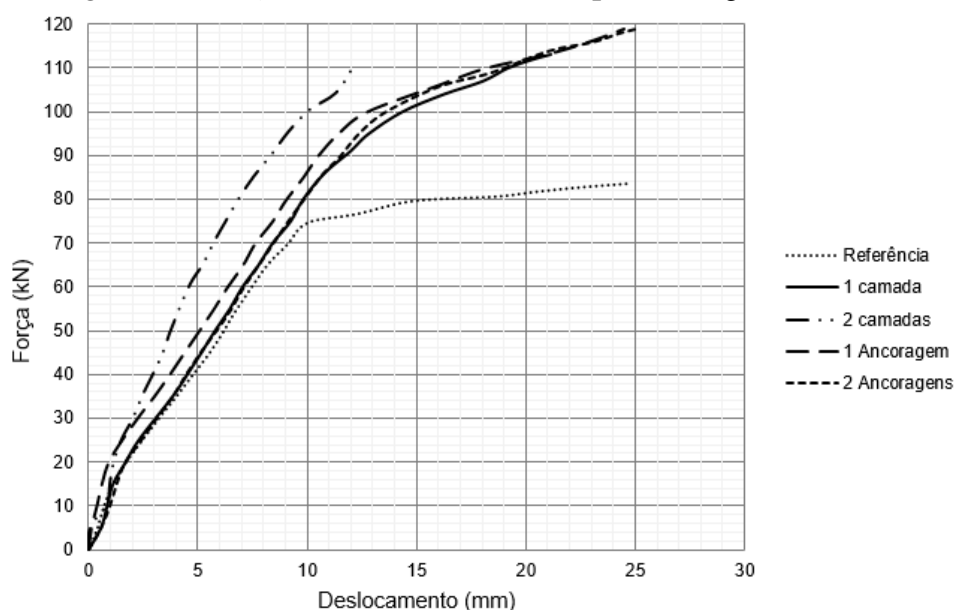
Também em relação à viga com uma camada, a adição de um incremento de ancoragem diminuiu a deformação à compressão e aumentou a deformação à tração. Porém, nas vigas com dois incrementos de ancoragem, tanto a deformação à tração quanto à compressão tiveram valores maiores do que todos os outros casos estudados neste trabalho, mais de 100% de aumento da deformação à compressão em relação à viga de referência.

Não foi possível medir a deformação à tração nas vigas sem reforço, devido aos extensômetros instalados nelas sofrerem danos pela fissuração, havendo assim um comprometimento da leitura da variação de deformação.

Para todos os casos, o rompimento ocorreu após o escoamento da armadura e sem o concreto atingir sua deformação máxima (0,35%). Isto indica que a ruptura se deu no domínio 2, conforme a ABNT NBR 6118 (2014).

Desta maneira, é possível perceber que o aumento do número de camadas de CRFC pode levar a um aumento na rigidez da peça reforçada, embora possa não levar a um ganho significativo de resistência. Todavia, com a utilização de sistemas de ancoragem é possível que a peça estrutural alcance deformações maiores e cargas superiores às alcançadas pela peça sem a inserção destes incrementos.

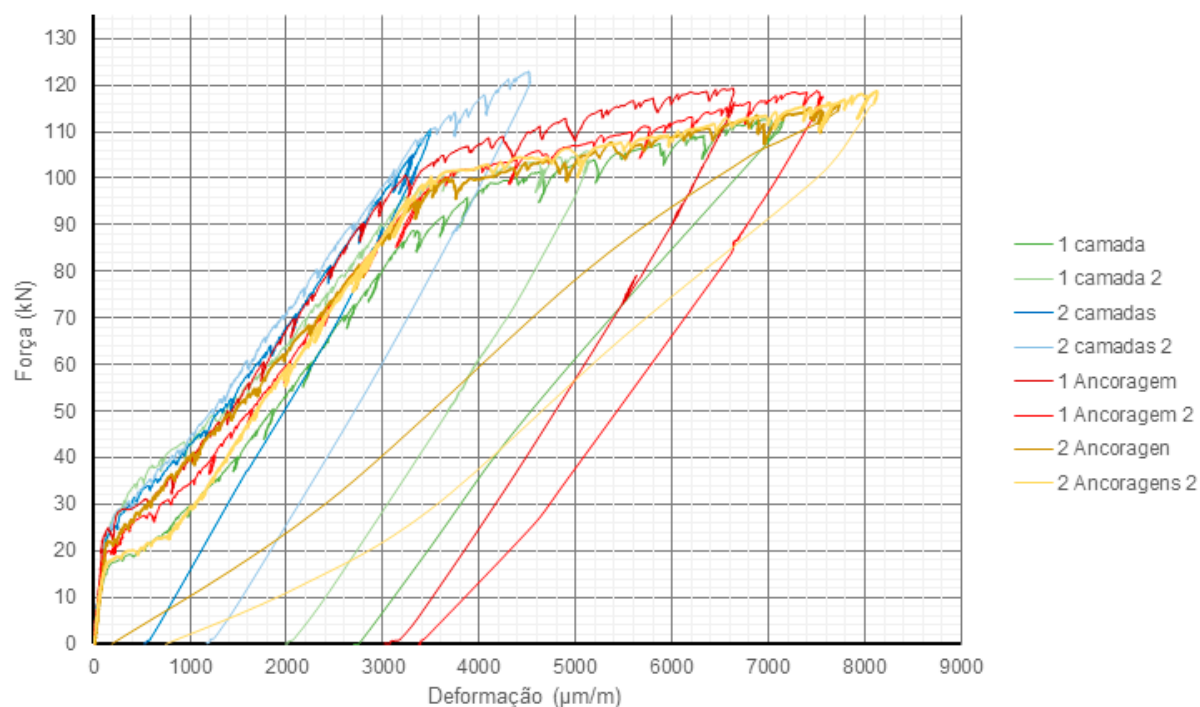
Figura 11. Força versus Deslocamento para as vigas ensaiadas



Fonte: Autoria própria (2020).

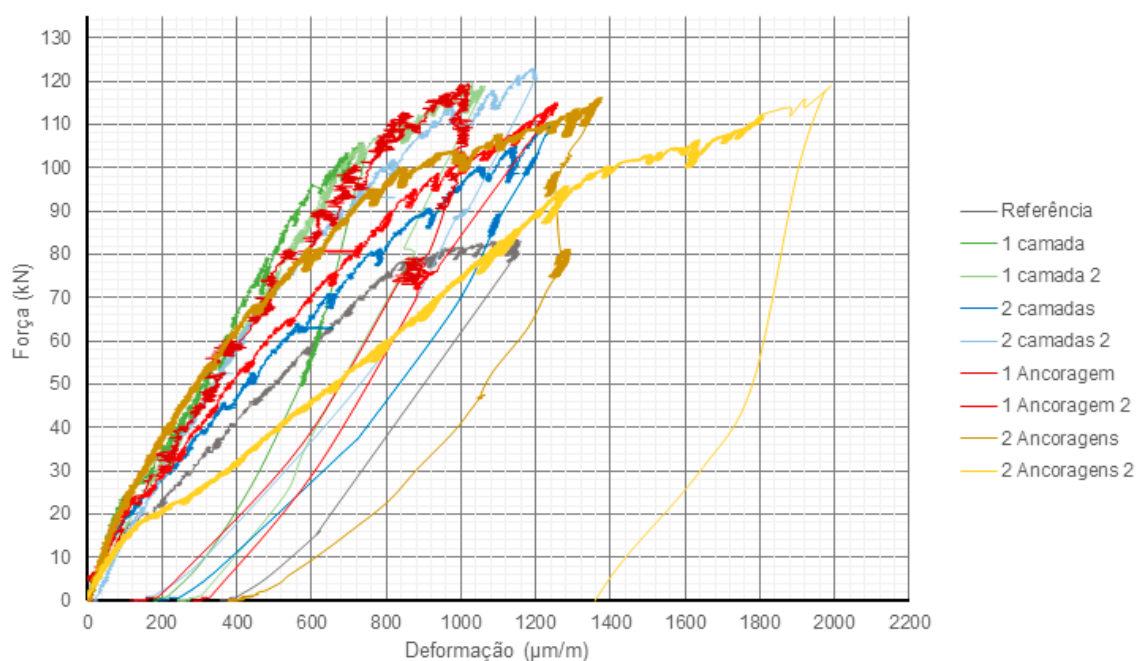
As curvas força versus deformação à tração e à compressão estão ilustradas nas Figura 12 e na Figura 13, respectivamente. Dois dos três ensaios realizados para cada configuração de viga estudada (referência, 1 camada, 2 camadas, 1 Ancoragem e 2 Ancoragens) estão apresentados nestas curvas.

Figura 12. Força versus Deformação para os grupos de vigas ensaiadas – Tração



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 13. Força versus Deformação para os grupos de vigas ensaiadas – Compressão



Fonte: Autoria própria (2020).

5 Considerações finais

- ♦ A adição de uma camada de reforço aumentou a ductilidade da peça, ao mesmo tempo que o aumento do número de camadas reduziu esta ductilidade;
- ♦ O aumento no valor da carga última foi de 32,55% para as vigas reforçadas com uma camada de CRFC e de 34,60% para as vigas com duas camadas de CRFC, quando comparadas às vigas sem reforço;
- ♦ Em relação aos valores obtidos analiticamente, observou-se que a previsão de carga de ruptura para a viga de referência foi próxima aos valores obtidos experimentalmente. Além disso, os valores analíticos calculados para as vigas reforçadas com uma camada de CRFC também se aproximaram daqueles obtidos nas demais análises, mas com uma diferença maior. Esta diferença se acentuou ainda mais para as vigas com duas camadas de CRFC, com os valores calculados superiores à média experimental. Isto indica que, possivelmente, o modelo analítico seguido neste trabalho seja pouco conservador;
- ♦ Percebeu-se que o uso de incrementos de ancoragem capacitou as vigas a resistirem a uma carga superior à média das vigas sem ancoragem. O aumento de resistência chegou a 38,52% para as vigas com um incremento de ancoragem e 42,18% para aquelas com dois incrementos, em relação a viga sem reforço;
- ♦ Os incrementos de ancoragem tornaram as vigas mais dúcteis (com deformação à compressão para as de duas ancoragens mais de 100% maior do que o caso das vigas de referência). Além disso, o deslocamento destas vigas também foi superior às aquelas sem o artifício de ancoragem;
- ♦ Todas as vigas romperam após o escoamento do aço e antes de o concreto plastificar.

Agradecimentos

A CAPES pelo apoio financeiro, a UTFPR, aos membros do laboratório pelo auxílio durante os ensaios, aos professores da UTFPR por todo o apoio e a Supermix pelo concreto fornecido.

Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2R). Farmington Hills, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 (2008): Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 (2007): Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6152 (2002): Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222 (1994): Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655 (2006): Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 (2014): Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- CANAVAL, J. H., SILVA, T. J., SANTOS, A. C. Estudo experimental em vigas de CA reforçadas à flexão por encamisamento e conectores. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 11, n. 4, São Paulo, 2018.
- DEMAKOS, C. B.; REPAPIS, C. C.; DRIVAS, D. Investigation of structural response of reinforced concrete beams strengthened with anchored FRPs. *The Open Construction and Building Technology Journal*, n. 7, p. 146-157, 2013.
- FERRARI V. J.; PADARATZ I. J.; LORIGGIO D. D. (2002). Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos e sistemas de ancoragem. In: *XXX Jornadas Sul-americanas de Engenharia estrutural*, Brasília. Jornadas Sul-americanas de engenharia estrutural. 2002.
- HELENE, P. Manual de reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto. 218 p. 2 Ed, Editora Pini, São Paulo, Brasil, 1992.
- JUVANDES, L. F. P. Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 1999.
- JUVANDES, L. F. P. Materiais compósitos reforçados com fibras, FRP. Módulo de aulas da disciplina Ciência dos Materiais do Curso de Licenciatura em Engenharia Civil. Universidade do Porto, Portugal. 2002.
- MACHADO, A. de P. Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono. 282 p.1 Ed., São Paulo, Brasil. 2002.

- MACHADO, A. de P. Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibra de carbono. 2011. 120 p.
- MOSTAFA, A.; RAZAQPUR, A. G. CFRP anchor for preventing premature debonding of externally bonded FRP laminates from concrete. *Journal of Composites for Construction*, n. 17, p. 641-650, 2013.
- PALIGA, C. M.; NICOLINI, N. G.; PALIGA, A. R.; TORRES, A. S. Estudo experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com chapas de aço. *Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo*, v. 6, n. 1, p. 20-37, 2019.
- PIVATTO, A. B. Reforço estrutural à flexão para viga biapoiada de concreto armado por chapas metálicas e compósito reforçado com fibras de carbono. 126 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. 2014.
- RAZAQPUR, G.; MOSTAFA, A. C-Anchor for Strengthening the Connection between Adhesively Bonded Laminates and Concrete Substrates. *Technologies*, 3, p. 238-258, 2015.
- RIPPER, T.; SOUZA V. C. M. De. *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. 1 Ed, São Paulo, Brasil, 1998. 262 p.
- SIMÕES, Y. S.; SANTO, C. F. R. Contribuição Às vigas de concreto armado degradadas pela ação do fogo: Análise comparative entre o reforço estrutural com fibras de carbono e chapas metálicas. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción (ALCONPAT)*, v. 9, n. 1, p. 48-64, 2019.
- SKUTURNA, T.; VALIVONIS, J. (2016). Experimental study on the effect of anchorage systems on RC beams strengthened using FRP. *Composites Part B*, 91, p. 283-290, 2016.
- SOUSA, A. F. V. da S. *Reparação, Reabilitação e Reforço de Estruturas de Betão Armado*. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade do Porto, Portugal. 2008.
- TENG, J. G. *Failure modes of FRP-strengthened restructures*. 26th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapura. 2001.
- TENG, J. G.; YAO, J. Plate end debonding failures of FRP – or steel plated RC beams: a new strength model. *Proceedings of the International Symposium on Bom Behaviour of FRP in Structures*. Hong Kong, China. 2005.
- TENG, J. G.; ZHANG, J. W.; SMITH, S. T. Interfacial stresses in reinforced concrete beams bonded with a soffit plate: a finite element study. *Construction and Building Materials*, 16, p. 1-14, 2002.
- VIEIRA, M. M.; SANTOS, A. R. S.; MONT'ALVERNE, A. M.; BEZERRA, L. M.; MONTENEGRO, L. C. S; CABRAL, A. E. B. Análise experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com polímero reforçado com fibra de carbono. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, Volume 9, Número 1, p. 123-152, 2016.