

Study of epoxy composites and sisal fibers as reinforcement of reinforced concrete structure

Estudo da viabilidade da utilização de compósitos epóxi e fibras de sisal como reforço de estruturas de concreto armado

H. M. FRANCKLIN ^a

henriquefranklin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1416-7800>

L. A. C. MOTTA ^a

lacastromotta@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1597-2297>

J. CUNHA ^a

jecunha@ufu.br

<https://orcid.org/0000-0001-5981-1906>

A. C. SANTOS ^a

acds.pir@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9019-4571>

M. V. LANDIM ^a

mateusvazlandim@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4801-6699>

Abstract

The application of structural reinforcement has presented a significant growth in the present days. The development of new materials for this purpose has aroused the interest of many researchers. The present work aim evaluate the production and application of polymers reinforced with vegetable fibers (PRFVeg) for reinforcement of reinforced concrete structures. An experimental program was developed using composites with 50%, 60% and 70% fibers volume content. The composites's tensile mechanical properties were evaluated in order to choose the fiber content with better mechanical performance. Epoxy matrix and sisal fibers were adopted in the production of PRFVeg. The reinforcement design was performed by numerical simulation using the finite element method. The reinforced beams were submitted to a 3-point flexural test until rupture and the performance of the material produced was compared to carbon fiber reinforced epoxy (PRFC) composites commonly used as reinforcement of reinforced concrete structures. The results obtained showed that the PRFVeg present similar performance compared to composites reinforced with carbon fibers, obtaining a load increase of up to 62% compared to the beams without polymer reinforcement.

Keywords: structural reinforcement, polymers reinforced with carbon fibers, polymers reinforced with sisal fibres.

Resumo

A aplicação de reforço estrutural tem apresentado crescimento significativo nos dias atuais. O desenvolvimento de novos materiais para tal finalidade tem despertado o interesse de muitos pesquisadores. O presente trabalho teve por objetivo avaliar a viabilidade técnica da produção e aplicação de polímeros reforçados com fibras vegetais (PRFVeg) para reforço de estruturas de concreto armado. Desenvolveu-se um programa experimental onde compósitos com teores de aproximadamente 50%, 60% e 70% em volume de fibras foram produzidos. As propriedades mecânicas à tração foram determinadas para avaliar o teor de fibras com melhor desempenho mecânico. Matriz epóxi e fibras vegetais de sisal foram adotadas na produção dos PRFVeg. O dimensionamento do reforço foi realizado mediante simulação numérica, utilizando o método dos elementos finitos. As vigas reforçadas foram submetidas a ensaio de flexão, em 3 pontos, até a ruptura e o desempenho mecânico do material produzido foi comparado com compósitos de matriz epóxi reforçada com fibras de carbono (PRFC), usados no mercado como reforço de estruturas de concreto armado. Os resultados obtidos mostraram que os PRFVeg apresentam desempenho similar aos já consagrados compósitos com fibras de carbono, obtendo incremento de carga de até 62%, em relação as vigas sem reforço.

Palavras-chave: reforço estrutural, polímeros reforçados com fibras de carbono, polímeros reforçados com fibras de sisal.

^a Federal University of Uberlândia, College of Civil Engineering, Uberlândia-MG, Brasil.

Received: 02 Mar 2017 • Accepted: 27 Jun 2018 • Available Online: 28 Mar 2019

 This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License

1. Introdução

A indústria da construção civil tem como desafio renovar as infraestruturas atendendo às grandes restrições econômicas. Têm sido observado um grande esforço da comunidade científica no desenvolvimento de materiais e metodologias para tal finalidade. Do ponto de vista ambiental e econômico é preferível reabilitar uma estrutura à proceder com sua demolição e reconstrução, especialmente edificações que fazem parte do patrimônio histórico [1]. A utilização de reforço estrutural tornou-se um caminho promissor para aumentar a capacidade de carga das estruturas e prolongar sua vida útil.

Há diversos fatores associados à necessidade de reforçar estruturas de concreto armado, podem ser citados erros na fase de projeto e execução, ambientes agressivos e mudanças na carga de utilização [2]. O reforço estrutural pode ser adotado para restaurar ou aumentar capacidade resistente de estruturas. A utilização de técnicas baseadas na colagem de compósitos poliméricos reforçados com fibras (CPRF) no reforço de estruturas de concreto têm atraído a atenção de muitos pesquisadores, principalmente devido suas vantagens, entre elas a elevada relação resistência/peso dos materiais, resistência à corrosão, facilidade e rapidez de aplicação [3, 4]. As pesquisas estão sendo direcionadas para o desenvolvimento de materiais com elevadas propriedades mecânicas, leves, simples e que causem poucos efeitos na arquitetura.

Os polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) são considerados a alternativa mais moderna e apropriada para o reforço de vigas de concreto armado, principalmente por apresentarem alto desempenho mecânico, resistência à corrosão, leveza, alta resistência à tração e elevada rigidez [5]. O alto custo do material pode ser compensado pelo ganho no tempo de execução, no custo da mão-de-obra e na diminuição do tempo de interrupção de serviço da estrutura durante o trabalho de recuperação [6]. No entanto, apesar das vantagens e dos bons resultados reportados, pesquisas apontam que na maior parte dos casos a ruptura dos elementos reforçados é prematura [7]. Esse tipo de ruína é

extremamente indesejável, pois ocorre sem aviso e antecipa o colapso da viga reforçada, impossibilitando o total aproveitamento da elevada resistência dos compósitos com fibras de carbono no sistema [4, 7].

As falhas prematuras em vigas reforçadas com PRF ocorrem principalmente devido as altas tensões na interface, sendo elas normais ou cisalhantes. Estudos recentes demonstraram que falhas prematuras devido à descolagem podem ser minimizadas quando a ancoragem é eficiente e cuidadosamente projetada [8, 9]. Incrementos significativos de resistência podem ser alcançados somente se os modos de ruína prematuros forem evitados [4].

Trabalhos recentes sugerem o uso de novas combinações fibra-matriz para o desenvolvimento de CPRF com aplicação no reforço estrutural, com o intuito de reduzir os altos custos dos sistemas de reforço comumente utilizados. Nos últimos anos, a utilização de materiais compósitos reforçados com fibras naturais cresceu consideravelmente no setor da construção civil [10]. As propriedades destes compósitos podem ser adaptadas para vários tipos de aplicações, a partir da escolha da fibra, utilizando diferentes matrizes e aditivos, e efetuando tratamentos das fibras [11].

A busca por materiais alternativos que possibilitam a substituição das fibras sintéticas por fibras naturais apresenta vantagens sociais e econômicas, reduzindo o custo, impacto ambiental e o consumo de energia [12]. As fibras vegetais apresentam-se como uma alternativa sustentável que possibilita o desenvolvimento da economia de regiões isoladas, representando uma importante fonte de renda para as populações locais [13].

A performance dos compósitos de fibras vegetais está diretamente relacionada ao teor de celulose e a diminuição do ângulo espiral em relação ao eixo da fibra [14], tipo de matriz, geometria e orientação das fibras [15]. A utilização de matrizes termoplásticas e termofixas no desenvolvimento de compósitos reforçados por fibras naturais aumentou consideravelmente nos últimos anos [10].

A fibra de sisal é uma fibra vegetal de natureza celulósica retirada das folhas da planta *Agave sisalana* e nativa do México [16]. O Brasil é um dos maiores produtores e cultiva estas fibras nos sertões do nordeste em regiões semiáridas, pela facilidade da planta



a) Fibra de sisal



b) Tecido de sisal

Figura 1
Fibras e tecidos de sisal

Tabela 1

Massa da resina e fibras/tecidos de sisal

Teor de fibras em volume (%)	Massa de fibra (g)	Massa de resina (g)
50%	90,60	68,96
60%	108,72	55,17
70%	126,84	41,37

em se adaptar a regiões secas [17]. As fibras de sisal apresentam propriedades mecânicas adequadas para produção de CPRF com aplicação na construção civil [18, 19]. Sua utilização na produção de compósitos com matrizes termoplásticas [20, 21] e termofixas [22, 23] têm sido extensivamente estudada. Este trabalho tem como objetivo produzir e caracterizar compósitos de resina epóxi reforçados com fibras e tecidos de sisal em elevados teores e investigar sua aplicação no reforço à flexão de vigas de concreto armado.

2. Programa experimental

O programa experimental foi dividido em duas fases. Primeiramente foram produzidos os compósitos com teores de aproximadamente 50%, 60% e 70% de fibras vegetais. Após a produção, foi realizada a caracterização de suas propriedades mecânicas e aqueles com melhores resultados foram selecionados para aplicação posterior como reforço de vigas de concreto armado. Em paralelo ao programa experimental foram realizadas simulações numéricas, utilizando o método dos elementos finitos, com o objetivo de dimensionar o reforço vegetal na viga para alcançar desempenho semelhante ao do PRFC. Na segunda fase foram produzidas vigas de concreto armado que foram reforçadas com os compósitos produzidos em estudo e com laminados de carbono, para avaliação e comparação do desempenho à flexão.

2.1 Materiais para produção dos compósitos vegetais: Fase - 1

Os compósitos foram produzidos com matriz a resina epóxi e para reforço foram analisadas fibras e tecidos com fios de sisal. As fibras e fios foram distribuídos nos compósitos de forma contínua e alinhada em uma única direção (Figura 1), visto que o alinhamento

das fibras/fios na direção dos esforços atuantes nos compósitos otimizam seu desempenho mecânico.

Os tecidos foram produzidos com fios torcidos, onde as urdiduras foram confeccionadas com fio de algodão e as tramas com fios de sisal com diâmetro de 2 mm (Figura 1b). Foram produzidas diversas camadas com as fibras e tecidos de sisal de modo que cada camada ficasse sobreposta até atingir a massa de fibras/tecidos necessária para o teor de cada compósito. A massa específica das fibras foi determinada por picnometria de gás hélio resultando em $1,511 \text{ g/cm}^3$.

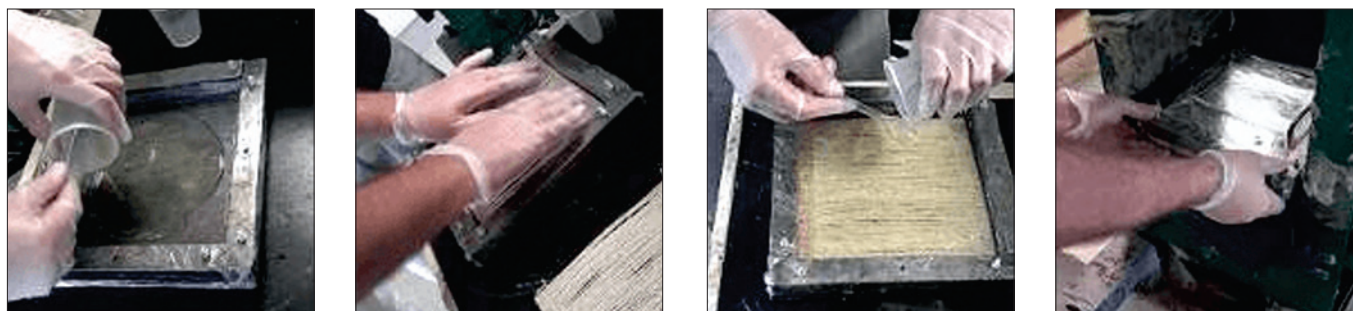
A resina epóxi foi selecionada por apresentar excelentes propriedades mecânicas, boa compatibilidade, pequena contração durante a cura e aderência com as fibras vegetais, além de estabelecer base comparativa com as fibras de carbono, com a mesma matriz. A resina é constituída por um sistema resultante da reação da epícloridrina com o bisfenol A, modificada com extensores reativos alifáticos e o endurecedor à base de poliamina modificado, produzidos pela Silaex® Química Ltda. A proporção de mistura adotada, entre resina e endurecedor, foi de 100:15 partes em massa, com o objetivo de garantir um tempo de trabalho suficiente para a preparação do composto. A massa específica da resina com essa proporção resultou em $1,15 \text{ g/cm}^3$ [25]. A Tabela 1 apresenta as composições dos compósitos, com diferentes teores de fibras.

2.2 Produção e ensaio dos compósitos vegetais

As fibras/tecidos foram secos em estufa, a temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$, por 24 horas. Os compósitos foram preparados por compressão em temperatura ambiente ($25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$), utilizando fôrmas metálicas com dimensões internas de $19,5 \text{ cm} \times 20,5 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm}$, e uma prensa hidráulica.

Parte da mistura homogênea de resina e endurecedor foi colocada no molde e posteriormente uma camada de fibras, realizando-se o adensamento manual. Este procedimento foi repetido alternando em camadas de resina e fibras até atingir o teor de fibras do compósito. Finalizada esta etapa, o molde foi fechado e colocado na prensa hidráulica e aplicada a força necessária até o compósito atingir espessura de 3 mm. O compósito foi deixado na prensa por 24h e o processo de cura durou 48 horas (Figura 2).

Após a desfôrma, foram cortados 9 corpos de prova, no sentido da orientação das fibras, em uma máquina a laser marca ROUTER. As amostras foram cortadas nas dimensões recomendados pela

**Figura 2**

Etapas da preparação dos compósitos



a) Placa moldada



b) Corpos de prova

Figura 3

Compósito de resina epóxi reforçado com fibras de sisal

ASTM D638:2012 [26]. A Figura 3 e Figura 4 apresentam os compósitos produzidos para testes de tração.

As amostras foram submetidas ao ensaio de tração, em máquina universal de ensaios, da marca Instron, modelo 5982, com célula de carga de 100 kN, seguindo as recomendações da ASTM D3039:2014 [27]. A força de tração foi aplicada com velocidade de 2 mm/min até a ruptura do compósito. Para a medida da deformação, utilizou-se um extensômetro Instron, com capacidade de alongamento máximo de 25 mm. A partir do ensaio de tração foram obtidos: módulo de elasticidade, resistência à tração e deformação máxima na ruptura de cada compósito.

2.3 Ensaio dos compósitos de carbono

Para obtenção das propriedades elásticas do laminado de carbono, usado como reforço, foram realizados ensaios de tração em corpos de prova seguindo recomendações da ASTM D3039:2014 [27]. Foram preparadas cinco amostras com 250 mm de comprimento e 15 mm de largura. Para evitar danos dos corpos de prova na região de aplicação da força pelas garras da máquina de ensaio foram coladas pastilhas (*tabs*) nas extremidades das amostras, confeccionadas com o próprio laminado, com comprimento de 56 mm. As amostras foram submetidas ao ensaio à tração



a) Placa moldada



b) Corpos de prova

Figura 4

Compósito de resina epóxi reforçado com tecidos de sisal



(a) Corpos de prova



(b) Configuração de ensaio

Figura 5

Ensaio à tração dos compósitos de carbono

seguindo os mesmos procedimentos realizados para os compósitos vegetais (Figura 5).

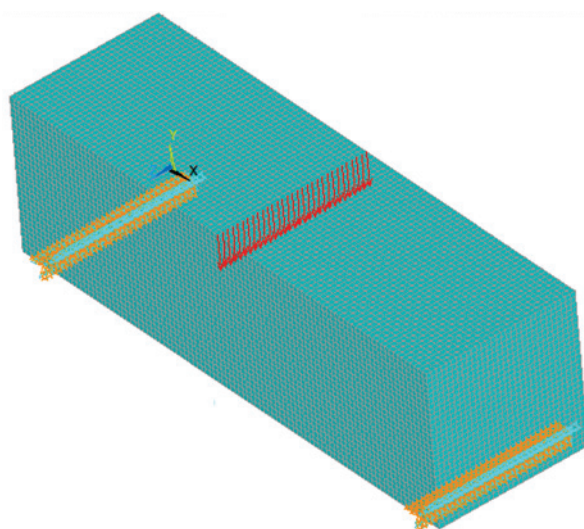
2.4 Simulação numérica

Com o objetivo de predimensionar o reforço vegetal para obter desempenho mecânico semelhante ao reforço de PRFC, foi modelada uma viga de concreto armado, bi-apoiada, tendo vão entre apoios de 45 cm e reforçada com uma camada de PRFC. A faixa de PRFC foi posicionada no centro da superfície inferior da viga, região onde as tensões normais de tração por flexão são maiores, tendo o reforço o formato de uma faixa de 5 cm x 40 cm. O modelo foi submetido a um carregamento vertical de 50 kN distribuídos ao longo da seção transversal central. Na Figura 6 é ilustrada a viga de referência para comparação com a viga reforçada com PRFVeg.

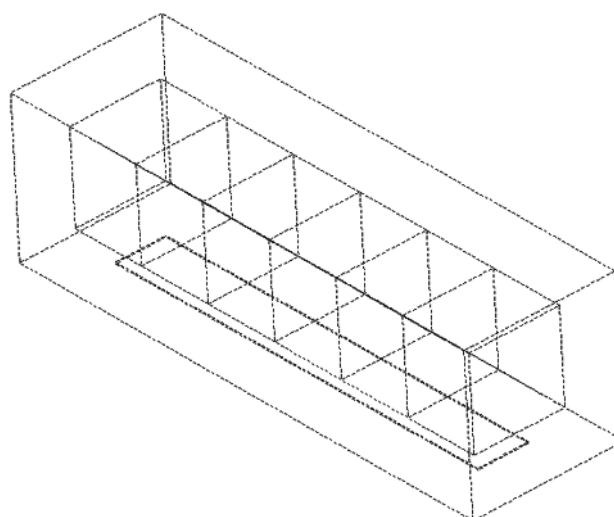
Na modelagem de cada elemento da viga reforçada adotou-se

um elemento tridimensional básico do ANSYS®, sendo o elemento BEAM 188 para a armadura e o elemento SOLID 185 para o concreto e reforço (PRFC e PRFVeg). Na tabela 2 estão apresentadas as propriedades utilizadas para modelagem da viga reforçada com PRFC. Na Figura 7 é apresentada a distribuição das tensões na viga sem reforço e na reforçada com PRFC.

Obtida a carga de ruptura da viga com o reforço de PRFC, transferiu-se a carga para o modelo numérico reforçado com PRFVeg, determinando a espessura necessária para alcançar desempenho estrutural semelhante ao PRFC. A espessura necessária do PRFVeg obtida na simulação foi de 5,5 mm. O compósito de sisal adotado para reforço tem 70% de fibras, o qual apresentou melhores propriedades à tração, com módulo de elasticidade de 35,80 GPa. O coeficiente de Poisson adotado para o PRFVeg foi o mesmo utilizado para o laminado de carbono. Na Tabela 3 estão apresentados os resultados obtidos na simulação da flexão das vigas sem reforço e com os dois tipos de reforços estudados.



a) Condição de contorno e de carregamento



b) Detalhes da armadura e posição do reforço

Figura 6

Modelagem de viga bi-apoiada reforçada com PRFC

Tabela 2

Propriedades utilizadas na modelagem da viga reforçada com PRFC

Propriedades	Descrição	Valor
$\emptyset$	Diâmetro das barras	5 mm
b_w	Largura da seção da viga	15 cm
h	Altura da seção da viga	15 cm
C	Comprimento da viga	50 cm
w	Largura da faixa de PRFC	5 cm
e	Espessura da camadas de PRFC	1,2 mm
E_s	Módulo de elasticidade do aço	21.000 kN/cm ²
E_{con}	Módulo de elasticidade do concreto	2.380 kN/cm ²
E_f	Módulo de elasticidade do PRFC	16.681,5 kN/cm ²
ν_s	Coefficiente de Poisson do aço	0,3
ν_c	Coefficiente de Poisson do concreto	0,2
ν_f	Coefficiente de Poisson do PRFC	0,27
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão	2,5 kN/cm ²

2.5 Avaliação do desempenho dos compósitos como reforço: Fase - 2

Esta fase do trabalho teve como propósito avaliar o desempenho dos compósitos como reforço estrutural, pelos valores de incre-

Tabela 3

Resultados das diferentes modelagens do reforço no combate ao momento fletor

	Espessura do reforço (cm)	Tensão (kN/cm ²)	
Sem reforço	-	Superior	0,84247
		Inferior	0,91684
Com reforço-fibra de carbono 68%	0,127	Superior	0,81957
		Inferior	0,83921
Com reforço-fibra de sisal 70%	0,55	Superior	0,81945
		Inferior	0,83977

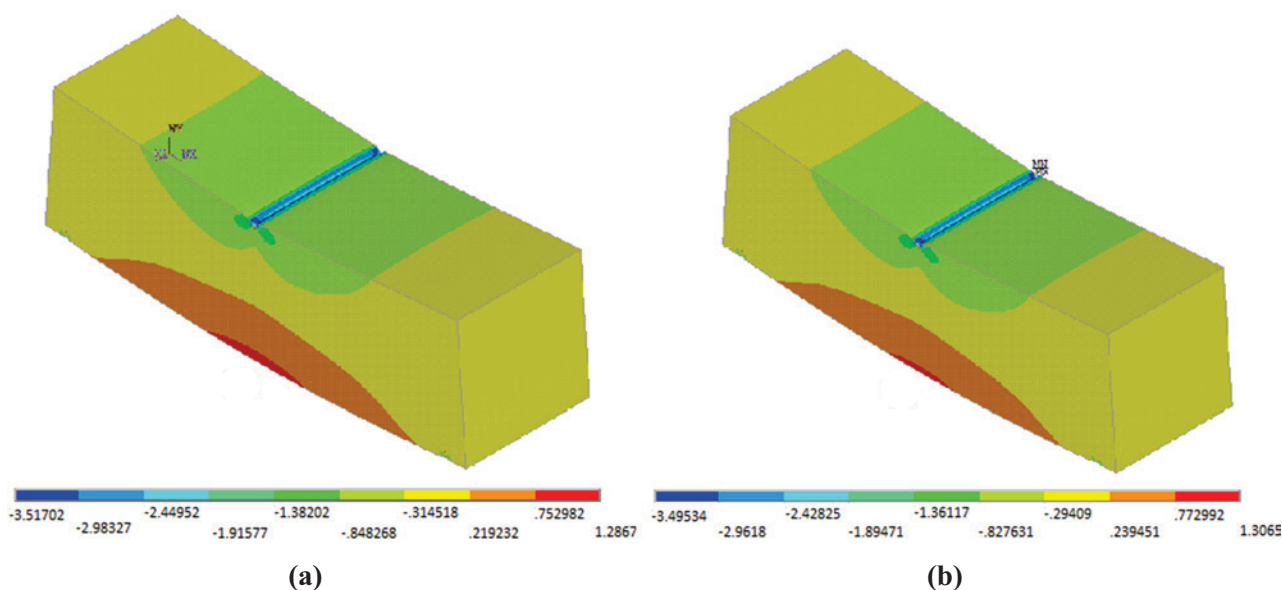
mento de capacidade de carga das vigas, quando sujeitas a flexão. Para tanto, foram produzidas 13 vigas de concreto armado nas dimensões de 15 cm x 15 cm x 50 cm divididas em 3 grupos. O grupo denominado “controle” são as vigas sem reforço, o grupo RC são as vigas reforçadas com PRFC e o grupo RS são as vigas reforçadas com PRFVeg com melhor desempenho mecânico encontrado na fase 1 deste trabalho (Tabela 4).

As vigas foram dimensionadas para que tivessem ruptura por flexão com deformação plástica excessiva da armadura. Foram adotadas barras de 5,0 mm de diâmetro para armadura longitudinal, correspondendo a uma taxa de 0,17%. A armadura transversal foi constituída por barras de aço de 5,0 mm de diâmetro, espaçadas a cada 7,30 cm, sendo dimensionada para evitar ruptura da viga por cisalhamento. Foram realizados ensaios de tração das barras de aço utilizadas nas vigas, obedecendo às especificações da ABNT NBR 7480:2007 [28]. Os resultados obtidos estão indicados na Tabela 5, e a Figura 8 apresenta o detalhamento da armadura na viga.

Tabela 4

Descrição dos grupos ensaiados na segunda fase do estudo

Grupo	CP (Viga)	Reforço	Dimensões das vigas		
			b (cm)	h (cm)	l (cm)
Controle	1, 2 e 3	Sem reforço			
RC	4, 5, 6, 7 e 8	Carbono	15	15	15
RS	9, 10, 11, 12 e 13	Sisal			

**Figura 7**

Tensões normais antes (a) e após (b) a colagem do reforço (kN/cm²)

Tabela 5

Resultados dos ensaios de tração das barras de aço utilizadas na armadura das vigas

Diâmetro (mm)	Tensão de escoamento média (F_y) (MPa)	Tensão de ruptura média (F_r) (MPa)
5	788,57 (86,09)	828,63 (89,41)

Tabela 6

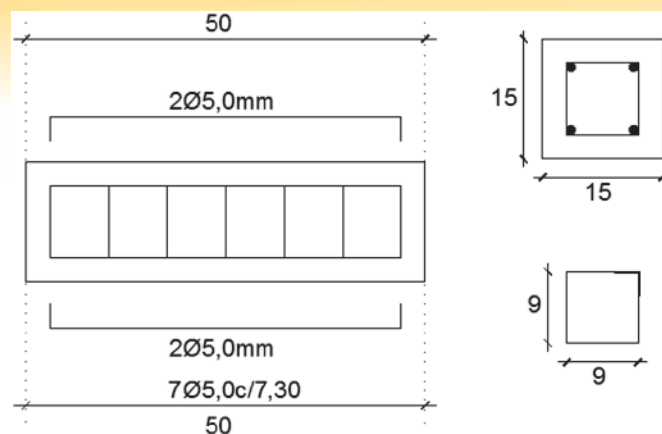
Resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto

Idade (dias)	Resistência à compressão média (MPa)	Módulo de elasticidade - média (GPa)
7	27,8 (2,29)	32,12 (5,85)
144	48,01 (4,09)	44,98 (1,71)

A produção do concreto foi realizada em laboratório, misturando os materiais mecanicamente em uma betoneira, com capacidade de 320 litros. O traço utilizado foi para obter resistência à compressão média de 25 MPa aos 28 dias, tendo como proporção em massa seca 1:2,3:3:0,48 e um consumo de cimento de 367 Kg/m³. Foi utilizado 0,8% (em relação à massa de cimento) de aditivo superplastificante para obter abatimento de 170 mm.

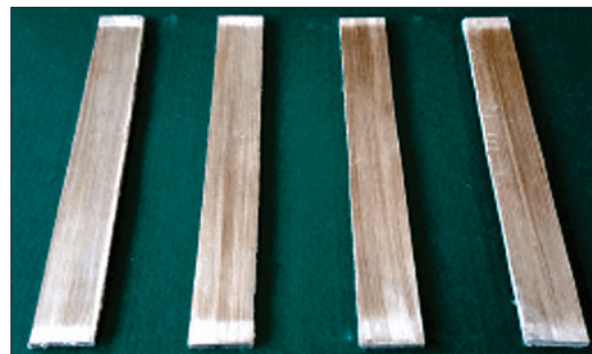
Além das vigas foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm x 20 cm, para caracterização da resistência à compressão (NBR 5739:2007 [29]) e módulo de elasticidade do concreto (ABNT NBR 8522:2008 [30]), ensaiados nas idades de 28 dias e na data do ensaio das vigas. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios do concreto.

O reforço vegetal foi produzido na mesma metodologia descrita no

**Figura 8**

Detalhamento da armadura das vigas

item 2.2, para o teor de 70% de fibras de sisal. A placa moldada apresentava aproximadamente 21,0 cm de largura e 40,5 cm de comprimento e posteriormente foi cortada em quatro corpos de prova com dimensões de 5 cm x 40 cm. A espessura do compósito foi determinada segundo simulações numéricas, conforme explicado no item 2.4, adotando-se uma espessura de aproximadamente 0,55 cm. A Tabela 7 apresenta a composição dos materiais utilizados na produção do reforço vegetal e a Figura 9 apresenta a placa moldada e os compósitos prontos para colagem nas vigas. O reforço de carbono utilizado foi do tipo Sika® CarboDur® S 512. O laminado é reforçado unidirecionalmente com fibras de carbono, apresentando espessura de 1,2 mm e largura de 50 mm. Os mesmos foram cortados com comprimento de 40 cm e posteriormente limpos com acetona, para então ser realizada sua aplicação nas vigas. A Tabela 8 apresenta as propriedades físicas e mecânicas do PRFC. Para a colagem dos reforços nas vigas, a superfície do concreto foi preparada com a retirada da camada mais externa, com o uso de uma esmerilhadeira elétrica, até que os agregados

**a) Placa moldada****b) Reforço pronto para colagem nas vigas****Figura 9**

Polímeros reforçados com fibras de sisal 70% (PRFS)

Tabela 7

Composição dos materiais do reforço vegetal

Placa	Espessura (cm)	Volume (cm ³)	Massa compósito (g)	Massa fibra seca (g)	Massa resina (g)	Massa específica (g/cm ³)	Teor final de fibras em volume (%)
01	0,56	478,19	702,70	531,60	171,10	1,47	74%
02	0,57	479,61	707,20	529,48	177,72	1,47	73%

grãos fossem expostos e toda extensão da viga ficasse nivelada. Em seguida procedeu-se com aplicação dos reforços nas vigas, utilizando um adesivo à base de resina epóxi, misturado na proporção três partes da formulação epóxi para uma parte de catalizador. A Figura 10 apresenta as vigas reforçadas.

Para verificar as propriedades mecânicas do adesivo epóxi, foram re-

Tabela 8

Propriedades físicas e mecânicas do laminado de carbono fornecidas pelo fabricante

Propriedades	Valores
Base	Fibras de carbono em matriz epóxi
Cor	Preta
Conteúdo de fibras em volume	> 68%
Densidade	1,6 g/cm ³
Resistência à temperatura	> 100 °C
Largura	50 mm
Espessura	1,2 mm
Seção transversal	60 mm ²
Módulo de elasticidade	165.000 MPa
Resistência à tração	2.400 MPa
Resistência à tração na ruptura	3.100 MPa
Deformação	> 1,7%

Tabela 9

Propriedades de resistência à compressão média do adesivo epóxi

Idade (dias)	Resistência à compressão média (MPa)
7	61,48 (10,42)



a) PRFC



b) PRFS

Figura 10

Reforços colados nas vigas

alizados ensaios de compressão em três corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 5 cm x 10 cm, para a idade de 7 dias. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para os ensaios do adesivo epóxi. O ensaio de flexão das vigas foi realizado seguindo-se as recomendações descritas pela ABNT NBR 12142:2010 [31], sendo do tipo três pontos (three Point bend). A aplicação da força foi de forma gradual e uniforme, evitando choques, de forma que o aumento da tensão sobre a viga ficou compreendido no intervalo de 0,9 MPa/min a 1,2 MPa/min. O padrão do ensaio está representado na Figura 11. Com a finalidade de melhor compreensão do comportamento do elemento estrutural sob análise foram colados extensômetros elétricos na armadura longitudinal de tração, na região central, a fim de medir as deformações na armadura. Também foram utilizados transdutores do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), para medir o deslocamento no meio do vão da viga. Para posicionar o LVDT na viga foi empregado o sistema YOKE. Este dispositivo é caracterizado por ser um gabarito, constituído por um conjunto de pinos e chapas metálicas. Os suportes do dispositivo YOKE foram colocados sobre os cutelos, para que não houvesse rotação. O LVDT foi fixado no dispositivo YOKE, posicionado na meia altura em cada face lateral da viga, para que o mesmo pudesse mensurar seu deslocamento no meio do vão, não havendo restrições. A Figura 12 mostra a representação esquemática dos detalhes dos suportes do dispositivo YOKE.

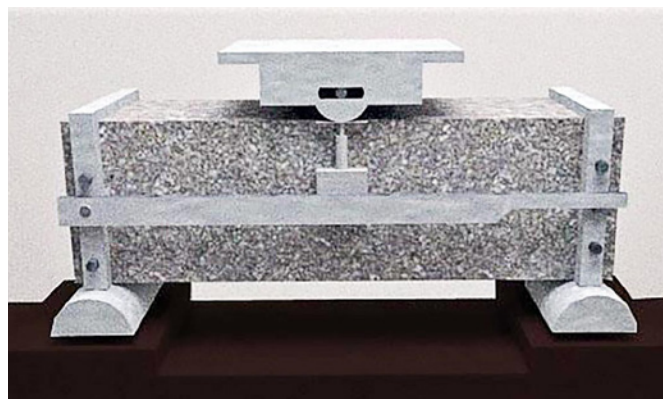


Figura 11

Esquema de ensaio de flexão das vigas

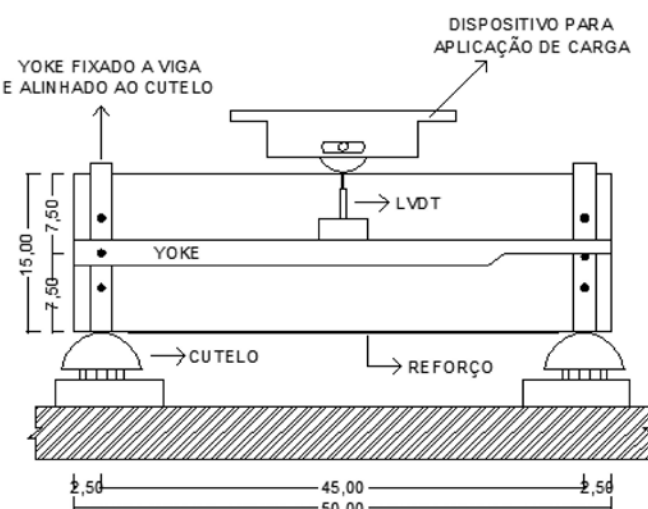


Figura 12

Representação esquemática do dispositivo "YOKE" na viga

Durante a realização dos ensaios, a coleta de dados de força foi registrada por meio do sistema de aquisição de dados da própria Instron, com célula de carga de 100 kN, e para o monitoramento de deflexão e deformações específicas nas armaduras, os dados foram registrados por meio de um sistema de aquisição utilizando um equipamento da HBM conectado ao notebook.

3. Resultados e discussões

3.1 Análise dos resultados dos compósitos vegetais: Fase - 1

Com o aumento do teor de fibras na matriz foi observado um aumento no módulo de elasticidade e resistência à tração dos compósitos, exceto para os reforçados com tecidos de sisal, que houve

uma redução de suas propriedades a partir do teor de 60% para módulo de elasticidade e 50% para resistência à tração e deformação máxima na ruptura (Figura 13, Figura 14 e Figura 15).

Acredita-se que isto ocorreu pelo fato dos fios de sisal terem diâmetros elevados, com uma superfície específica muito menor comparado com as fibras de sisal (para o mesmo teor), o qual acarretou a diminuição da superfície de contato entre resina e reforço, prejudicando a sua aderência com a matriz e assim o desempenho do compósito. Pelo gráfico da Figura 13, observa-se que o teor ótimo para os fios de sisal é 60%.

Portanto, o compósito que apresentou melhor desempenho mecânico foi para o teor de 70%, em volume de fibras de sisal, apresentando valores máximos obtidos nos ensaios de 35,80 GPa e 308,97 MPa, para módulo de elasticidade e resistência à tração, respectivamente. Sendo assim, este foi o compósito

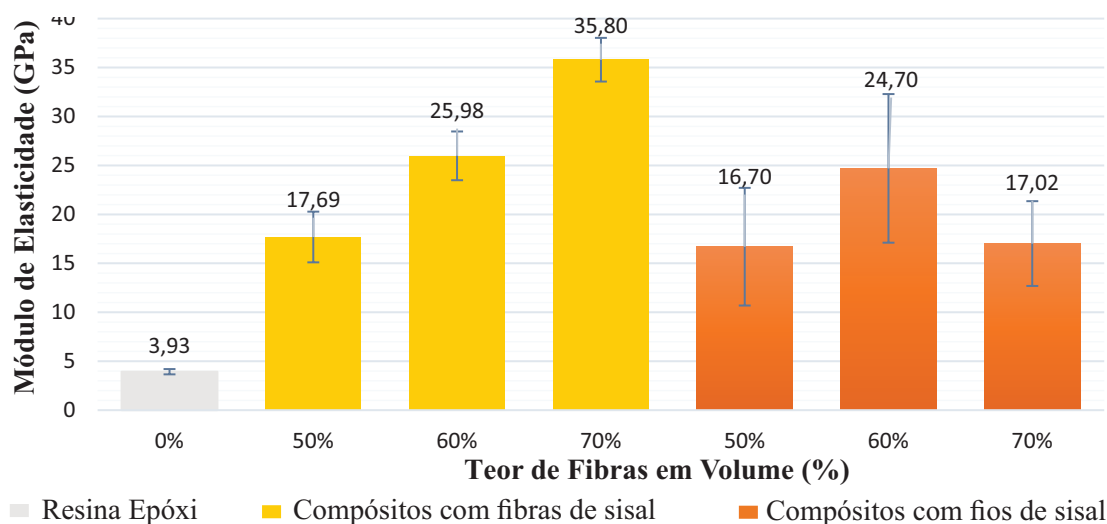


Figura 13

Módulo de elasticidade dos compósitos com fibras e fios de sisal

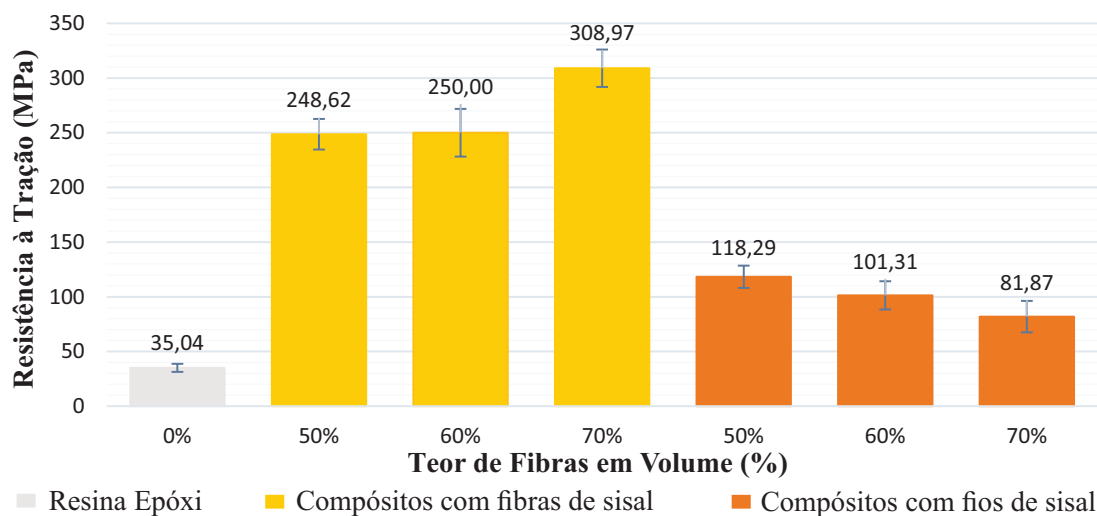
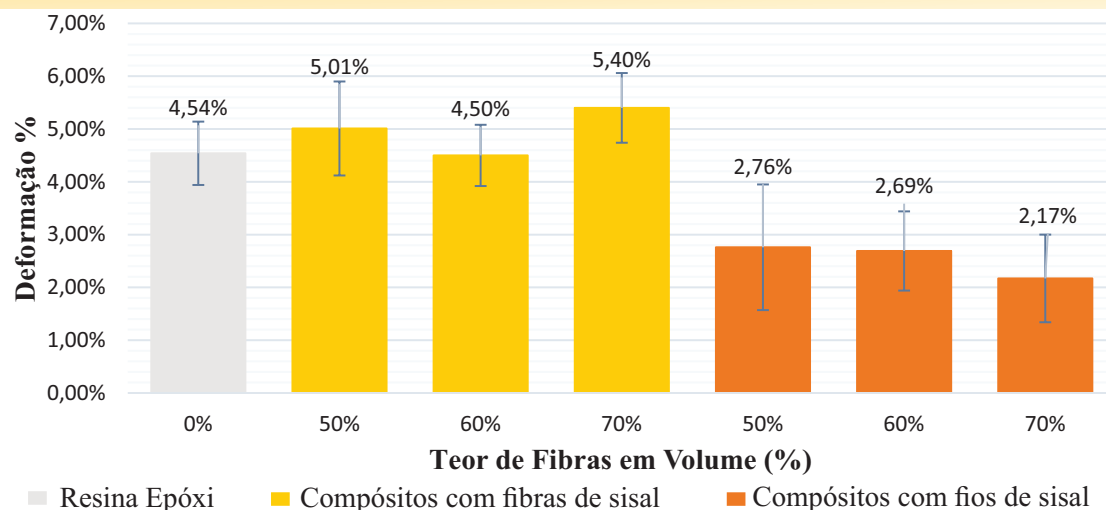


Figura 14

Resistência à tração dos compósitos com fibras e fios de sisal

**Figura 15**

Deformação máxima dos compósitos com fibras e fios de sisal

Tabela 10

Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração do PRFC

Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação máxima (%)
166,82 (20,11)	2,464,48 (285,99)	3,85 (0,41)

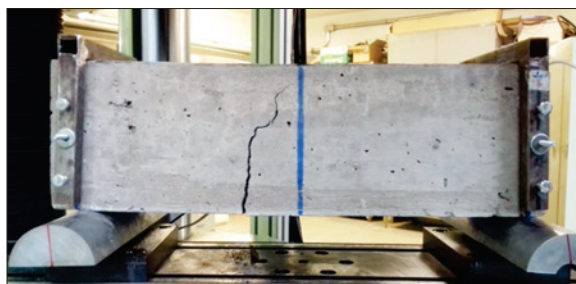
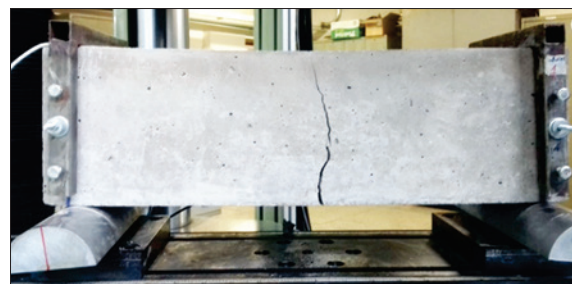
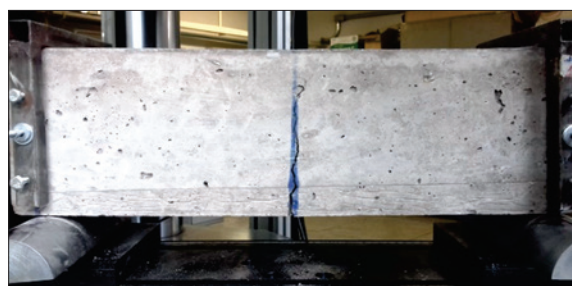
utilizado para testes como reforço à flexão em vigas de concreto armado.

Comparando os resultados das propriedades mecânicas dos compósitos de sisal com os resultados de pesquisa semelhante realizada por Silva et al. [32], os valores obtidos neste trabalho revelam um melhor desempenho. Os valores máximos encontrados pela

autora citada para módulo de elasticidade e resistência à tração foram de 25,59 GPa e 181,20 MPa respectivamente, obtidos para o teor de 70%, em volume de fibras, sendo valores abaixo dos resultados obtidos neste trabalho. A melhora das propriedades mecânicas ocorreu, principalmente, pelo fato do aperfeiçoamento no alinhamento das fibras e produção dos compósitos, considerando que as fibras utilizadas foram as mesmas.

3.2 Compósitos reforçados com fibras de carbono

A Tabela 10 apresenta os resultados médios obtidos nos ensaios à tração dos compósitos de carbono. Entre parênteses estão apresentados os valores de desvios padrão. Observa-se que os resultados obtidos nos ensaios ratificam os resultados informados pelo fabricante (Tabela 8).

**VRef-1****VRef-2****VRef-3****Figura 16**

Modos de ruptura das vigas de referência

3.3 Análise dos resultados das vigas reforçadas: Fase – 2

3.3.1 Modo de ruína das vigas

As vigas de referência (Vref) apresentaram ruptura por escoamento da armadura tracionada sem esmagamento do concreto comprimido, sendo compatível com o domínio 2, no qual as vigas foram dimensionadas, conforme apresentado na Figura 16.

As vigas reforçadas com compósitos de carbono apresentaram descolamento do reforço previamente à ruptura. Isto ocorreu devido ao surgimento de fissuras intermediárias de flexão e cisalhamento que se propagaram em direção à extremidade do reforço, provocando altas tensões tangenciais e de tração na interface,

que excederam a resistência do elemento mais fraco, o qual conduziu à separação do reforço da viga. Apenas a viga RC-3 apresentou ruptura por cisalhamento, por ter alcançado sua capacidade máxima ao cisalhamento antes da falha por flexão. A Figura 17 apresenta os modos de ruína das vigas do grupo RC.

Muitos trabalhos encontrados na literatura alertam sobre a existência de modos de ruínas frágeis da ligação reforço-concreto no reforço de vigas, principalmente quando se opta pelo uso do PRFC [4, 5, 33, 34]. O surgimento de uma ruína frágil observado neste trabalho indicou que não houve o total aproveitamento das propriedades resistentes à tração do laminado de carbono.

As vigas ensaiadas do grupo RS, uma das vigas rompeu pelo descolamento do reforço e o restante sofreu ruptura na camada de cobrimento de concreto entre a armadura e o reforço. Isso ocorreu devido às altas

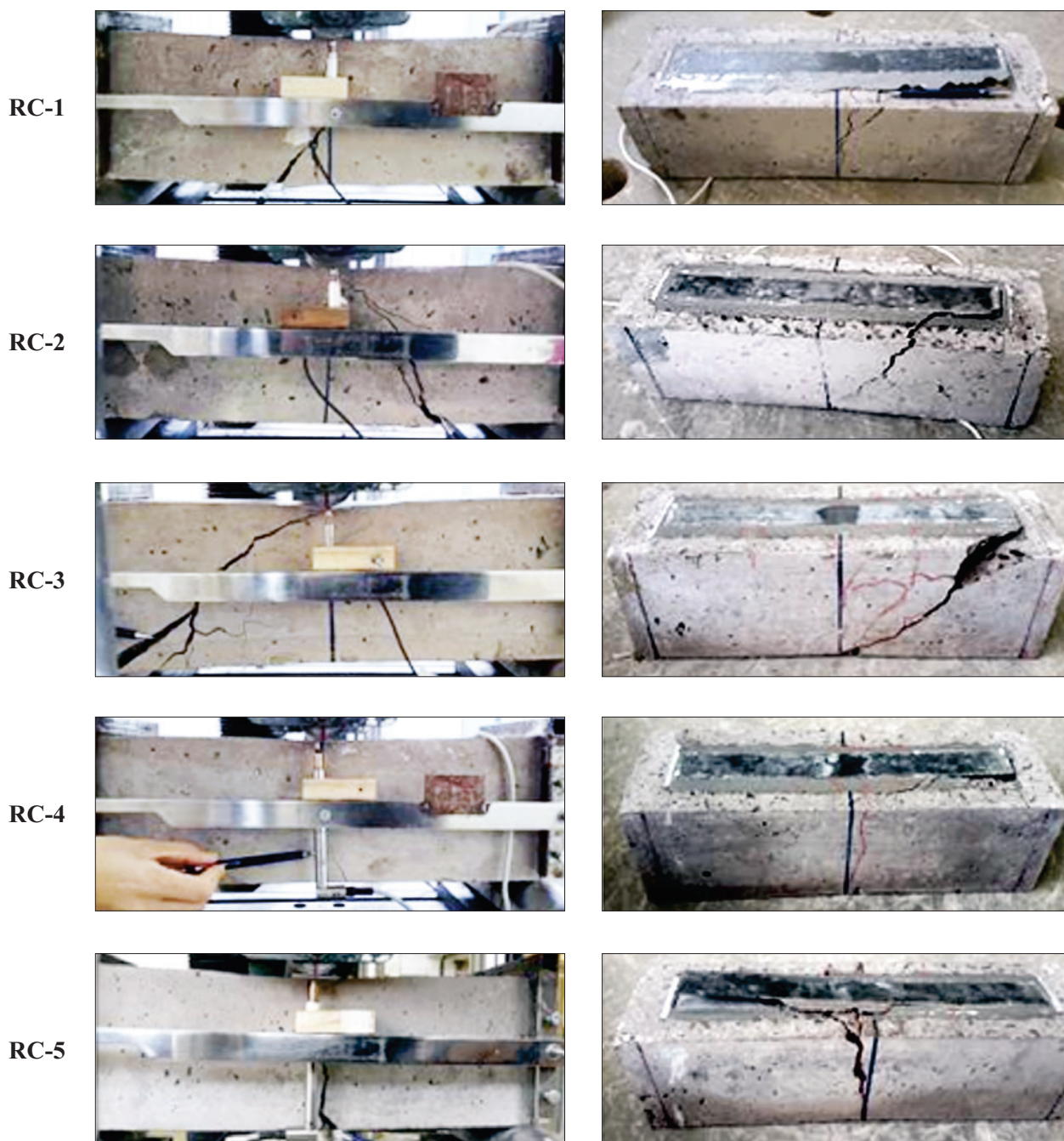


Figura 17
Modo de ruptura das vigas reforçadas com PRFC referente ao grupo RC

tensões na interface que originaram fissuras no final ou próximo ao final do reforço. Essas fissuras se propagaram de forma inclinada até atingir o nível da armadura, progredindo horizontalmente ao longo da mesma, ocorrendo a separação das partes entre concreto e armadura. A Figura 18 apresenta os modos de ruína das vigas do grupo RS.

3.3.2 Esforços gerados nas vigas

A influência dos reforços de PRFC e PRFVeg sobre o comportamento das vigas pode ser observada através da análise da Tabela 11 e das comparações estabelecidas na Figura 19. Esta tabela apresenta os valores médios da força de primeira fissura (F_f) e de ruptura das vigas (F_r), entre parêntese estão expostos os valores de desvios padrão.

Conforme visto no gráfico da Figura 19, constata-se que com a presença do reforço à flexão houve pequeno aumento na força de primeira fissura. Analisando os grupos das vigas reforçadas, nota-se que houve comportamentos semelhantes para ambos os tipos de reforço. Os aumentos médios verificados em relação às vigas sem reforço foram de 3,88% e 4,81%, para reforço com PRFC e PRFVeg, respectivamente.

A presença do reforço à flexão nas vigas de concreto armado promoveu um aumento considerável na força de ruptura, destacando-se o grupo RS, que obteve acréscimo de carga de 61,68%, em relação às vigas de referência. Com o reforço de PRFC o aumento da carga última foi de 53,34%.

Ferrari [35] realizou ensaios semelhante à presente pesquisa, produzindo vigas de concreto armado nas dimensões de 15 cm x 15

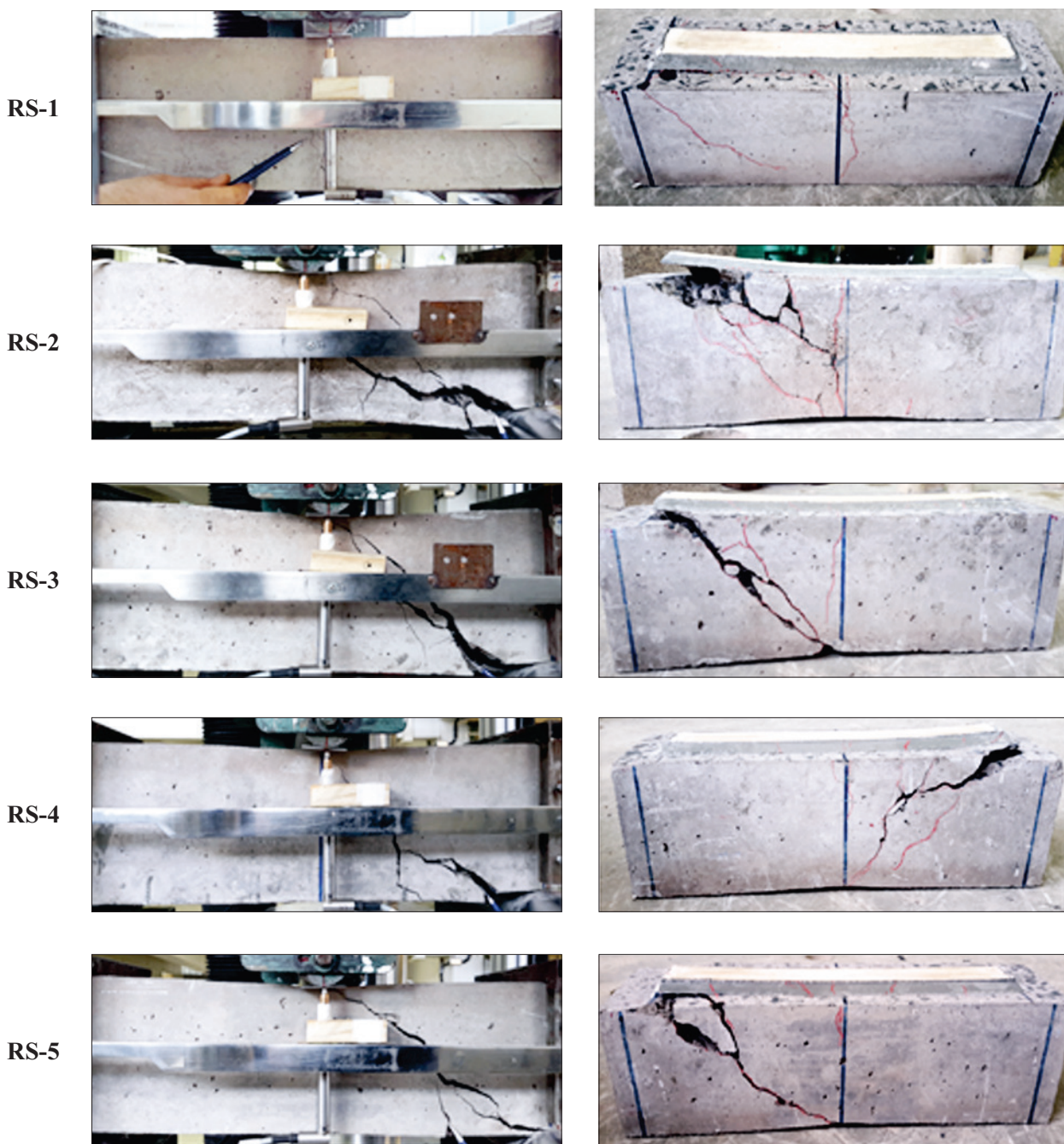


Figura 18
Modo de ruptura das vigas reforçadas com PRFS referentes ao grupo RS

Tabela 11

Esforços e modos de ruptura das vigas prismáticas

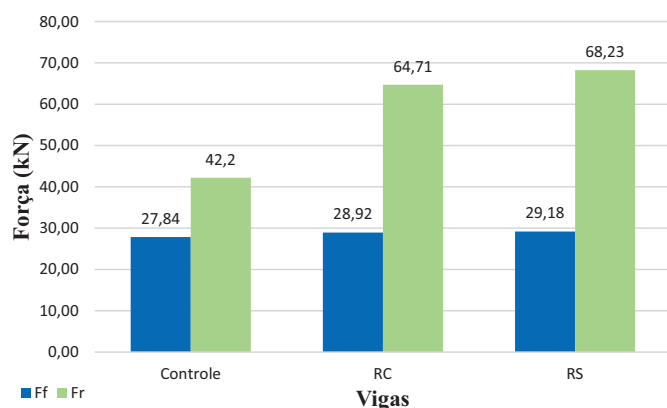
Grupo	F_i (kN)	F_r (kN)	Modo de ruptura	Incrementos (%)	
				F_i	F_r
Controle	27,84 (3,09)	42,20 (2,02)	Deformação excessiva da armadura	–	–
RC	28,92 (3,94)	64,71 (6,80)	Descolamento do reforço	3,88	53,34
RS	29,18 (2,31)	68,23 (6,31)	Destacamento da camada de cobrimento da armadura	4,81	61,68

cm x 75 cm e posteriormente reforçou com mantas de PRFC, submetendo as mesmas ao ensaio à flexão, em três pontos. Para a força de ruptura das vigas, foi observado um aumento percentual médio em relação às vigas sem reforço de 56,11%, sendo valor bem próximo ao obtido nesta pesquisa.

A Figura 20 apresenta as curvas médias obtidas experimentalmente de força x deslocamento vertical, no meio do vão, para as vigas reforçadas e sem reforço. Verifica-se que a presença do reforço nas vigas de concreto armado, além de proporcionar elevação da força de ruptura, resultou em ganho na rigidez da seção. É evidente o aumento da rigidez das vigas após o aparecimento da primeira fissura no concreto.

Nota-se ainda uma maior extensão do trecho final da curva das vigas reforçadas com PRFVeg, sinalizando que estes reforços foram mais solicitados do que os reforços com fibras de carbono. Observa-se o acréscimo de 100% na força após o escoamento da armadura para as vigas com reforço, enquanto para as vigas sem reforço esse acréscimo atingiu aproximadamente 48%.

Ainda é possível observar na Figura 20 que os ramos ascendentes das curvas referentes às vigas reforçadas com PRFVeg, mostram maior rigidez inicial comparadas às vigas reforçadas com PRFC. Isto pode ter sido ocasionado devido ao módulo de elasticidade do adesivo epóxi ser próximo ao do concreto e dos PRFVeg, com isso tais reforços absorveram melhor as deformações geradas nas vigas inicialmente do que os reforços de carbono, em que parece ocorrer uma espécie de “escorregamento” entre os compósitos de elevado módulo e a estrutura, pela maior deformação do adesivo, comparado ao reforço.

**Figura 19**

Comparação das forças de ruptura e fissuração das vigas ensaiadas

Fez-se um comparativo entre os deslocamentos verticais médios das vigas, no meio do vão, quando as mesmas foram submetidas a um carregamento igual a 90% da força de ruptura, do grupo de referência (VRef). Os dados de ensaio neste momento estão apresentados na Tabela 12.

Os valores mostram que as vigas reforçadas, com ambos os compósitos, obtiveram menores deslocamentos que as vigas de referência, considerando uma mesma carga aplicada, o que confirma que o reforço foi eficaz. Analisando os grupos das vigas reforçadas, nota-se que a flecha das vigas RC foi 25% da flecha das vigas VRef. O deslocamento das vigas RS apresentam valor correspondendo a 22% da flecha das vigas de referência, submetidas à mesma carga. Isto mostra que o comportamento de ambas as vigas reforçadas foi parecido, confirmando a autenticidade dos resultados obtidos pela simulação numérica.

Portanto, a inovação proposta neste trabalho, que é reforçar vigas de concreto armado à flexão por meio da colagem destes materiais compósitos de resina epóxi com fibras de sisal, não somente é eficiente em termos de capacidade de carga, como também em termos de rigidez, tendo ainda as vantagens de ser um material natural, renovável, com baixo custo e consumo de energia para sua produção.

3.3.3 Deformações específicas na armadura

A Figura 21 apresenta a evolução do comportamento estrutural

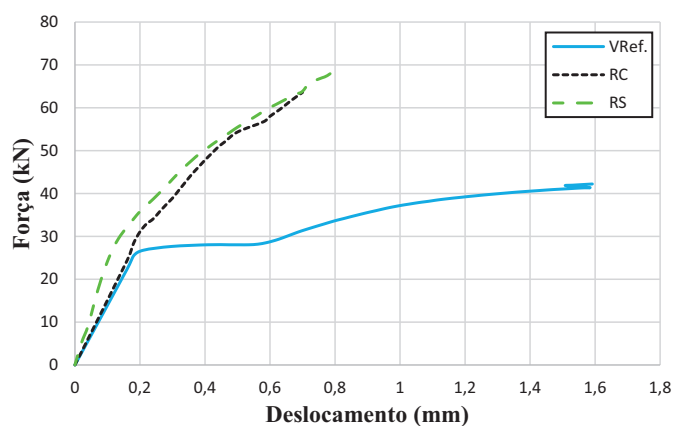
**Figura 20**

Diagrama força x deslocamento médio, obtidos para as vigas de concreto armado reforçadas à flexão com PRFC e PRFVeg

Tabela 12

Comparativo das flechas médias para carregamento igual a 90% da carga de ruptura das vigas de referência

Vigas	Flecha (mm)	Comparativo (%)
V _{Ref.}	1,07	100
RC	0,27	25
RS	0,24	22

de todas as vigas, em relação a força x deformação média das armaduras longitudinais de tração. Da análise dos diagramas é possível tecer os comentários a seguir.

Não foi possível fazer a leitura de deformação no momento de ruptura das vigas, pelo fato de ter ocorrido fissuração na região onde estavam localizados os extensômetros, danificando os mesmos nos momentos antecedentes à ruptura.

Comparando o comportamento das vigas de referência com as vigas reforçadas, nota-se que as forças correspondentes às deformações nas armaduras longitudinais de tração foram maiores nas vigas reforçadas do que nas vigas de referência. Este gráfico mostra que os reforços absorvem uma parcela das tensões aplicadas, aliviando as tensões no substrato, permitindo ao sistema absorver maiores solicitações.

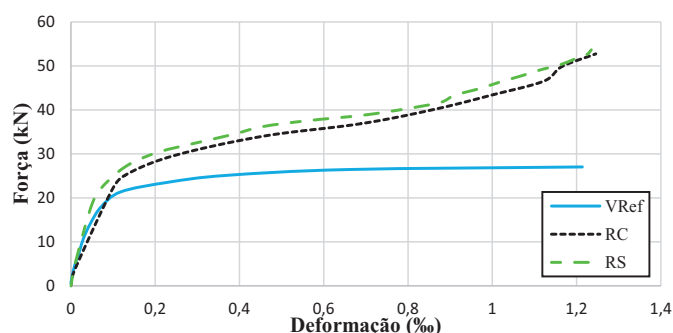
**Figura 21**

Diagrama força x deformação da armadura, obtidos para as vigas de concreto armado reforçadas à flexão com PRFC e PRFVeg

Tabela 13

Análise da variância entre V_{Ref}, RC e RS

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	1.390,282	2	695,1413	19,74504	3,3682E-04	4,1028
Dentro dos grupos	352,0588	10	35,20588	–	–	–
Total	1.742,341	12	–	–	–	–

SQ é a soma dos quadrados de todos os desvios em relação à média de todas as observações (entre e dentro das amostras); gl é o grau de liberdade; MQ é a média quadrática (entre e dentro das amostras).

$$F = \frac{\text{variância entre amostras}}{\text{variância dentro das amostras}}$$

valor-P é a probabilidade da hipótese nula ser verdadeira. Adotou-se o nível de significância do teste de 0,05.

F crítico é o valor calculado em função do nível de significância e dos graus de liberdade da variância entre e dentro das amostras.

Comparando o comportamento dos diferentes reforços, nota-se desempenho semelhante entre eles, embora os compósitos vegetais apresentem, via de regra, forças mais elevadas absorvidas pela estrutura, do que os compósitos de carbono para uma dada deformação na armadura.

3.3.4 Análise da influência dos reforços na carga de ruptura por ANOVA

Foi realizada a análise da variância-ANOVA nos resultados obtidos quanto à força de ruptura das vigas estudadas. Na Tabela 13 estão apresentados os resultados estatísticos obtidos entre todas as séries ensaiadas.

Houve evidência de que o reforço influenciou na carga de ruptura, pois F obtido foi maior que F_{crítico} e, também, o valor-P foi inferior a 0,05. Embora as vigas ensaiadas tenham rompido por cisalhamento, a rigidez da parte reforçada pode ter influenciado nos mecanismos de distribuição de tensões, permitindo as variações de carga verificadas.

Também foi realizada a análise da variância-ANOVA para verificar se houve influência na carga de ruptura entre as séries reforçadas. Na Tabela 14 estão apresentados os resultados estatísticos obtidos entre as vigas reforçadas.

Nota-se que não houve diferença significativa entre os diferentes tipos de reforço, visto que o F obtido foi menor que o F_{crítico}. Portanto, o reforço com os compósitos de fibras vegetais apresentou desempenho similar aos já consagrados compósitos com fibras de carbono.

4. Conclusões

O presente trabalho teve por finalidade avaliar a viabilidade do uso de PRFVeg em substituição aos compósitos com fibras de carbono para reforço à flexão em vigas de concreto armado, com o desenvolvimento de três passos principais:

O primeiro passo foi obter experimentalmente as propriedades elásticas dos compósitos de carbono 68% e sisal com teores de 50%, 60% e 70%, em volume de fibras, afim de analisar seu comportamento como reforço estrutural. Para os compósitos com fibras de sisal foi observado que a medida que aumentava o teor de fibras nos compósitos, ocorreu aumento no módulo de elasticidade e resistência à tração.

Tabela 14

Análise da variância entre RC e RS

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	30,976	1	30,976	0,720656	0,420604	5,317655
Dentro dos grupos	343,8646	8	42,98308	–	–	–
Total	374,8406	9	–	–	–	–

Os resultados obtidos para os compósitos com tecidos de sisal apresentaram acréscimos no módulo de elasticidade até a fração de 60%, havendo redução desta propriedade para o teor de 70%, indicando que, para o reforço com esta relação de aspecto, o teor ótimo estaria entre 50% e 60%. A queda deste resultado ocorreu pelo fato da sessão transversal dos fios serem grandes, na ordem de 2 mm, faltando resina e prejudicando a transferências das tensões para o reforço, comprometendo as propriedades de resistência à tração e módulo de elasticidade para teores elevados.

Entre os diversos teores de fibras e tecidos estudados, o compósito com 70% de fibras de sisal apresentou melhor desempenho mecânico, apresentando módulo de elasticidade na ordem de 36 GPa, sendo este, utilizado como reforço em vigas de concreto armado.

No segundo passo foi feita análise numérica das estruturas reforçadas, utilizando o programa computacional ANSYS®, para comparar a eficiência dos compósitos poliméricos de fibras de carbono e vegetais, em que os compósitos vegetais demandaram uma espessura de 5,5 mm para alcançar desempenho mecânico semelhante do PRFC.

Com a simulação numérica foi feita uma análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos para avaliar o comportamento da estrutura sob condições de solicitações fixadas. Não foram considerados critérios específicos de dimensionamento, o que não foi necessário nesta etapa de estudo e pré-dimensionamento do material. Finalmente, optou-se em utilizar como parâmetro principal de quantificação do comportamento das vigas o estado limite último, que é a tensão normal na face inferior e superior do concreto, até porque o estado limite de utilização analisado, que é a flecha, apresenta poucas alterações quando se acrescenta e quando se muda o reforço. O trabalho foi finalizado com um estudo experimental das vigas reforçadas, comparando o efeito de dois tipos de reforços (carbono e sisal) em vigas de concreto armado. Analisando os dados das vigas ensaiadas, os resultados experimentais mostraram que: O compósito com fibras de sisal sinalizou ser mais eficiente do que o reforço com fibras de carbono, em termos de rigidez nos primeiros momentos de carregamento. Acredita-se que, como o módulo de elasticidade do adesivo epóxi é bem próximo do concreto e do reforço vegetal, ambos contribuíram para melhor absorção dos esforços gerados inicialmente nas vigas do que os reforços de carbono.

A influência do tipo de fibra no reforço das vigas não foi significativa no que diz respeito ao incremento de carga, modo de ruptura e fissuração, uma vez que os reforços das vigas foram dimensionados para promoverem os mesmos incrementos de carga. A maior força de ruptura entre as vigas reforçadas foi para o reforço com fibra de sisal com incremento da capacidade de carga de 61,68%, relação as vigas de referência.

Os modos de ruptura das vigas reforçadas foram frágeis, envolvendo o rompimento das vigas por destacamento ou descolamento do reforço.

A análise comparativa dos resultados obtidos permite concluir que os compósitos de matriz epóxi com fibras de sisal são viáveis para reforçar estruturas em concreto armado, apresentando desempenho similar aos já consagrados compósitos reforçados com fibras de carbono (PRFC).

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pela bolsa concedida e à EM-MIG-Estruturas Metálicas Minas Gerais pelo fornecimento das chapas metálicas para a produção da fôrma do reforço vegetal.

6. Referências bibliográficas

- [1] DIMANDE, A. O. Influência da interface no reforço à flexão de estruturas de betão com sistemas FRP, Porto, 2003, Tese (mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 254p.
- [2] DONG, J.; WANG, Q.; GUAN, Z. Structural behaviour of RC beams with external flexural and flexural-shear strengthening by FRP sheets. *Composites Part B: Engineering*, v. 44, n. 1, 2013; p. 604-612.
- [3] AL-AMERY, R.; AL-MAHAIDI, R. Coupled flexural-shear retrofitting of RC beams using CFRP straps. *Composite Structures*, v. 75, n. 1-4, 2006; p. 457-464.
- [4] FERRARI, V. J.; HANAI, J. B. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with carbon fibers reinforced polymer (CFRP) sheet bonded to a transition layer of high performance cement-based composite. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 5, 2012; p. 596-626.
- [5] FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J.; LORIGGIO, D. D. Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 24, 2002; p. 1783-1791.
- [6] TENG, J. G.; CHEN, J. F.; SMITH, S. T.; LAM, L. FRP: strengthened RC structures. *Frontiers in Physics*. 2002; p. 266.
- [7] MENEGHETTI, L. C.; FILHO, L. C. P. S.; GARCEZ, M. R. Verificação da possibilidade de variação das fibras formadoras do compósito nos sistemas PRF aplicados no reforço à flexão de vigas de concreto armado. *Ciência & Engenharia*, v. 16, n. 1/2, 2007; p. 107-114.
- [8] CERONI, F. Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 9, 2010; p. 1547-1559.
- [9] WENWEI, W.; GUO, L. Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load. *International Journal of Solids and Structures*, v. 43, n. 6, 2006; p. 1372-1387.
- [10] PEREIRA, P. H. F.; ROSA, M. F.; CIOFFI, M. O. H.; BENINI,

- K. C. C. C.; MILANESE, A. C.; VOORWALD, H. J. C.; MULINARI, D. R. Vegetal fibers in polymeric composites: a review. *Polímeros*, v. 25, n. 1, 2015; p. 9-22.
- [11] KU, H.; WANG, H.; PATTARACHAIYAKOOP, N.; TRADA, M. Review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 42, n. 4, 2011; p. 856-873.
- [12] LIMA, B. S.; PEREIRA, F. M.; LENZ, D. M.; VERNEY, J. C. K. Influência da fibra de curauá em compósitos cimentícios: verificação da resistência à flexão e da resistência à compressão. *Revista de Iniciação Científica da ULBRA*, v. 1, n. 9, 2011.
- [13] MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D.; FERREIRA, A. S.; NASCIMENTO, D. C. O. Natural-fiber polymer-matrix composites: cheaper, tougher, and environmentally friendly. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, v. 61, n. 1, 2009; p. 17-22.
- [14] SMOLE, M. S.; HRIBERNIK, S.; KLEINSCHKE, K. S.; KREŽE, T. Plant fibres for textile and technical applications. *Advances in agrophysical research*, v. 10, 2013; p. 52372.
- [15] MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. *Composite materials: engineering and science*. Elsevier, 1999.
- [16] JACOB, M.; THOMAS, S.; VARUGHESE, K. T. Novel woven sisal fabric reinforced natural rubber composites: tensile and swelling characteristics. *Journal of composite materials*, v. 40, n. 16, 2006; p. 1471-1485.
- [17] LACERDA, M. R. B.; PASSOS, M. A. A.; RODRIGUES, J. J. V.; BARRETO, L. P. Características físicas e químicas de substratos à base de pó de coco e resíduo de sisal para produção de mudas de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth). *Revista Árvore*, v. 30, 2006; p. 163-170.
- [18] MOTTA, L. A. C.; AGOPYAN, V. Caracterização de fibras curtas empregadas na construção civil. *Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Escola Politécnica-Departamento de Engenharia de Construção Civil-USP*, São Paulo, 2007.
- [19] MOTTA, L. A. C.; GONÇALVES, L. K. S.; SILVA, M. R.; CUNHA, J.; DANTAS, M. E. Painéis sanduíches de poliéster reforçado com fibras de rami para aplicação na Construção Civil. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 21, 2016; p. 796-806.
- [20] KAEWKUK, S.; SUTAPUN, W.; JARUKUMJORN, K. Effects of interfacial modification and fiber content on physical properties of sisal fiber/polypropylene composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 45, n. 1, 2013; p. 544-549.
- [21] ANTICH, P.; VÁZQUEZ, A.; MONDRAGON, I.; BERNAL, C. Mechanical behavior of high impact polystyrene reinforced with short sisal fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 37, n. 1, 2006; p. 139-150.
- [22] TRAGOONWICHIAN, S.; YANUMET, N.; ISHIDA, H. Effect of fiber surface modification on the mechanical properties of sisal fiber-reinforced benzoxazine/epoxy composites based on aliphatic diamine benzoxazine. *Journal of applied polymer science*, v. 106, n. 5, 2007; p. 2925-2935.
- [23] MOHAN, T. P.; KANNY, K. Water barrier properties of nano-clay filled sisal fibre reinforced epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 42, n. 4, 2011; p. 385-393.
- [24] SOUSA, L. K. *Produção e Caracterização Mecânica de Compósitos de Resina Poliuretana à Base de Óleo de Mamona e Fibras de Rami, Sisal e Bucha Vegetal*, Uberlândia, 2013, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, 98 p.
- [25] SOARES, I. M. *Produção e caracterização de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibra de rami para fins de reforço estrutural*, Uberlândia, 2012, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, 98 p.
- [26] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method For Tensile Properties of Plastics*. - ASTM D638, Philadelphia, 2012.
- [27] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method For Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. - ASTM D3039, Philadelphia, 2014.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado*. - NBR 7480, Rio de Janeiro, 2007.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto - Ensaio de Compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. - NBR 5739, Rio de Janeiro: 2007.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. - NBR 8522, Rio de Janeiro, 2008.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto - Determinação da resistência a tração na flexão de corpos de prova prismáticos*. - NBR 12142, Rio de Janeiro, 2010.
- [32] SILVA, A. P. O.; QUARESMA, S. C.; MOTTA, L. A. C.; FRANCKLIN, H. M. Estudo das propriedades mecânicas de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibras de sisal para reforço de estruturas de concreto. In: *13º Congresso Brasileiro de Polímeros*, Natal, 2015.
- [33] FERRARI, J. V.; HANAI, J. B. Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a Substrato de transição constituído por compósito Cimentício de alto desempenho. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v. 11, n. 51, 2009; p. 37-56.
- [34] BEBER, A. J. *Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono*, Porto Alegre, 2003. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 317 p.
- [35] FERRARI, V. J. Reforço à flexão de vigas de concreto armado com mantas de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho. São Carlos, 2007. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 317 p.