

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE 3 TIPOS DE RESINAS NO REFORÇO DE FIBRAS DE CARBONO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO ROMPIDAS POR FLEXÃO NORMAL

João Vitor Custódio de Souza (1), Daiane dos Santos da Silva Godinho (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)joao-sc@unesc.net, (2)dss@unesc.net

RESUMO

O reforço com fibras de carbono em estruturas de concreto armado tem apresentado um excelente desempenho, mostrando ser uma boa opção para recuperação estrutural. O presente trabalho busca avaliar a influencia de diferentes tipos de resinas utilizadas no reforço de fibras de carbono em vigas de concreto armado rompidas por flexão normal. Para a execução dos ensaios foram confeccionadas 09 vigas de concreto armado. As vigas foram divididas em três grupos, compostos por três vigas que foram submetidas ao ensaio de flexão à 04 pontos até sua ruptura, em seguida as vigas foram reforçadas com fibras de carbono na região tracionada utilizando diferentes tipos de resinas em cada grupo. Foram utilizados nos testes duas resinas epóxi, uma a base de bisfenol F e outra a base de bisfenol A e uma resina poliéster insaturada ortofálica. Após as vigas serem reforçadas, foi analisado o desempenho de cada grupo através do ensaio de flexão à 04 pontos para determinar a eficiência de cada resina no reforço de fibras de carbono. As resinas epóxi apresentaram um melhor desempenho, com um aumento de resistência nas vigas reforçadas de 69,86 % utilizando a resina epóxi a base de bisfenol F e 65,33 % utilizando a resina epóxi a base de bisfenol A. A resina poliéster apresentou um aumento de carga na ruptura das vigas reforçadas de 45,05 %, apresentando uma diferença estatisticamente significativa no aumento de carga em relação as resinas epóxi. Apesar da resina poliéster apresentar um menor desempenho em relação as resinas epóxi, a mesma apresentou um bom desempenho no reforço com fibras de carbono e possui um custo 70% inferior as resinas epóxi. A escolha da resina mostrou ser de grande importância no desempenho do reforço com fibras de carbono, apresentando aumentos de carga significativos utilizando diferentes tipos de resinas.

Palavras chave: Resinas; Fibra de carbono; Reforço estrutural.

1. INTRODUÇÃO

A manutenção e reforço de estruturas de concreto armado é algo inevitável, sendo que todas as estruturas de concreto armado, em algum momento podem precisar

dos mesmos. Essas manutenções podem ocorrer devido ao tempo de vida útil da obra, falhas de execução, projeto ou até mesmo acidentes.

O concreto armado apresenta dificuldades de reajuste da capacidade de carga, uma vez que a estrutura esteja consolidada. Devido também ao envelhecimento das edificações, muitas construções começaram a apresentar falhas, necessitando de intervenção e reparos em seus elementos estruturais como a adição de armaduras, colagem de mantas de polímeros reforçadas com fibra e aplicação de chapas de aço e perfis metálicos. (ZUCCHI, 2015, p. 7)

De todas as fibras sintéticas que podem ser utilizadas no reforço de estruturas, destaca-se o sistema polimérico estruturado com fibra de carbono. Devido à sua leveza e grande força de ligação entre os átomos de carbono, esse compósito torna-se um material altamente promissor. (ARQUEZ, 2010).

Os sistemas compostos com fibras de carbono possuem uma grande variedade de aplicação para reforço em elementos de concreto armado, principalmente em elementos estruturais que estão sujeitos a momentos fletores, com suas determinadas tensões de tração e compressão, esforços cortantes e de torção. (MACHADO, 2010).

Entre os materiais mais utilizados na recuperação e reforço de estruturas estão as resinas sintéticas, essas resinas são formadas por monômeros, que formam polímeros de cadeias de grande extensão ao reagirem com catalisadores, sendo que suas características variam de acordo com o monômero e o catalisador utilizados e com as proporções desses para a formação dos polímeros. (RIPPER, 1998).

Um dos maiores problemas enfrentados nos reforços com fibras de carbono é a má aderência da fibra ao concreto, comprometendo a eficiência de todo o sistema de reforço. Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo analisar e avaliar a eficiência de diferentes tipos de resinas utilizadas no reforço estrutural com fibras de carbono em vigas de concreto armado sujeitas a flexão após sua ruptura.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução dos ensaios foram confeccionadas 09 vigas de concreto armado. As vigas foram divididas em três grupos, denominados grupos A, B e C. Cada grupo

foi composto por três vigas que foram submetidas ao ensaio de flexão à 04 pontos até sua ruptura. Após a ruptura as vigas foram reforçadas com fibras de carbono na região tracionada utilizando diferentes tipos de resinas em cada grupo, denominadas resinas A, B e C. A tabela 1 mostra a nomenclatura e as características de cada resina.

Tabela 1: Nomenclatura e características de cada resina

Nomenclatura das Resinas	
Resina A	Epóxi à base de bisfenol F
Resina B	Epóxi à base de bisfenol A
Resina C	Poliéster insaturada Ortofálica

Fonte: Autor, 2017.

Após as vigas serem reforçadas, foi analisado o desempenho de cada grupo através do ensaio de flexão à 04 pontos para determinar a eficiência de cada resina no reforço com compósitos de fibras de carbono.

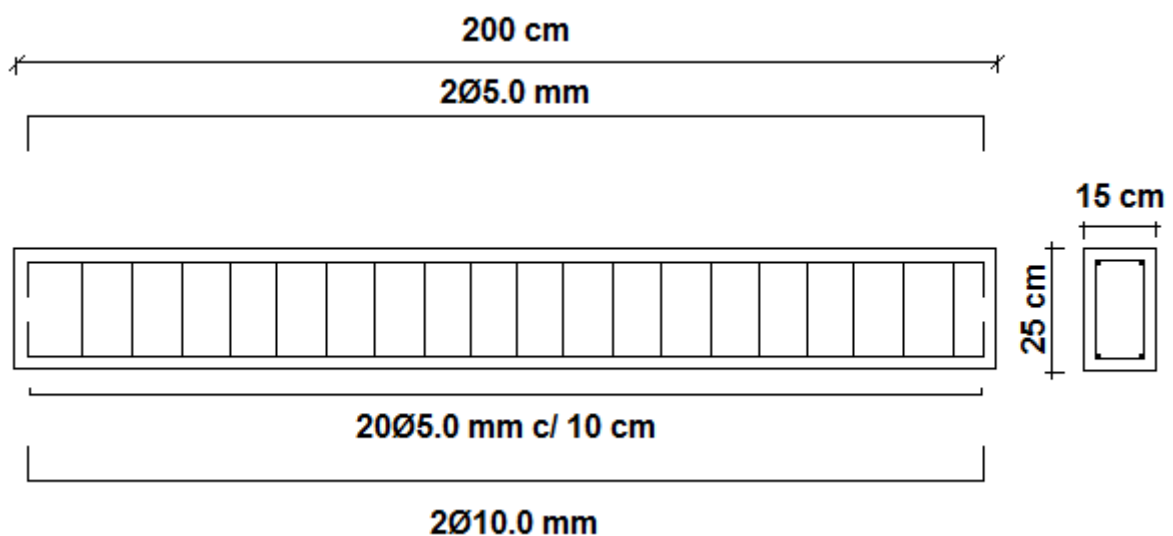
2.1 CONFECÇÃO DAS VIGAS

As vigas fabricadas possuem seção de 15x25 cm e comprimento de 200 cm. Foram concretadas simultaneamente junto com 12 corpos de prova, que foram moldados e curados de acordo com a norma NBR 5738:2015, para fazer a caracterização do concreto através dos ensaios de compressão axial NBR 5739:2007, tração por compressão diametral NBR 7222:2010 e módulo de elasticidade NBR 8522:2008. Para fazer o adensamento foi utilizado vibrador de imersão e para o acabamento colher de pedreiro.

De acordo com a NBR 6118:2014, para classe de agressividade ambiental II, utilizou se espaçadores para garantir o cobrimento de 2,5 cm da armadura. As vigas foram dimensionadas de acordo com os critérios exigidos pela NBR 6118:2014, considerando a resistência característica do concreto de 30 MPa e aço CA-50. Para a armadura de flexão foram utilizadas duas barras com 10 mm de diâmetro que resultou em uma área de aço de 1,6 cm², sendo essa área de aço maior que a área de aço mínima necessária de 0,56 cm². Na armadura de cisalhamento, foram utilizados estribos com 5 mm de diâmetro posicionados com um espaçamento de 10

cm. Os estribos executados foram todos posicionados de acordo com os critérios de espaçamento máximo e de diâmetro mínimo, exigidos pela NBR 6118:2014. Foi utilizado o modelo de cálculo 1 disposto na NBR 6118:2014 para o dimensionamento dos estribos, adotando-se ângulos de inclinação dos estribos de 90 graus e 45 graus para as bielas de compressão. A figura 1 mostra como ficará o detalhamento da armadura das vigas.

Figura 1: Detalhamento da armadura das vigas



Fonte: Autor, 2017.

2.2 ENSAIO DE FLEXÃO NAS VIGAS DE REFERENCIA (SEM REFORÇO)

Aos 28 dias de idade foi feita a desforma das vigas, e em seguida as vigas foram transportadas para o Laboratório Experimental de Estruturas da UNESC, que fica localizado no Iparque, onde foi realizado o ensaio de flexão à 04 pontos nas vigas de referência até sua ruptura. A carga de ruptura das vigas foi considerada no momento em que as vigas atingiram sua carga máxima, ou seja, quando houve um decréscimo no valor de carga no equipamento, o mesmo foi desligado e o ensaio estava concluído.

O objetivo deste ensaio foi obter a ruptura do concreto e a danificação das estruturas, para que o procedimento de recuperação estrutural fosse possível de ser estudado. Os resultados obtidos nas vigas de referência foram utilizados para calcular a quantidade de reforço de fibra de carbono necessária nas vigas para fazer sua recuperação, e também foram comparados com os resultados obtidos no

ensaio de flexão nas vigas reforçadas com fibras de carbono após sua ruptura. A figura 2 mostra o ensaio de flexão nas vigas de referência.

Figura 2: Ensaio de flexão em 4 pontos nas vigas de referência



Fonte: Autor, 2017.

2.3 FIBRAS DE CARBONO

As fibras de carbono utilizadas nesta pesquisa para a execução do reforço nas vigas de concreto armado foram doadas pela empresa Fibertex Louveira Produtos Têxteis Ltda. As fibras de carbono utilizadas possuem 0,20 mm de espessura e peso de 321 g/m², dentre suas principais aplicações estão o reforço estrutural, reforço plástico, produtos náuticos e esportivos. As faixas de fibra de carbono foram cortadas com dimensões de 15x200 cm, para que cobrisse assim toda a região tracionada da viga que recebeu o reforço sem a necessidade de executar traspasse entre as fibras.

2.4 RESINAS

Segundo TESTONI (2011) "A resina epóxi é uma resina termofixa que possui excelentes propriedades mecânicas e químicas que tornam sua aplicação economicamente viável quando for necessário realizar laminações de alta performance". Em geral, são formulações do tipo bi-componente, formada por um agente principal que é a própria resina e um catalisador, que é o endurecedor.

As resinas epóxi a base de Bisfenol A são as mais utilizadas, pois são versáteis e possuem menor custo, são provenientes da reação de Epicloridrina e Bisfenol A, dependendo do seu peso molecular elas podem ser líquidas, semi-sólidas ou sólidas. Temos também as resinas epóxi a base de Bisfenol F, onde a troca do Bisfenol A pelo Bisfenol F proporciona a estas resinas melhor desempenho mecânico, químico e térmico. NETO (2005).

As resinas poliéster também são usadas na construção civil, dentre as resinas poliéster, a mais comum e de menor custo para usos básicos são as resinas poliéster insaturadas ortofálicas, que pode ser usadas na laminação em reforço de fibras. Nas resinas poliéster, usualmente os catalisadores são peróxidos orgânicos diluídos aproximadamente 50% em solução, sendo o catalisador mais comum o peróxido de metiletilcetona (MEKP). (SILAEX, 2006).

2.5 CÁLCULO DO REFORÇO

Para determinar a quantidade de reforço necessário nas vigas após a ruptura, foi aplicado o método de dimensionamento de Relvas (2003), como apresentado na apostila Manual de Reforço de Vigas de Concreto Armado à Flexão com Fibra de Carbono, que segue as determinações da ACI -440. Com os dados obtidos nos ensaios de flexão à 04 pontos nas vigas de referência, através da sua carga de ruptura determinou-se o momento que cada viga resistiu, e a partir desse momento, a quantidade necessária de reforço para absorção deste esforço. Através dos cálculos para determinação do reforço, determinou-se que para todas as vigas é necessário uma camada de reforço com fibras de carbono para a absorção dos esforços solicitantes.

2.6 APLICAÇÃO DO REFORÇO COM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO

A aplicação do reforço iniciou-se com a limpeza da região tracionada das vigas onde aplicou-se o reforço. Para a aplicação da resina foram necessários alguns cuidados para deixar a superfície limpa e livre de impurezas garantindo uma melhor aderência. A limpeza foi feita com auxílio de escova e lixa. As vigas foram reforçadas em toda sua região tracionada, o reforço foi aplicado em todo seu comprimento e largura como mostra a figura 3.

Figura 3: Esquema de reforço das vigas:



Fonte: Autor, 2017.

A mistura de cada resina com seu catalisador foi feita conforme recomendações descritas pelos fabricantes. A tabela 2 mostra as proporções de mistura de cada resina e seus respectivos catalisadores, e o tempo de trabalho de cada resina após a mistura.

Tabela 2: Proporções de mistura das resinas e tempo de trabalho após a mistura.

resina	Proporção de resina (g)	proporção de catalisador (g)	Tempo de trabalho (min)
A	100	50	40
B	100	48	31
C	100	1	20

Fonte: Autor, 2017.

Após realizada a mistura da resina com o catalisador, a mesma foi aplicada sobre as vigas com o auxílio de rolo plástico e espátula, garantindo uma camada de uniforme de resina sobre toda a viga, sendo realizada a aplicação dentro do prazo do tempo de trabalho de cada resina. Em seguida após a aplicação das resinas, as fibras de carbono foram posicionadas longitudinalmente na superfície das vigas e impregnadas com mais uma camada de resina formando o sistema Polímeros reforçados com fibra de Carbono (PRFC).

2.7 ENSAIO DE FLEXÃO NAS VIGAS REFORÇADAS APÓS RUPTURA

Após a execução do reforço com fibras de carbono nas vigas foi realizado um novo ensaio de flexão nas vigas reforçadas, seguindo os mesmos métodos utilizados nos

primeiros ensaios de flexão realizados nas vigas de referência. A figura 4 mostra o ensaio de flexão realizado nas vigas reforçadas.

Figura 4: Ensaio de flexão à 04 pontos nas vigas reforçadas



Fonte: Autor 2017

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL, COMPRESSÃO DIAMETRAL E MÓDULO DE ELASTICIDADE

A média da Resistência a Compressão do concreto ficou na ordem de 33,87 MPa, sendo esse um resultado bastante satisfatório, onde o concreto atingiu a resistência esperada em todos os exemplares. Na tabela 3 estão dispostos os resultados obtidos nos ensaios de Resistência a Compressão Axial, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Elasticidade.

Tabela 3: Resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova de concreto

Corpos de prova	Resistência à compressão - 28 dias (Mpa)	Resistência à tração por compressão diametral - 28 dias (Mpa)	Módulo de elasticidade à compressão - 28 dias (GPa)
CP1	35,5	13,2	41,83
CP2	35,6	14,8	38,39
CP3	30,7	14,3	39,16
CP4	33,8	14	37,97
Média	33,87	14,08	39,34
Desvio Padrão	2,288	0,694	1,733

Fonte: Autor 2017

Todos os ensaios apresentaram um baixo desvio padrão, indicando a homogeneidade das amostras.

3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO À 4 PONTOS

Foram adotadas nomenclaturas como forma de diferenciar os resultados obtidos na ruptura das vigas sem o reforço, denominadas vigas de referência (V) dos resultados obtidos na ruptura das vigas após serem reforçadas com fibra de carbono, denominadas vigas reforçadas (VR).

3.2.1 RESULTADOS DAS VIGAS DO GRUPO A

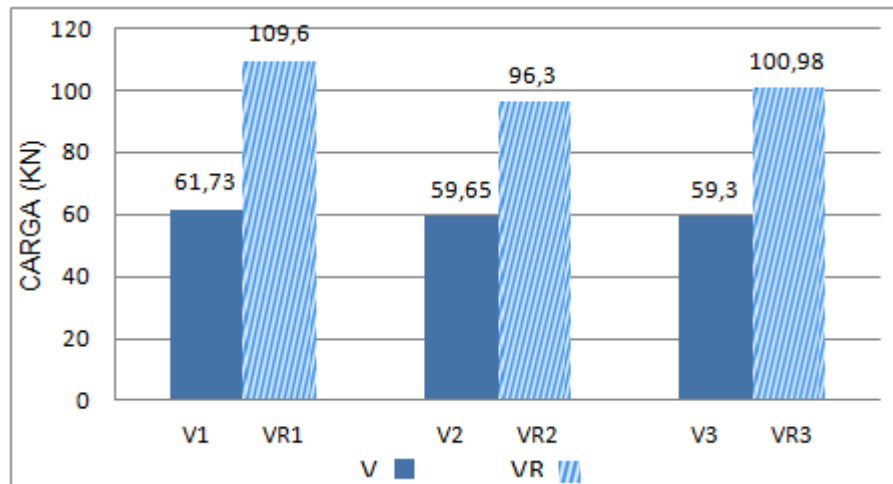
As vigas do grupo A foram reforçadas com fibras de carbono após sua ruptura utilizando a resina Epóxi à base de Bisfenol F, na tabela 4 pode-se observar os valores de carga e deslocamento obtidos na ruptura das vigas de referência e das vigas reforçadas após sua ruptura, assim como a carga obtida nas vigas reforçadas no deslocamento máximo permitido por norma (L/250). Na figura 5 pode-se observar um gráfico com a comparação dos acréscimos de carga na ruptura obtidos em cada viga após o reforço.

Tabela 4: Resultados obtidos com a resina epóxi à base de Bisfenol F

Vigas	Carga na ruptura (KN)	Deslocamento na ruptura (mm)	Carga no deslocamento (L/250) (KN)
V1	61,73	6,83	-
V2	59,65	6,66	-
V3	59,30	6,83	-
Média	60,22	6,77	-
Desvio Padrão	1,313	0,098	-
VR1	109,60	23,94	81,54
VR2	96,30	17,92	78,04
VR3	100,98	24,84	75,84
Média	102,29	22,23	78,47
Desvio Padrão	6,746	3,762	2,875

Fonte: Autor, 2017

Figura 5: Comparação dos aumentos de carga em cada viga após o reforço

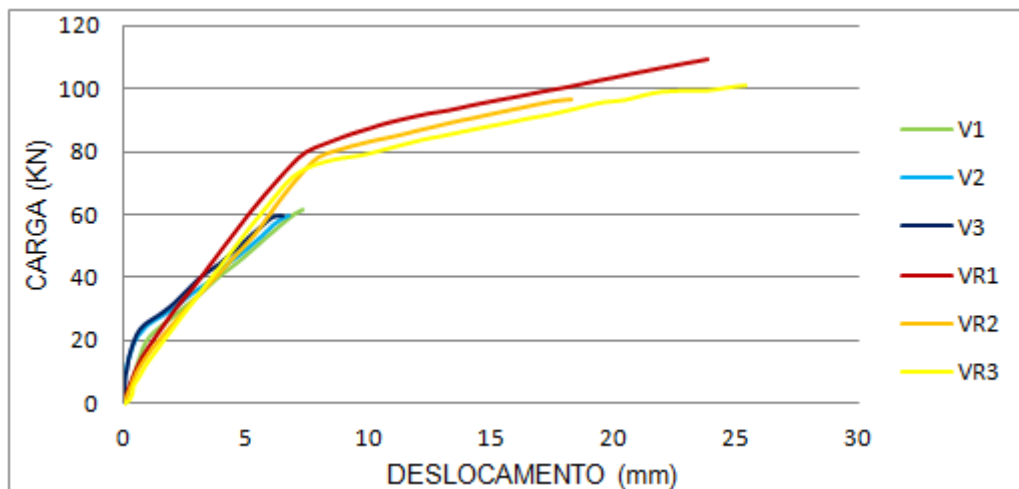


Fonte: Autor, 2017

As vigas de referência apresentaram na ruptura uma média de carga resistente de 60,22 KN. Já as vigas reforçadas atingiram na ruptura uma média de carga de 102,29 KN. As vigas reforçadas atingiram na ruptura um aumento de carga de 69,86%, sendo em valores 42,07 KN superiores, comparado as vigas de referencia na ruptura.

Na figura 6, pode-se observar o gráfico obtido com os resultados das vigas de referência e as vigas reforçadas, através das curvas relacionadas com o deslocamento e a carga aplicada. Nota-se que as vigas reforçadas apresentaram maior ductilidade em relação as vigas de referencia, onde as vigas reforçadas apresentaram na carga de ruptura um aumento no deslocamento de 228,36 %. Através do gráfico da figura 6 verificou-se também que as vigas de referencia apresentaram um comportamento bastante semelhante. Já nas vigas reforçadas, a viga VR2 e VR1 apresentaram um comportamento um pouco diferente, onde o deslocamento na ruptura da VR2 foi 19,39 % menor que à média, e a carga de ruptura da VR1 ficou 7,15 % acima da média.

Figura 6: Gráfico do deslocamento vertical versus carregamento.



Fonte: Autor, 2017

Verificou-se que as vigas do grupo A, reforçadas após sua ruptura com fibra de carbono utilizando a resina epóxi a base de bisfenol F, apresentaram uma excelente recuperação, onde o reforço apresentou um excelente desempenho na recuperação das vigas elevando em média suas resistências.

Para a verificação da variação dos valores obtidos e confiabilidade de resultados, realizou-se um Teste de Hipótese de Comparação de Médias com Variâncias Desiguais entre os valores de cargas obtidos na ruptura das vigas do grupo A. O grupo das vigas de referência (sem reforço) apresentou um Coeficiente de Variação de 2,18 %, o que demonstra que não houve diferença significativa entre as vigas de referência. O grupo das vigas reforçadas após a ruptura apresentou um Coeficiente de Variação de 6,60 %, o que também mostra que não houve diferença significativa entre as vigas reforçadas após a ruptura. Comparando o grupo das vigas de referência e as vigas reforçadas após a ruptura, com um 95 % de confiança obteve-se um valor de P de 0,0088, sendo esse valor menor que 0,05, indicando haver diferença estatística significativa entre as vigas de referência e as vigas reforçadas após a ruptura.

3.2.2 RESULTADOS DAS VIGAS DO GRUPO B

As vigas do grupo B foram reforçadas com fibras de carbono após sua ruptura utilizando a resina Epóxi à base de Bisfenol A, na tabela 5 pode-se observar os valores de carga e deslocamento obtidos na ruptura das vigas de referência e das vigas reforçadas após sua ruptura, assim como a carga obtida nas vigas reforçadas

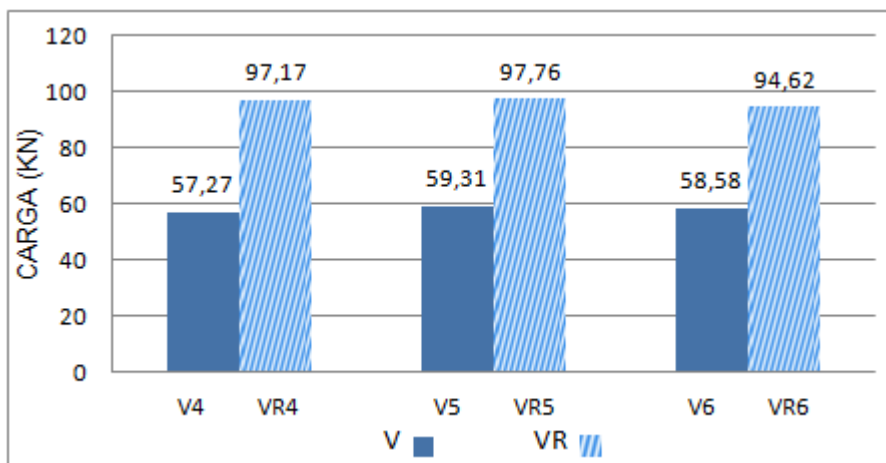
no deslocamento máximo permitido por norma ($L/250$). Na figura 7 pode-se observar um gráfico com a comparação dos acréscimos de carga na ruptura obtidos em cada viga após o reforço.

Tabela 5: Resultados obtidos com a resina epóxi à base de Bisfenol A

Vigas	Carga na ruptura (KN)	Deslocamento na ruptura (mm)	Carga no deslocamento ($L/250$) (KN)
V4	57,27	6,54	-
V5	59,31	6,86	-
V6	58,58	7,01	-
Média	58,38	6,80	-
Desvio Padrão	1,034	0,240	-
VR4	97,17	20,72	79,74
VR5	97,76	18,66	79,23
VR6	94,62	17,94	77,12
Média	96,52	19,10	78,70
Desvio Padrão	1,669	1,443	1,389

Fonte: Autor, 2017

Figura 7: Comparação dos aumentos de carga em cada viga após o reforço

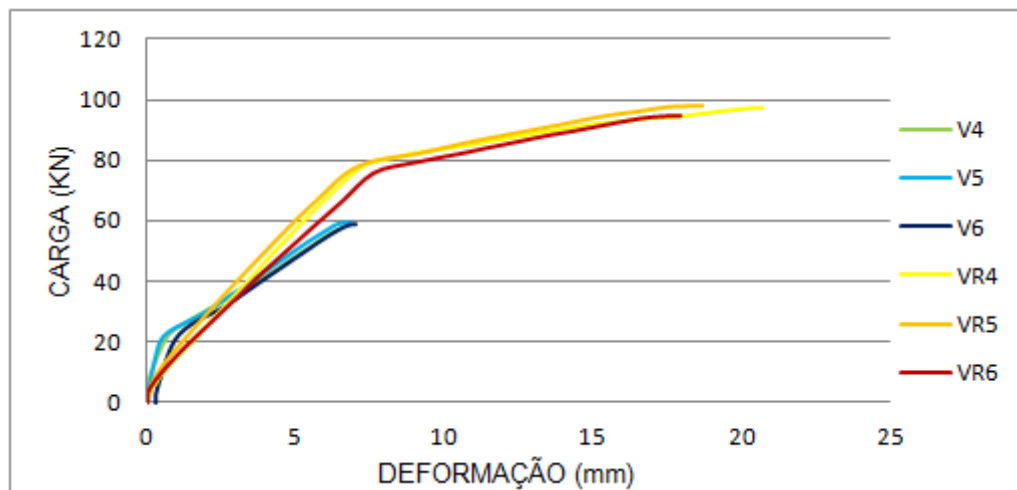


Fonte: Autor, 2017

As vigas de referência apresentaram na ruptura uma média de carga resistente de 58,38 KN. Já as vigas reforçadas atingiram na ruptura uma média de carga de 96,52 KN. As vigas reforçadas atingiram na ruptura um aumento de carga de 65,33 %, sendo em valores 38,14 KN superiores, comparado as vigas de referência na ruptura.

Na figura 8, pode-se observar o gráfico obtido com os resultados das vigas de referência e as vigas reforçadas, através das curvas relacionadas com o deslocamento e a carga aplicada, nota-se também, assim como as vigas do grupo A, que as vigas reforçadas apresentaram maior ductilidade em relação as vigas de referencia, onde as vigas reforçadas apresentaram na carga de ruptura um aumento no deslocamento de 180,88 %. Através do gráfico da figura 13 verificou-se também que as vigas de referência apresentaram um comportamento bastante semelhante, assim como as vigas reforçadas.

Figura 8: Gráfico do deslocamento vertical versus carregamento.



Fonte: Autor, 2017

Verificou-se que as vigas do grupo B, reforçadas após sua ruptura com fibra de carbono utilizando a resina epóxi a base de bisfenol A, assim como as vigas do grupo A, apresentou uma excelente recuperação, onde o reforço apresentou um excelente desempenho na recuperação das vigas elevando em média suas resistências.

Para a verificação da variação dos valores obtidos e confiabilidade de resultados, realizou-se um Teste de Hipótese de Comparação de Médias com Variâncias Desiguais entre os valores de cargas obtidos na ruptura das vigas do grupo B. O grupo das vigas de referência apresentou um Coeficiente de Variação de 1,77 %, o

que demonstra que não houve diferença significativa entre as vigas de referência. O grupo das vigas reforçadas após a ruptura apresentou um Coeficiente de Variação de 1,73 %, o que também mostra que não houve diferença significativa entre as vigas reforçadas após a ruptura. Comparando o grupo das vigas de referência e as vigas reforçadas após a ruptura, com um 95 % de confiança obteve-se um valor de P de 0,000057, sendo esse valor menor que 0,05, indicando haver diferença estatística significativa entre as vigas de referência e as vigas reforçadas após a ruptura.

3.2.3 RESULTADOS DAS VIGAS DO GRUPO C

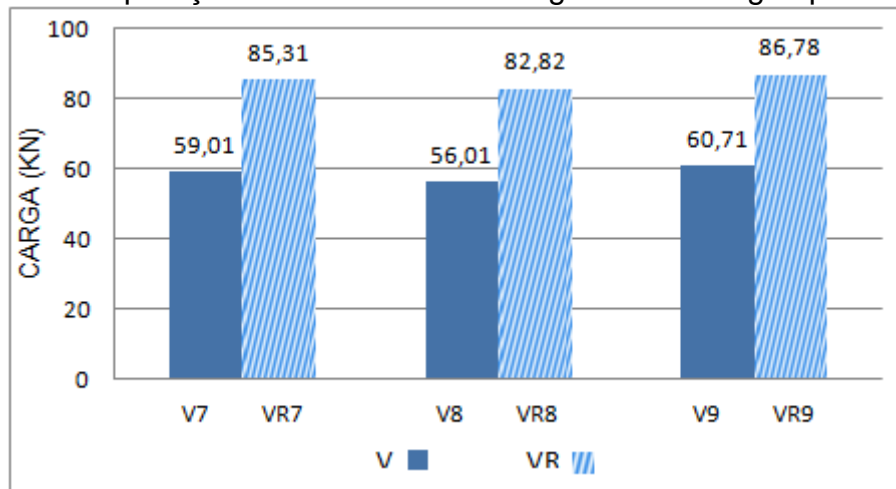
As vigas do grupo C foram reforçadas com fibras de carbono após sua ruptura utilizando a resina Poliéster insaturada Ortofálica, na tabela 6 pode-se observar os valores de carga e deslocamento obtidos na ruptura das vigas de referência e das vigas reforçadas após sua ruptura, assim como a carga obtida nas vigas reforçadas no deslocamento máximo permitido por norma (L/250). Na figura 9 pode-se observar um gráfico com a comparação dos acréscimos de carga na ruptura obtidos em cada viga após o reforço.

Tabela 6: Resultados obtidos com a resina Poliéster insaturada Ortofálica

Vigas	Carga na ruptura (KN)	Deslocamento na ruptura (mm)	Carga no deslocamento (L/250) (KN)
V7	59,01	6,99	-
V8	56,01	6,77	-
V9	60,71	6,86	-
Média	58,58	6,87	-
Desvio Padrão	2,380	0,111	-
VR7	85,31	14,52	75,76
VR8	82,82	13,25	74,13
VR9	86,78	12,65	78,57
Média	84,97	13,47	76,15
Desvio Padrão	2,002	0,955	2,246

Fonte: Autor, 2017

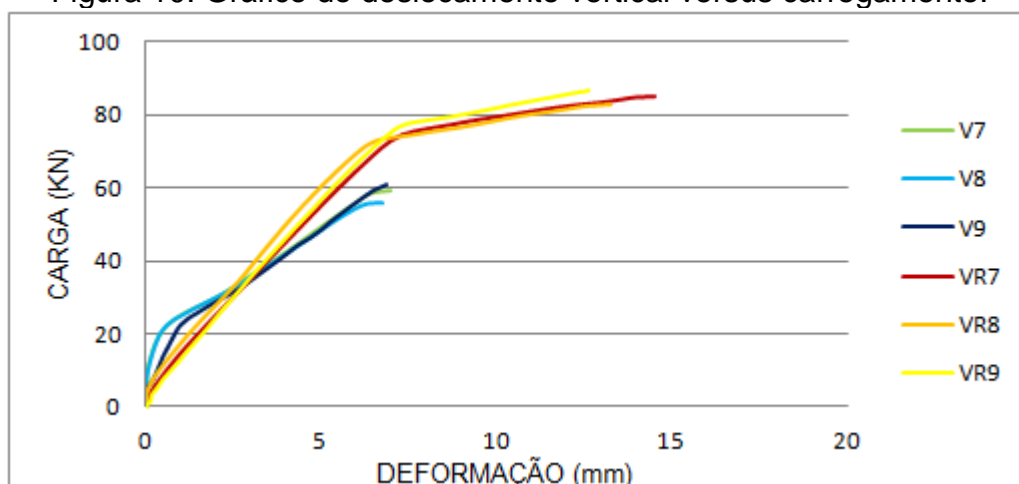
Figura 9: Comparação dos aumentos de carga em cada viga após o reforço



Fonte: Autor, 2017

As vigas de referência apresentaram na ruptura uma média de carga resistente de 58,58 KN. Já as vigas reforçadas atingiram na ruptura uma média de carga de 84,97 KN. As vigas reforçadas atingiram na ruptura um aumento de carga de 45,05 %, sendo em valores 26,39 KN a mais, comparado as vigas de referência na ruptura. Na figura 10, pode-se observar o gráfico obtido com os resultados das vigas de referência e as vigas reforçadas, através das curvas relacionadas com o deslocamento e a carga aplicada, nota-se também, assim como as vigas do grupo A e grupo B, que as vigas reforçadas apresentaram maior ductilidade em relação as vigas de referencia, onde as vigas reforçadas apresentaram na carga de ruptura um aumento no deslocamento de 96,07 %. Através do gráfico da figura 16, assim como as vigas do grupo B, verificou-se que as vigas de referência apresentaram um comportamento bastante semelhante, assim como as vigas reforçadas.

Figura 10: Gráfico do deslocamento vertical versus carregamento.



Fonte: Autor, 2017

Verificou-se que as vigas do grupo C, reforçadas após sua ruptura com fibra de carbono utilizando a resina Poliéster insaturada Ortofálica, assim como as vigas do grupo A e B, apresentou uma excelente recuperação, onde o reforço apresentou um excelente desempenho na recuperação das vigas elevando em média suas resistências.

Para a verificação da variação dos valores obtidos e confiabilidade de resultados, realizou-se um Teste de Hipótese de Comparação de Médias com Variâncias Desiguais entre os valores de cargas obtidos na ruptura das vigas do grupo C. O grupo das vigas de referência apresentou um Coeficiente de Variação de 4,06 %, o que demonstra que não houve diferença significativa entre as vigas de referência. O grupo das vigas reforçadas após a ruptura apresentou um Coeficiente de Variação de 2,36 %, o que também mostra que não houve diferença significativa entre as vigas reforçadas após a ruptura. Comparando o grupo das vigas de referência e as vigas reforçadas após a ruptura, com um 95 % de confiança obteve-se um valor de P de 0,00068, sendo esse valor menor que 0,05, indicando haver diferença estatística significativa entre as vigas de referência e as vigas reforçadas após a ruptura.

3.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM CADA RESINA

Como forma de diferenciar os valores médios obtidos em cada grupo, foram adotadas nomenclaturas. No grupo A, V_A é o valor médio das vigas de referência (sem reforço) e V_{RA} o valor médio das vigas reforçadas. No grupo B, V_B é o valor médio das vigas de referência (sem reforço) e V_{RB} o valor médio das vigas reforçadas. No grupo C, V_C é o valor médio das vigas de referência (sem reforço) e V_{RC} o valores médios das vigas reforçadas.

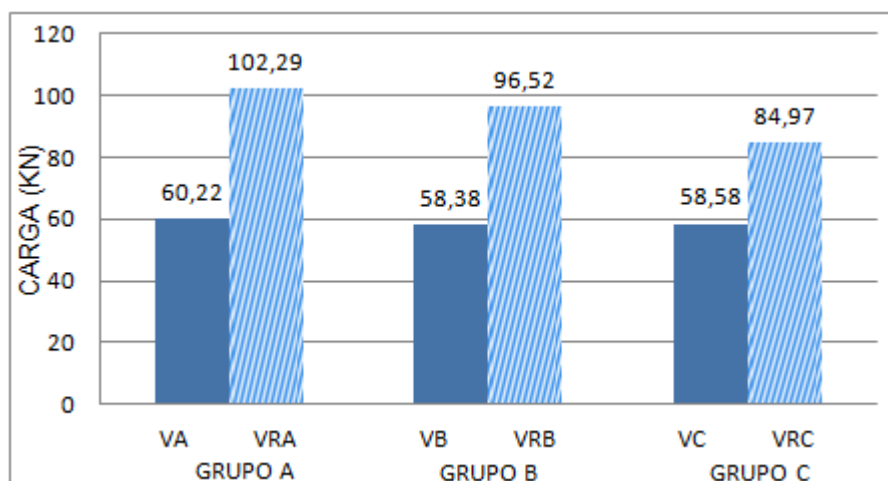
Tabela 7 estão dispostos os valores obtidos em cada grupo, pode-se observar os valores médios de carga e deslocamento obtidos na ruptura das vigas de referência e das vigas reforçadas após sua ruptura, assim como o aumento percentual de carga na ruptura de cada grupo após o reforço, e também o valor médio de carga das vigas reforçadas ao atingir o deslocamento máximo permitido por norma (L/250). Na figura 11 pode-se observar um gráfico com a comparação dos acréscimos de carga na ruptura obtidos em cada grupo após o reforço.

Tabela 7: Tabela dos valores médios obtidos em cada grupo

Grupos	Carga na Ruptura (KN)	Deslocamento na ruptura (mm)	Aumento de carga na ruptura após reforço (%)	Carga no deslocamento (L/250) (KN)
VA	60,22	6,77	69,86	-
VRA	102,29	22,23		78,47
VB	58,38	6,80	65,33	-
VRB	96,52	19,10		78,7
VC	58,58	6,87	45,05	-
VRC	84,97	13,47		76,15

Fonte: Autor, 2017

Figura 11: Acréscimos de carga na ruptura obtidos em cada grupo após o reforço



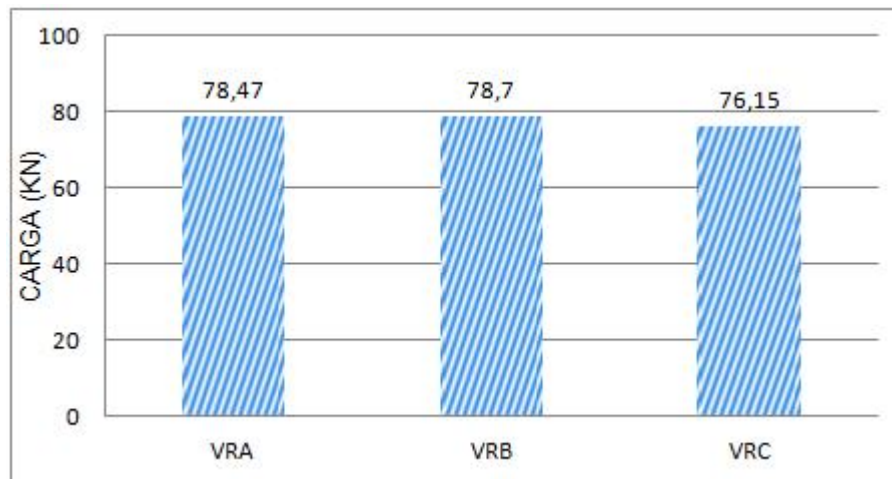
Fonte: Autor, 2017

As vigas do grupo A, reforçadas com fibra de carbono utilizando à resina epóxi a base de bisfenol F apresentaram o maior aumento de carga na ruptura, onde as vigas reforçadas aumentaram sua resistência em 69,86 % em comparação às vigas de referência. As vigas do grupo B reforçadas com fibra de carbono utilizando à resina epóxi a base de bisfenol A apresentaram o segundo maior aumento de carga na ruptura, onde as vigas reforçadas aumentaram sua resistência em 65,33 % em comparação às vigas de referência, mostrando um aumento de carga semelhante às vigas do grupo A, com uma diferença de aumento de carga na ruptura de apenas 4,53 %.

As vigas do grupo C reforçadas com fibra de carbono utilizando a resina Poliéster insaturada Ortofálica apresentaram o menor aumento de carga na ruptura, onde as vigas reforçadas aumentaram sua resistência em 45,05 % em comparação as vigas de referência, sendo um aumento de carga 24,81 % inferior as vigas reforçadas do grupo A e 20,28 % inferior as vigas reforçadas do grupo B.

No deslocamento máximo permitido por norma ($L/250$) das vigas reforçadas, todos os grupos apresentaram valores de carga muito próximos, com uma diferença nos valores de carga inferiores a 4 %. Na figura 12 pode-se observar o gráfico com os valores de carga obtidos no deslocamento máximo ($L/250$) das vigas reforçadas.

Figura 12: Carga obtida no deslocamento máximo ($L/250$) das vigas reforçadas.



Fonte: Autor, 2017

No deslocamento atingido na ruptura das vigas reforçadas, o grupo C reforçado com fibra de carbono utilizando com a resina Poliéster insaturada Ortofálica apresentou o menor deslocamento entre os grupos, com um deslocamento de 39,41 % inferior as vigas do grupo A e 29,48 % inferior as vigas do grupo B.

As Resinas Poliéster Insaturadas apresentam algumas desvantagens, tais como retração da peça após polimerização, fragilidade e baixa resistência a propagação de trinca. (REIS apud WORZAKOWSKA, 2009). Essas características da resina poliéster podem justificar o fato das vigas do grupo C reforçadas com fibra de carbono utilizando a resina poliéster, sofrerem um menor deslocamento na ruptura

em relação às vigas do grupo A e B reforçadas com resinas epóxi, assim como um menor aumento de carga na ruptura das vigas reforçadas.

Como vantagem, a resina poliéster possui um custo bem baixo em relação as resinas epóxi, sendo o custo da resina poliéster 74,36 % inferior a resina epóxi a base de bisfenol F e 67,43 % inferior a resina epóxi a base de bisfenol A. Na tabela 8 estão dispostos os preços de cada resina junto com seus catalisadores.

Tabela 8: Tabela de preços de cada resina junto com seus catalisadores

Tabelas de preços das resinas		
Resina epóxi à base de Bisfeno F + endurecedor (R\$/Kg)	Resina epóxi à base de Bisfeno A + endurecedor (R\$/Kg)	Resina poliéster + catalizador MEK (R\$/Kg)
39,00	30,70	10,00

Fonte: Autor, 2017

Para a verificação da variação dos valores obtidos, realizou-se um teste ANOVA entre os valores de aumento de carga obtidos na ruptura das vigas reforçadas de cada grupo. Com 95 % de confiança obteve-se um valor de P de 0,00346, sendo esse valor menor que 0,05, demonstrando que há diferença estatística significativa no aumento de carga na ruptura das vigas reforçadas com fibra de carbono utilizando diferentes tipos de resinas. As vigas grupo C reforçadas com fibra de carbono utilizando a resina poliéster insaturada ortofálica apresentaram uma diferença estatística significativa no aumento de carga na ruptura em relação as vigas do grupo A e do grupo B, entre as vigas do grupo A e B não houve diferença estatística significativa no aumento de carga na ruptura após o reforço.

4. CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos nesse estudo, pode-se chegar as seguintes conclusões:

- O reforço utilizando PRFC teve um excelente desempenho na recuperação estrutural das vigas em todos os grupos estudados com os diferentes tipos de resinas, onde as vigas apresentaram em média um aumento de carga na ruptura de 60 % após o reforço.

- As vigas do grupo A reforçadas com fibra de carbono utilizando a resina epóxi a base de bisfenol F, apresentaram o maior aumento de carga na ruptura após o reforço, com um aumento de sua resistência em 69,86 %.
- As vigas do grupo B reforçadas com fibra de carbono utilizando a resina epóxi a base de bisfenol A, apresentaram um aumento de carga na ruptura após o reforço de 65,33 %, com valores de aumento de carga bem próximos do grupo A.
- As vigas do grupo C reforçadas com fibra de carbono utilizando a resina Poliéster insaturada Ortofálica apresentaram um aumento de carga na ruptura após o reforço de 45,05 %, esse aumento de carga na ruptura foi aproximadamente 20 % inferior as resinas epóxi.
- Em relação ao deslocamento, a resina poliéster apresentou na ruptura das vigas reforçadas uma redução no deslocamento de 39,41 % em relação as vigas do grupo A e 29,48 % em relação as vigas do grupo B, mostrando ser uma resina frágil.
- Apesar de apresentar um desempenho inferior em relação as resinas epóxi, a resina poliéster apresentou um bom desempenho na recuperação das vigas com fibra de carbono apresentando um custo aproximadamente 70 % inferior as resinas epóxi.
- No deslocamento máximo permitido por norma, todos os grupos apresentaram valores de carga bem próximos nas vigas reforças, com uma diferença nos valores de carga inferiores a 4 %.
- As resinas apresentaram-se de fácil homogeneização e aplicação, com um desempenho eficaz na colagem das fibra de carbono. A fibra de carbono utilizada apresentou um excelente desempenho no reforço das vigas e mostrou-se de fácil manuseio para o corte das dimensões necessárias.

Para futuros trabalhos sugere-se:

- Analisar o desempenho de diferentes tipos de resinas no reforço de fibras de carbono em vigas de concreto armado rompidas por flexão submetidas a altas temperaturas.
- Analisar o desempenho de diferentes tipos de resinas no reforço de fibras de carbono em vigas de concreto armado rompidas por cisalhamento.

5. REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **440 – Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement**. Anaheim, CA, 2016.

ARQUEZ, Ana Paula. **Aplicação de laminado polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço á flexão de vigas de concreto armado**. Dissertação de mestrado em Engenharia. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro, 2014.

BRONZE, Ricardo Alves. **Estudo Comparativo: Uso do Sistema de Fibras de Carbono e Sistema Convencional para Reforço de Estruturas de Concreto**. Dissertação de Graduação. Rio de Janeiro, 2016.

MACHADO, Ari De Paula. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. Viapol, 2010.

REIS, Ligia Reghin. **Obtenção e caracterização de compósitos de resina poliéster insaturada moldados pelo processo de infusão**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

RELVAS, Fernando José. **Manual de Reforço de Vigas de Concreto Armado à Flexão com Fibra de Carbono**. Curso prático de diagnóstico, reparo, proteção e reforço, Exata Engenharia e Consultoria S/C Ltda. Edição Abece, 2003.

SANTOS, Paulo Mascarenhas. **Comparação de Reforço com Chapas de Aço e Fibras de Carbono em Vigas de Concreto Armado submetidas à Flexão Simples**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS. Feira de Santana, 2008.

SILAEX. **Silaex química Ltda**. 2006 – Disponível em: <<http://www.silaex.com.br>>. Acesso em: 06 nov. 2017.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Editora Pini Ltda, 1998. 255 p.

TESTONI, Guilherme Apolinário. **Avaliação de Propriedades Mecânicas e elétricas e do Desgaste Abrasivo de Compósitos Laminados de Fibras de Vidro e de Carbono, Resina Epoxídica com diferentes Cargas Condutoras**. Trabalho de Graduação apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 2011.

WORZAKOWSKA, M. **Thermal and dynamic mechanical properties of IPNS formed from unsaturated polyester resin and epoxy polyester.** J Mater Sci, 2009.

ZUCCHI, Fernando Luiz. **Técnicas para o Reforço de Elementos Estruturais.** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Santa Maria, 2015.