Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CORROSÃO DAS ARMADURAS EM ELEMENTO DE CONCRETO ARMADO REFORÇADO COM MANTAS CFRP EM SEU COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

ANALYSIS OF THE STEEL REINFORCEMENT CORROSION EFFECT ON THE PERFORMANCE OFREINFORCEDCONCRETE ELEMENT STRENGTHENED WITH CFRP SHEETS

Marcelo Fernandes Pereira[1]
Gláucia Maria Dalfré[2]
Luis César Siqueira De Luca[1]
José Roberto de Oliveira[2]
Ricardo LuizCanato[2]

Resumo:Uma das principais manifestações patológicas em estruturas de concreto armado é a corrosão das armaduras. Neste sentido, este estudo analisou a influência da corrosão causada por ingresso de íons cloreto em vigas reforçadas com CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*). Para isso, três modelos reduzidos de vigas de concreto armado foram executados e reforçados à flexão e/ou ao cisalhamento com mantas CFRP segundo a técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), sendo uma das vigas submetida a protocolo acelerado de corrosão com aplicação de densidade de corrente. Os resultados experimentais indicaram incremento de capacidade resistente em 18% e aumento da rigidez entre as vigas mantidas em laboratório devido à aplicação de reforço à flexão e ao cisalhamento. A viga submetida ao protocolo de corrosão teve sua capacidade resistente diminuída em 48,9% quando comparada com a viga mantida em ambiente laboratorial, além de perda de massa da armadura longitudinal de 32,2% e alteração em seu modo de ruptura.

Palavras-chaves:manifestação patológica, corrosão de armaduras, reforço estrutural, degradação, CFRP.

Abstract: *One of the main pathological manifestations in reinforced concrete structures is the corrosion of the reinforcements. In this sense, this study analyzed the influence of corrosion caused by chloride ions ingress in Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) strengthened beams. For this, three reduced models of reinforced concrete beams were executed and flexurally and shear strengthened with CFRP sheets according to the Externally Bonded Reinforcement (EBR) technique. Then, one of the beams was subjected to accelerated corrosion protocol with application of current density. The experimental results indicated an increase in the load carrying capacity of about 18% and an increase in stiffness of the strengthened beams maintained in the laboratory. The beam submitted to the corrosion protocol presented a decrease of the load carrying capacity of 48.9% when compared to the beams maintained in a laboratorial environment, with a mass loss of the longitudinal reinforcement of 32.2% and change in its failure mode.*

Keywords: *pathological manifestation, reinforcement corrosion, strengthening, degradation, CFRP.*

1 Introdução

A corrosão das armaduras é um dos principais mecanismos de degradação de estruturas de concreto armado, uma vez que seu processo de degradação é baseado na expansão de óxidos, levando à instalação de um padrão fissuratório que pode resultar na

[1]*Faculdade IDD, mfpereiraengenharia@gmail.com*
[2] *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), glaucia.dalfre@ufscar.br*

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

redução da resistência à tração do aço, levar a perda de seção transversal da armadura, a redução da aderência entre concreto e aço, ao destacamento do concreto, e na pior situação, pode comprometer o comportamento do elemento estrutural (ZHU *et al.,* 2016; ABBAS *et al.*, 2016).

O processo de corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado é de natureza eletroquímica e ocorre principalmente pelo fenômeno da carbonatação e pela contaminação de cloretos, sendo este último mais comum (SALES*et. al.*, 2018). O ataque de íons cloreto em estruturas de concreto ocorre de maneira agressiva, despassivando as armaduras mesmo em meio altamente alcalino, com pH elevado. Este tipo de ataque se caracteriza por causar corrosões localizadas provocando cavidades (pites), que influenciam de forma rápida nas propriedades mecânicas das armaduras. Ainda, os íons cloreto participam do processo eletroquímico de corrosão, acelerando o processo (DIETRICH, TELES e VIEIRA, 2017).

Nas últimas décadas diversos estudos experimentaisse concentraram na análise do desempenho mecânico de estruturas de concreto armados degradadas pelo processo de corrosão das armaduras devido contaminações por íons cloretos(GRAEFF, 2007; WANG *et al.,* 2015; LIU *et al.,* 2016; ZANG *et al.,* 2018; JUNG, YEON LEE e LEE, 2019; STEIN e GRAEFF, 2019; HUANG *et al.*, 2020; SAID e HUSSEIN, 2020). Outros estudos buscaram ainda analisar o efeito deste tipo de corrosão no comportamento estruturalde elementos de concreto armado submetidos a diferentes técnicas de reparos e reforço (XIE e HU, 2012; AL-SAIDY *et al.*,2015; LINGGA, 2016; PENG, HUAN e ZHANG, 2017; TANG, PENG e ZHANG, 2020).

Em tais estudos, diferentes metodologias, tais como as baseadas em variação entre as densidades de correntes, diferentes concentrações de cloreto de sódio (NaCl), diferentes períodos de duração do ensaio, com variação dos ciclos de exposição e diferentes técnicas de recuperação e reforço, por exemplo, foram aplicados para a indução da corrosão acelerada em elementos de concreto armado.

2 Estado da arte sobre ensaios de corrosão acelerados

Os efeitos da corrosão das armaduras no comportamento mecânico de elementos de concreto armado vêm sendo avaliados em inúmeras pesquisas nas últimas décadas por meio de estudos experimentais baseados no uso de técnicas de ensaios acelerados.

Graeff (2007) avaliou a influência da corrosão no desempenho estrutural de vigas de concreto armado à flexão. Para isso, quatro vigas com dimensões 70x140x1300 mm^3 moldadas com uso de concreto com 25MPa e com armadura longitudinal tracionada composta por 2 barras com diâmetro de 8 mm e estribos com diâmetro de 4,2 mm, espaçados a cada 4 cm, foram submetidas ao processo de corrosão acelerado com aplicação de densidade de corrente de 500 $\mu A/cm^2$ e inserção das vigas em tanque fechado com solução de água com 3,5% de NaCl até que as armaduras tracionadas atingissem os graus de corrosão de 2, 10 e 20%, respectivamente. Uma das vigas foi utilizada como referência e, após o período de aceleração do processo corrosivo das três vigas, estas foram ensaiadas por meio de ensaio de flexão de quatro pontos. A Figura 1 apresenta o aspecto final das vigas após uso do protocolo acelerado de corrosão. Os resultados obtidos indicam que pequenos níveis de corrosão não afetam significativamente o comportamento do elemento.Entretanto, o desempenho do elemento ficou comprometido para graus de corrosão superiores a 10%. Neste sentido, reduções da capacidade resistente de 11 e 51%, com aumento dos deslocamentos verticais, foram obtidos para os graus de corrosão de 10 e 20%, respectivamente. Diante do exposto, Graeff (2007) sugere o uso do limite de 10% de perda de massa como o limite de corrosão admissível, sem demanda imediata de reforço ou reconstituição de armadura, uma vez que

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

graus superiores de corrosão levam a redução pronunciada da capacidade de carga devido à redução da aderência, área da seção transversal e da resistência à tração da armadura existente.

(a) (b) (c)

Figura 1. Aspecto final dos elementosexpostos aos graus de corrosão de 2 (a), 10(b) e 20%(c)
Fonte: Graeff (2007)

Wang *et al.* (2015) analisaram o comportamento de 22 vigasde concreto armadas à flexão com dimensões 200x300x2400 mm³, as quais foram divididas em dois grupos com diferentes tipos de armaduras (nervuradas e lisas). Também foram variados os diâmetros das armaduras (entre 20 e 22 mm) e os cobrimentos (25, 30 e 35 mm). As vigas possuíam estribos de 8 mm espaçados a cada 100 mm e foram moldadas com concreto de 34,55 e 39,84MPa. Para acelerar o processo de corrosão das armaduras uma densidade de corrente de 1,8 mA/cm² e inserção total das vigas em solução de água com 5% de concentração de NaCl foi aplicada, tal como o apresentado na Figura 2. O ensaio de corrosão se mostrou efetivo com perdas de massa da armadura longitudinal de até 13%. Observou-se redução da capacidade resistente de até 38%e 46% para as vigas com armaduras lisas ou nervuradas, respectivamente.Além disso, vigas armadascom barras de diâmetros menores apresentaram desempenhos mecânicos inferiores, sendo observado um aumento das aberturas de fissuras de 60 e 80% para as armaduras nervuradas e lisas, respectivamente. Em relação ao cobrimento, estes não apresentaram grande influência na redução da rigidez e fissuração dos elementos.

Figura 2. Protocolo acelerado de corrosãocom aplicação de densidade de corrente
Fonte: Wang *et al*. (2015)

Buscando simular de forma mais próxima as condições de campo, Liu *et al.* (2016) analisaram vigas de concreto armado submetidas ao ensaio acelerado de corrosão e diferentes níveis de sobrecargas. O ensaio de corrosão acelerada com aplicação de diferença de potencial de 25V e corrente de 2,5A e inserçãodas vigas em solução água com 5% NaCl até a altura das armaduras longitudinais, executado com aplicaçãosimultânea de vários níveis decarregamento até que 80% da capacidade última da viga fosse atingida.Os autores verificaram um aumento da velocidade da corrosão com o aumento da carga aplicada e redução da capacidade

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

resistente da viga mais degradada em 26%,com ruptura do tipo frágil. A análise de vigas submetidas a carregamentos durante o ensaio de corrosão também foi objeto de estudo de Zhang *et al.* (2018) que, diferentemente de Liu *et al.* (2018), consideraram no ensaio de corrosão solução com 3% de NaCl e aplicação de diferentes densidades de corrente (25, 50 e 100 μA/cm²),com aplicação de níveis de carga até que 50%da capacidade última da viga fosse atingida. Com foco nos deslocamentos e alteração do padrão fissuratório das vigas, verificaram alta influência da corrosão, juntamente com o aumento da densidade de corrente e carga aplicada.

Stein e Graeff (2019) analisaram o efeito combinado da corrosão e fadiga em vigas de concreto armado. Aplicaram, primeiramente, o ensaio acelerado de corrosão nas mesmas condições de Graeff (2007) e, após diferentes ciclos de carregamento, verificaram que os elementos submetidos à corrosão e à fadiga apresentam menor desempenho, com redução da capacidade resistente em aproximadamente em 50% quando comparada com a viga não degradada, além de apresentar modo de ruptura frágil.

Jung, Lee e Lee (2019) avaliaram o comportamento de vigas de concreto, armadas à flexão e ao cisalhamento, submetidas a ensaio de corrosão acelerado com aplicação de densidade de corrente e imersão das vigas em solução de água com 5% de NaCl. Os resultados indicam que a capacidade última das vigas armadas à flexão foi mais impactada pela corrosão do que a vigas armadas ao cisalhamento, observando-se perda de capacidade resistente de até 11,7%, seguida de redução do deslocamento na carga última de até 30% para as condições ensaiadas.

A influência do processo corrosivo no comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado foi estudada por Huang *et al.* (2020). Os autoresanalisaram o comportamento de 12 vigas de dimensões 100x150x800 mm³, com armadura longitudinal inferior de 12 mm e superior de 10 mm, estribos de 6 mm espaçados a cada 150 mm e moldadas com concreto de 56 MPa. Para isso, utilizaram o protocolo acelerado de corrosão com variação de densidade de corrente de até 1,28A e imersão total das vigas em solução de água com 5% NaCl, de modo a obter diferentes níveis de degradação. Na Figura 3 são apresentados os diagramas Força *versus* Deslocamentos para os graus de corrosão de 0, 5, 10 e 15%, percentuais referentes às perdas de massa média das armaduras observadas no experimento.Verificou-se perda de massa das armadurasdeaté 19%, bem como que a perda de massa das armaduraslongitudinais tracionadasfoi superioràs comprimidas,em face da concentração de NaCl na parte inferior do tanque. Observou-se, também, forte influência do grau de corrosão no comportamento ao cisalhamento das vigas, com redução da capacidade das vigas superior a 50% no ensaio de flexão, além da alteração no modo de ruptura nos casos mais severos.

Said e Hussein (2020) analisaram o comportamento de lajes de concreto armadas à punção e submetidas a ensaio de corrosão acelerado com o uso de densidade de corrente de 100 μA/cm² e expondo-se parte da laje à solução com 5% de NaCl. Os autores verificaram influência significativa da corrosão na rigidez, deslocamentos e fissuras das lajes, obtendo-se perda de massa de armadura e redução de capacidade resistente de até 50 e 71%, respectivamente.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

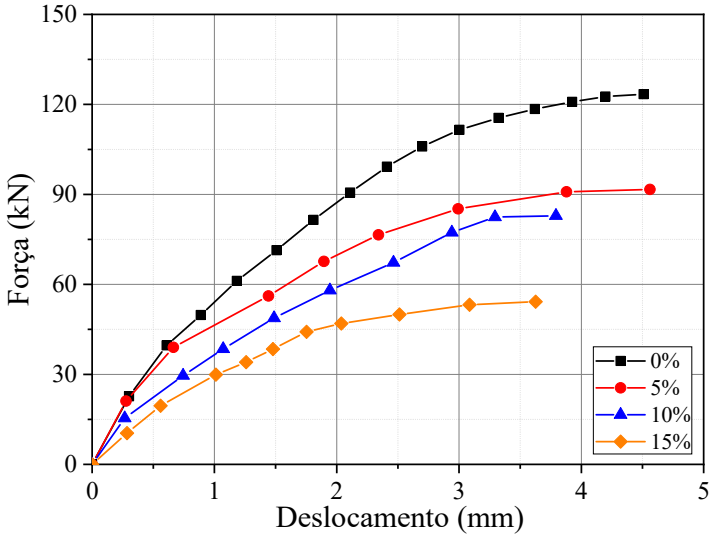


Figura 3. Diagrama Força *versus* Deslocamento para diferentes níveis de corrosão
Fonte:Adaptado deHuang *et al.* (2020)

No âmbito dos elementos reforçados, Xie e Hu (2012) ensaiaram vigas de concreto armado com aplicação de ensaio de corrosão acelerada com aplicação de densidade de corrente e imersão dos elementos em solução com 3% de NaCl. Posteriormente, mantas de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*) foram aplicadas como reforço à flexão e ao cisalhamento com o uso de três diferentes métodos: o primeiro com a simples limpeza do substrato de concreto, o segundo com a remoção do concreto deteriorado e recomposição com argamassa, e o terceiro realizando-se entalhes no concreto antes da recomposição com argamassa de modo a proporcionar melhor aderência entre o reparo e o concreto existente. O terceiro método se mostrou como o mais eficiente, proporcionando maior capacidade resistente no caso de perdas de massa da armadura superiores a 15%, enquanto o segundo método atendeu de forma satisfatóriapara perdas inferiores a 15%. Ray *et al.* (2011) também avaliaram a influência do tipo de reparo do substrato de vigas de concreto antes da aplicação de sistemas de reforço. Assim, um programa experimental composto por injeção de fissuras ou substituição do concreto de cobrimento foi realizado. De acordo com os autores, a técnica por substituição do cobrimento se mostrou mais eficaz, resultando em maior ductilidade e promovendo maior visibilidade da ruptura anunciada do elemento.

Também no âmbito dos elementos reforçados, Al-Saidy*et al.* (2015) analisaram a perda de capacidade resistente de vigas de concreto armadas, com processo corrosivo ativo, e reforçadas com mantas de CFRP. Neste sentido, vigas com e sem estribos foram analisadas por meio de ensaio acelerado de corrosão com densidade de corrente de 281 μA/cm² em solução com 3% de NaCl e posteriormente reforçadas ao cisalhamento e/ou à flexão. Os autores verificaram que as vigas sem estribos ecom armadura longitudinal corroída apresentaram ruptura frágil e redução do deslocamento na carga última de 60% quando comparada com a viga de referência, sendo que o reforço ao cisalhamento aplicado em forma de "U" forneceu maior capacidade resistente e rigidez. Ainda, as vigas reforçadas ao cisalhamento e à flexão apresentaram incremento de força de até 50% quando comparadas com as vigas sem reforço. Em relação às vigas com estribos, foi possível observar que os elementos com corrosão e reforçados apresentam capacidade resistente superior aos de referência (sem corrosão e reforço).

Peng, Huan e Zhang (2017) analisaram uma série de vigas submetidas ao ensaio acelerado de corrosão e reforçadas com chapas metálicas, variando-se a espessura da chapa de aço e do cobrimento do concreto. Para acelerar o processo de corrosão das armaduras,

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

aplicou-se densidade de correntede 1,786A e solução de água com 5% NaCl. Após o ensaio de corrosão fez-se a aplicação do sistema de reforço e realizaram-se os ensaios de flexão de três pontos. Os resultados indicaram que a capacidade resistente das vigas diminui com o aumento da perda de seção transversal das armaduras, bem como que o deslocamento a meio do vão das vigas aumenta com o nível de corrosão. As vigas não reforçadas e com perda de massa de armadura de 8% apresentaram redução da capacidade resistente em 5,6% e aumento do deslocamento vertical em 10,1% quando comparadas com as vigas não corroídas. Já para as vigas reforçadas observou-se perda de capacidade resistente de 11,6%, quando comparando mesma taxa de reforço e cobrimentos similares. Entretanto, mesmo corroídas, as vigas reforçadas apresentaram capacidade resistente superior à das vigas sem reforço e corrosão, indicando a efetividade do sistema de reforço. Ainda, os modos de ruptura das vigas apresentaram alterações em face da aplicação do reforço e do nível do processo de corrosão, sendo observadasfalhasna região de apoios em algumas das vigas devido aconcentração de perdas de seção transversal de armaduras.

Tang, Peng e Zhang (2020) avaliaram experimentalmente o comportamento de vigas de concreto armado com corrosão de armaduras e reforçadas externamente com chapas metálicas. As vigas de dimensões 150x300x1800 mm³ foram submetidas ao ensaio de corrosão acelerada com aplicação de densidade de corrente e inserção das vigas em solução de água com 5% NaCl, de modo a atingirem perdas de massa de armadura da ordem de 10%. Posteriormente, as vigas foram reforçadas com chapas metálicas, aplicando-se esquemas de reforçoà flexão e ao cisalhamento com chapas de espessuras de 5 e 3 mm, respectivamente, bem como esquema de reforço com a combinação de ambos. Posteriormente,algumas das vigas voltaram para o ensaio de corrosão de modo a atingir adicionalmente 5% de perda de massa de armadura. Os resultados indicaram incrementos nas capacidades resistentes das vigas devido à aplicação dos sistemas de reforço, sendo o esquema que combina o reforço à flexão e ao cisalhamento o mais efetivo. Para o nível de corrosão de 10%, as vigas reforçadas apresentaram capacidade resistente superior à das vigas de referência, mesmo com o processo de corrosão instalado. Já para as vigas submetidas a maior período de exposição ao ensaio de corrosão foram observadas perdas significativas da capacidade resistência e ductilidade. O modo de ruptura das vigas variou de acordo com o esquema de reforço aplicado, sendo observadas rupturas de apoios para os diferentes níveis de corrosão avaliados devido a concentrações de perdas de seção de armaduras, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4. Ruptura de apoios das vigas com corrosão nas armaduras
Fonte: Tang, Peng e Zhang (2020)

Embora bastante utilizado em estudos experimentais, a efetividade do ensaio de corrosão acelerada com aplicação de densidade de corrente pode ser influenciada por diferentes fatores. El Maaddawy e Soudki (2003) analisaram a influência da densidade de corrente aplicada e o período de realização do ensaio. O estudo considerou elementos prismáticos, variação da densidade entre 100 e 500 μA/cm² e uso de NaCl já misturado ao

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

concreto, com posterior envolvimentodos elementos em mantas úmidas. Os autores verificaram um aumento de até 43% da abertura das fissuras para densidades maiores durante o ensaio, bem como que a aplicação de densidades menores necessita maior tempo de realização do ensaio para obtenção de resultados significativos. A variação da densidade não influenciou no padrão fissuratório e a perda de massa das armaduras aumentou com o aumento da densidade.

Torres (2006) também analisou a influência de diferentes fatores na realização do ensaio acelerado com aplicação de densidade de corrente. O autor realizou ensaios com diferentes tipos de conexão entre a armadura e a fonte alimentadora, diferenças de potencial de 15, 45 e 70V, diferentes períodos de aplicação do ensaio e dois níveis de altura da solução de água com NaCl. Os resultados obtidos indicaram que o tipo de conexão e altura da solução pouco influenciaram, sendo recomendável a aplicação de uma densidade de 45V. Já o período de execução do ensaio depende diretamente de características como relação água/cimento e cobrimento. A sensibilidade do ensaio acelerado de corrosão também é reportada por Ahmad (2009), relatando que a variação da densidade de corrente em um mesmo período de aplicação do ensaio pode causar outros efeitos e fornecer resultados distorcidos.

É possível observar que grande parcela dos estudos que consideram o processo de corrosão em elementos de concreto armado reforçados com FRPs (*Fiber Reinforced Polymer*s) analisa a contribuição do reforço com sua aplicação após a manifestação do processo corrosivo, ou seja, sendo o elemento reforçado diretamente sobre as áreas degradadas ou após a execução de eventuais reparos do substrato.

Neste sentido, este trabalho piloto tem por objetivo a avaliação do comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP e posteriormente submetidas ao protocolo acelerado de corrosão.

3 Materiais e Métodos

Este trabalho buscou avaliar a influência da corrosão da armadura no comportamento de elementos de concreto armado reforçados com mantas de CFRP. Para isso, após a aplicação do sistema de reforço CFRP os elementos foram mantidos em ambiente laboratorial (interno e protegido) ou expostos a um protocolo acelerado de corrosão para posterior ensaio à flexão de três pontos. Os principais aspectos analisados foram o incremento ou decréscimo da capacidade de carga dos elementos reforçados, incluindo sua ductilidade, o modo de ruptura e a perda de massa da armadura existente. Além disso, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados na campanha experimental por meio de ensaios de compressão axial de corpos de prova (CPs) de concreto e de ensaios de tração uniaxial em CPs de aço, das resinas e do compósito de CFRP.

3.1 Vigas de concreto armado

O programa experimental é composto por 3 vigas de concreto armado com dimensões de 7 x 15 x 50 cm³, as quais possuem armadura de flexão positiva composta por uma barra de aço CA-50 com diâmetro de 10 mm, porta estribo composto por uma barra de aço CA-60 com diâmetro de 4,2 mm e estribos simples, também de aço CA-60, com diâmetro de 4,2 mm e espaçados a cada 5,0 cm. O cobrimento de 2,0 cm foi adotado para os elementos analisados. Na Figura 5é detalhada a geometria e armadura utilizadas nas vigas. Tendo em vista se tratar de um modelo reduzido e de um estudo piloto, por questões executivas, optou-se por adotar apenas uma barra como armadura longitudinal.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

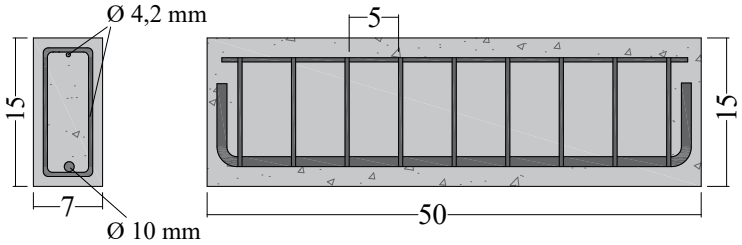


Figura 5. Geometria do elemento (dimensões em centímetros).
Fonte: Autoria própria

Das três vigas, uma foi reforçada somente à flexão e duas à flexão e ao cisalhamento. Após a cura da resina utilizada no sistema de reforço, as vigas foram inseridas em dois ambientes distintos: laboratorial (interno e protegido) ou no protocolo acelerado de corrosão. Posteriormente, as vigas foram submetidas a ensaio de flexão de três pontos. A Tabela 1 apresenta o resumo do programa experimental realizado. Adotou-se como nomenclatura das vigas com o padrão x - y - z, sendo x igual a REF para as vigas mantidas em ambiente laboratorial ou COR para as vigas expostas ao protocolo acelerado de corrosão, y indicando o reforço segundo a técnica EBR com mantas de CFRP e z igual a F indicando somente reforço à flexão ou F/CIS indicando reforço tanto à flexão quanto ao cisalhamento.

Tabela 1 - Programação dos ensaios

Ambiente de exposição	Descrição das vigas		
	Quantidade	Nomenclatura	Tipo de reforço
Laboratorial	1	REF – EBR CFRP – F	Somente à flexão
	1	REF – EBR CFRP – F/CIS	Flexão e cisalhamento
Corrosão acelerada	1	COR – EBR CFRP – F/CIS	Flexão e cisalhamento

Fonte: Autoria própria

Tendo em vista o uso de protocolos de degradação acelerado apresentados por Graeff (2007), Stein e Graeff (2019), Jung (2019) e Huang (2020), fez-se o posicionamento de barras de cobre, com dimensões de 3 x 9 x 500 mm^3, paralelamente à armadura longitudinal, tal como o apresentado na Figura 6, de modo que todos os elementos (mesmo os que não foram submetidos ao processo corrosivo) apresentassem mesma capacidade inicial resistente. Para além disso, a barra longitudinalque seria exposta ao protocolo teve sua massa e diâmetro aferido, enquanto os estribos tiveram somente seu diâmetro aferido.

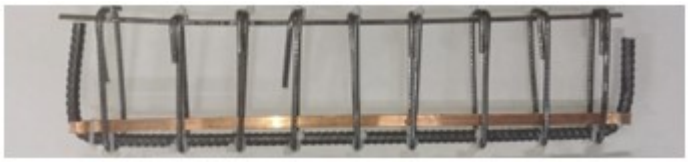
Nomenclatura	Detalhes das armaduras das vigas
REF – EBR CFRP – F REF – EBR CFRP – F/CIS	
COR – EBR CFRP – F/CIS	

Figura 6. Armaduras das vigas e barras de cobre para corrosão. Fonte: Autoria própria

A produção das vigas e de corpos de prova cilíndricos (Ø 10 x 20 cm)de concreto armado do presente estudo piloto foi realizada no LSE (Laboratório de Sistemas Estruturais) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) com controle tecnológico seguindo as

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

recomendações da norma brasileira NBR 12655 (ABNT, 2015) demodo a se obter um concreto com resistência média à compressão (f_{cm}) aos 28 dias de 25 MPa.A Figura 7 apresenta as atividades executadas durante a concretagem das vigas de concreto armado onde (a-c) refere-se a pesagem, (d-e) à mistura dos materiais em betoneira, (f) slumptest, (g) lançamento do concreto, (h) vigas concretadas, aspecto final dos (i) elementos e (j) corpos de prova cilíndricos.

O lançamento do concreto nas vigas e nos moldes de corpos de prova de concreto foi realizado com o uso de carriola. O adensamento mecânico foi realizado com o uso vibradores de imersão do tipo mangote com agulha de diâmetro de 3,5 cm e frequência de rotação de 4000 rpm. Os corpos de provas cilíndricos de concreto possuem 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro na seção transversal.

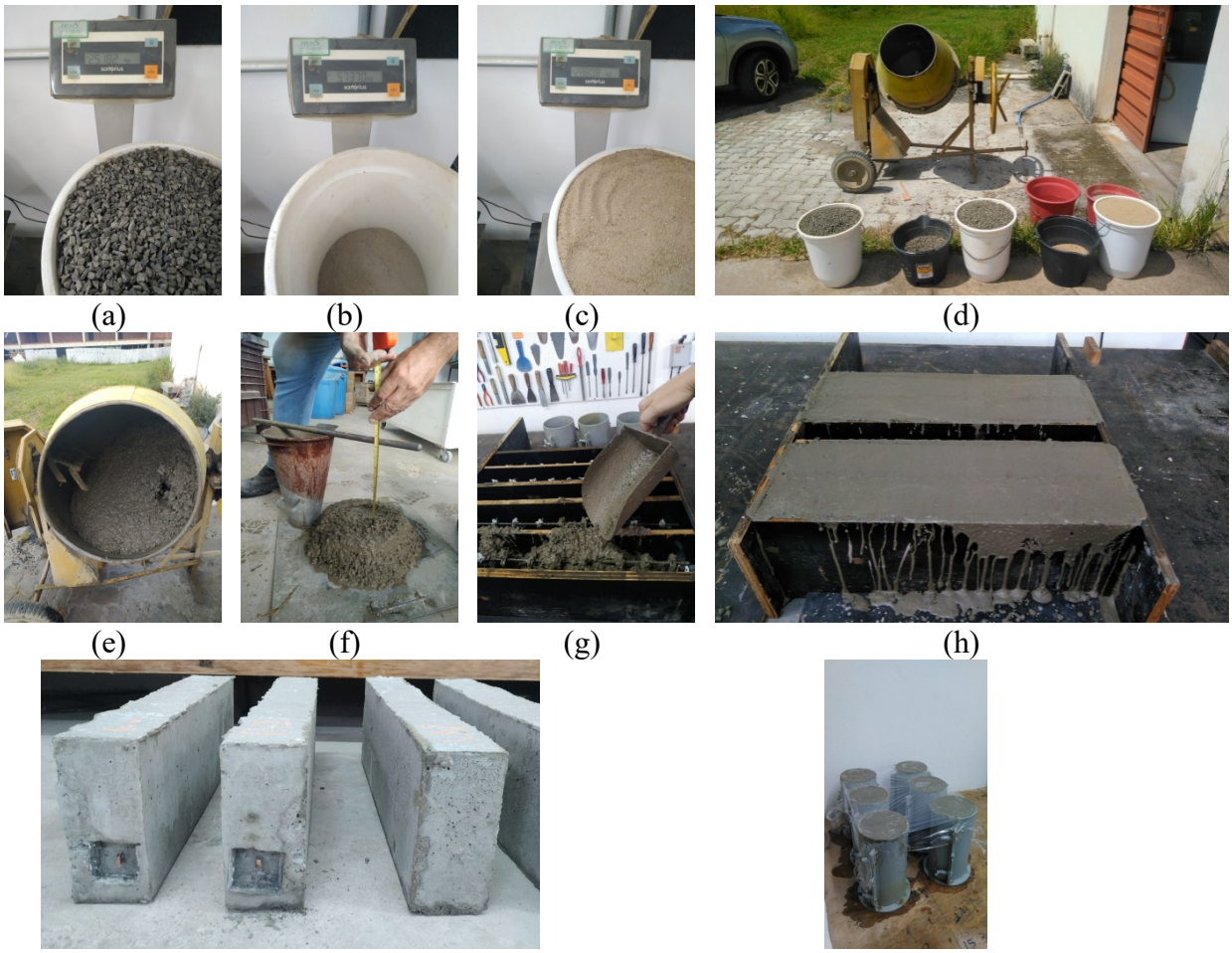


Figura 7. Etapas da concretagem. Fonte: Autoria própria

Após a concretagem, foi realizada a cura úmida das vigas e corpos de prova por um período de 5 dias, cobrindo-os com lona plástica a fim de se reduzir os efeitos da retração do concreto pela evaporação da água. Após este período, os elementos foram desmoldados.

3.2 Aplicação do sistema de reforço

O sistema de reforço utilizado no presente estudo utiliza mantas de fibras de carbono aplicadas diretamente no substrato de concreto segundo a técnica EBR(*Externally Bonded*

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

Reinforcement).

Dentre os diversos tipos de fibras disponíveis no mercado e dando continuidade aos trabalhos realizados por Ferreira (2019) e Sarti Júnior (2020), optou-se por utilizar o sistema de reforço composto por mantas do tipo *C-Sheet* 240 com espessura de 0,176 mm. Como matriz polimérica do sistema de reforço foi utilizada uma resina epoxídica de saturação. Neste sentido, uma e seis camadas foram aplicadas nas faces inferiores e laterais das vigas, respectivamente, atuando como reforço à flexão e ao cisalhamento.A Figura 8 apresenta a metodologia típica utilizada para o reforço segundo à técnica EBR, sendo: (a) lixamento para remoção de nata de cimento e limpeza com ar comprimido, (b) aplicação de álcool para redução da umidade do substrato, (c) corte da manta de CFRP, (d) pesagem dos componentes da resina, (e) mistura mecânica dos componentes, (f) impregnação da manta de CFRP com a resina, (g) aplicação da manta de CFRP, (h) uso de rolo para remoção de bolhas do tardoz do sistema de reforço e (i) aspecto final dos elementos reforçados. Maiores informações sobre a aplicação do sistema de reforço podem ser encontradas em Ferreira (2019) e Sarti Júnior (2020).

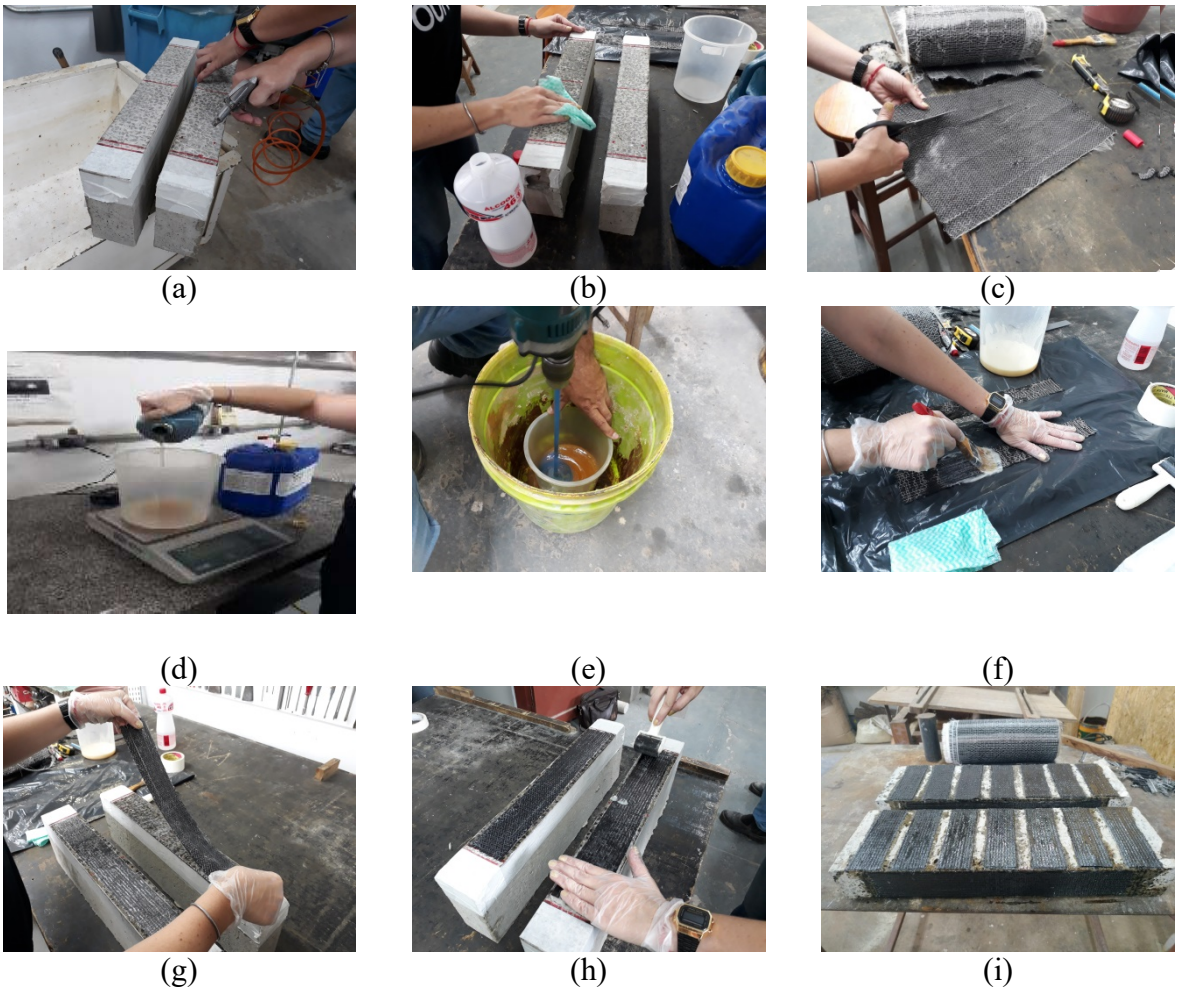


Figura 8. Metodologia típica utilizada para o reforço segundo à técnica EBR
Fonte: Autoria própria

Terminados os trabalhos de aplicação do sistema de reforço, as vigas reforçadas foram mantidas por quatorze dias em ambiente com temperatura e umidade controladas, de modo a realizar a cura da resina.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

3.3 Protocolo acelerado de corrosão

Passado o período de cura do sistema de reforço, uma viga reforçada à flexão e ao cisalhamento foi submetida ao protocolo acelerado de corrosão adaptado de Graeff (2007). Nesse sentido, a viga foi inserida em solução de água com 3,5% de NaCl até a altura da armadura longitudinal, concentração similar às utilizadas por Xie e Hu (2012), Al-Saidy *et al.* (2015), Zhang e*t al*. (2018) e Stein e Graeff (2019). A barra de cobre inserida na viga durante a concretagem foi conectada ao polo positivo da fonte de alimentação com densidade de corrente de 46 volts e corrente de 3 amperes, conforme o recomendado por Torres (2006). Uma grelha de inox, imersa na solução, foi conectada ao polo negativo da fonte de modo a estimular o processo eletroquímico do conjunto.A Figura 9 apresenta o protocolo acelerado de corrosão,sendo que (a) refere-se ao esquema apresentado de Graeff (2007), (b) apresenta a fonte utilizada, (c) remete à vista global do sistema e (d) apresenta os produtos da corrosão dissolvidos na solução.

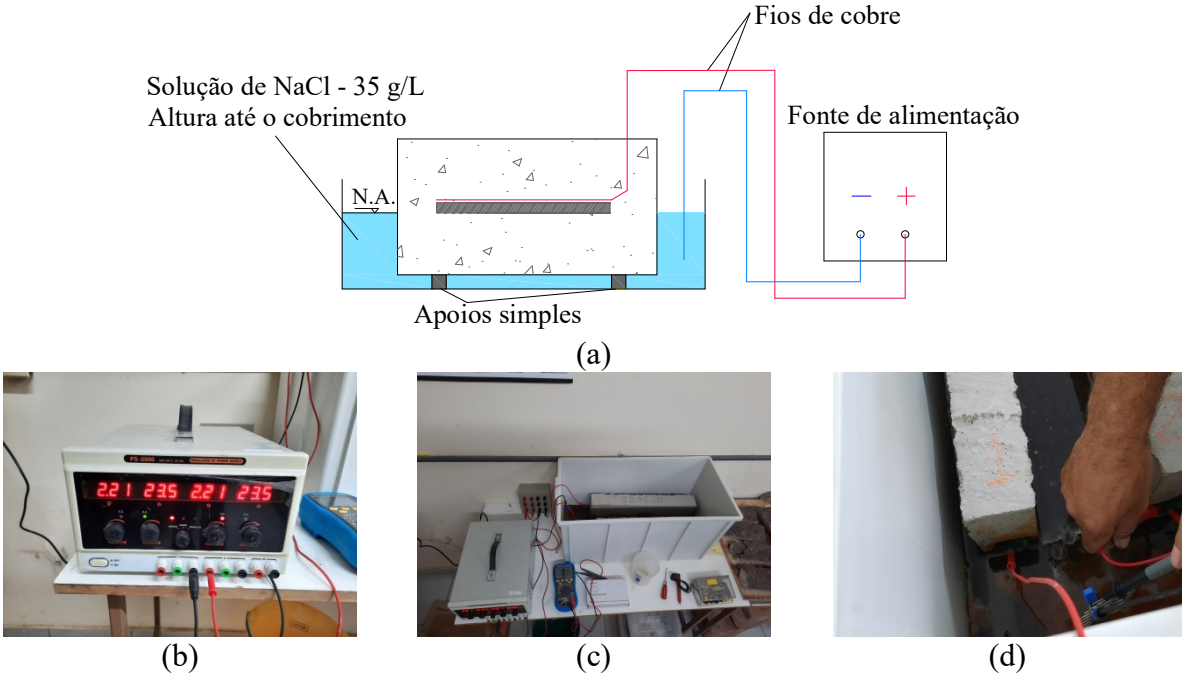


Figura 9. Etapas do protocolo acelerado de corrosão. Fonte: Autoria própria

A viga reforçada à flexão e ao cisalhamento foi submetida ao protocolo acelerado de corrosão por um período de 176 horas. Note-se que, por segurança, a fonte manteve-se ligada apenas em horário comercial, ficando as vigas em contato com a solução nas demais horas do dia.

3.4 Caracterização da resistência à compressão do concreto

A caracterização das propriedades mecânicas do concreto foi realizada por meio de ensaio à compressão axial de três corpos de provaseguindo as recomendações da norma NBR 5739 (ABNT, 2018). Para isso, as superfícies dos corpos de prova de concreto foram retificadas visando à regularização de sua superfície e garantia de uma melhor distribuição de tensões na realização dos ensaios e, posteriormente, realizou-se o ensaio com o uso da máquina de ensaios universal do Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) do DECiv/UFSCar.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

3.5 Caracterização das propriedades das resinas epoxídicas

Os ensaios de caracterização das resinas epoxídicas foram realizados por Sarti Júnior (2020) no Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar utilizando a máquina de ensaios universal da marca Instron, modelo 5569, com velocidade de aplicação de carga de 2 mm/min segundo as recomendações das normas ISO 527-1 (2012) e 527-5 (2012).As deformações foram medidas com o uso de um extensômetro eletrônico, da marca Instron, o qual possui comprimento de leitura de 50 mm, e que foi posicionado no centro dos corpos de prova e removido quando uma deformação de 1 ‰ foi atingida.Maiores informações sobre a caracterização dos adesivos e resultados experimentais podem ser encontradas nos trabalhos de Escobal (2017) e Ferreira (2019).

3.6 Caracterização das propriedades do compósito de CFRP

Neste programa experimental, um sistema curado *in situ* composto por manta de fibras de carbono unidirecionais, com gramatura de 300 g/m², foi impregnado com resina do tipo epóxi. Ensaios de tração uniaxial na direção principal das fibras foram realizados por Sarti Júnior (2020) segundo a ISO 527-1 (2012) e a ISO 527-5 (2009) para a determinação do módulo de elasticidade e tensão última, respectivamente.Os ensaios de caracterização dos compósitos de CFRP também foram realizados no Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar com o uso da máquina de ensaios universal da marca Instron modelo 5569, cujas características e configurações de ensaio foram anteriormente apresentadas.

3.7 Ensaio de flexão das vigas de concreto armado

Os ensaios das vigas foram conduzidos com o uso de uma máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 60000, disponível no LSE.

O carregamento foi aplicado a meio vão sob controle de deslocamento a uma taxa de 1,0 mm/min. A aplicação de carga foi duplamente aferida com uso de uma célula de carga externa com capacidade de 200 kN (com resolução de leitura de 0,01 kN), além da célula de carga da própria máquina de ensaio, a qual possui uma célula de carga com capacidade máxima de 600 kN e resolução de leitura de 0,1 kN.

O deslocamento vertical (flecha) a meio vão foi registrado por meio de um sistema de aquisição de dados modelo ADS-2000, fabricado pela LYNX e com o uso de um transdutor de deslocamento com campo de leitura de 50 mm. Este foi fixado a um suporte externo e posicionado a meio vão das vigas tal como o apresentado na Figura 10.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

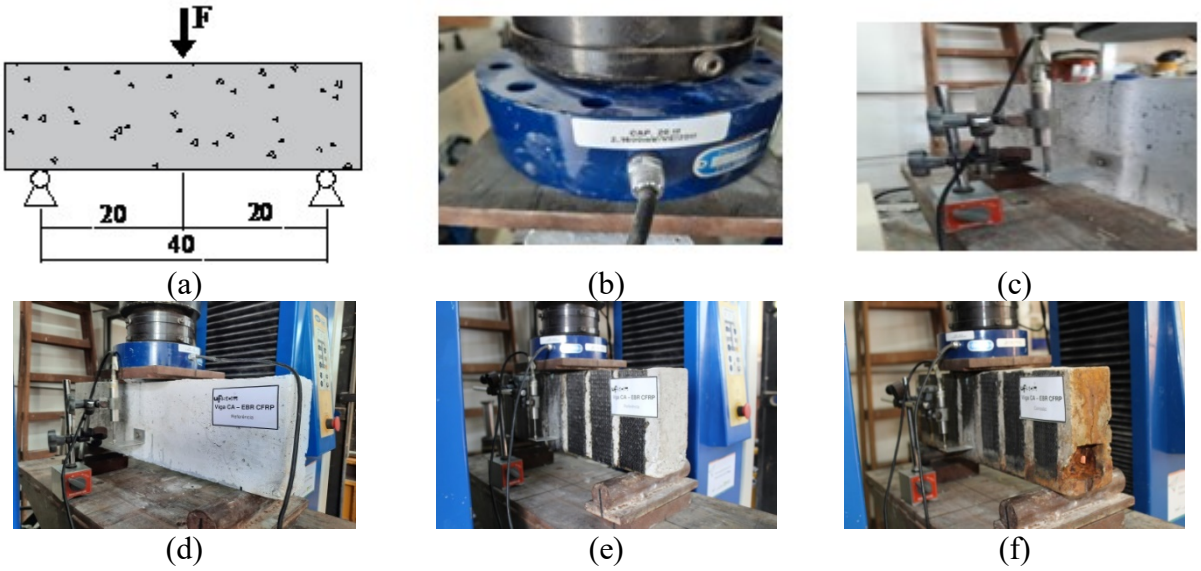


Figura 10. Esquema do ensaio a flexão: (a) esquema do ensaio a flexão (dimensões em centímetros), (b) célula de carga, (c) transdutor de deslocamento e (d-f) ensaio em andamento
Fonte: Autoria própria

4 Resultados e discussões

Nesta seção do trabalho, serão apresentados e analisados os resultados obtidos no programa experimental.

4.1 Concreto

A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas obtidas para os corpos de prova e concreto analisados. Tendo em vista que os CPs possuem uma relação altura/diâmetro igual a 2, a utilização de fator de correção para determinação da resistência à compressão característica é dispensada (NBR 5739, ABNT 2018).

Tabela 2 - Resistência à compressão do concreto

Corpo de Prova	Ambiente de cura	Resistência à compressão (MPa)	Média
CP 1	Úmida	25,20	25,37 (0,53)
CP 2	Úmida	24,95	
CP 3	Úmida	25,97	
(valor) – Desvio Padrão			

Fonte: Autoria própria

4.2 Resina epoxídica

Segundo Sarti Júnior (2020), as resinas epoxídicas utilizadas neste trabalho apresentaram, para a idade de 14 dias, resistência média máxima à tração de 46,1 MPa (1,3) e módulo de elasticidade de 2,6 GPa (0,1), onde os valores em parênteses referem-se ao desvio padrão das amostras.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

4.3 Compósito de CFRP

Os compósitos de CFRP utilizados neste trabalho apresentaram, para a idade de 14 dias, resistência média máxima à tração de 3253,4 MPa (101,3) e módulo de elasticidade de 247,8 GPa (19,5), onde os valores em parênteses fazem referência ao desvio padrão das amostras(SARTI JÚNIOR, 2020).

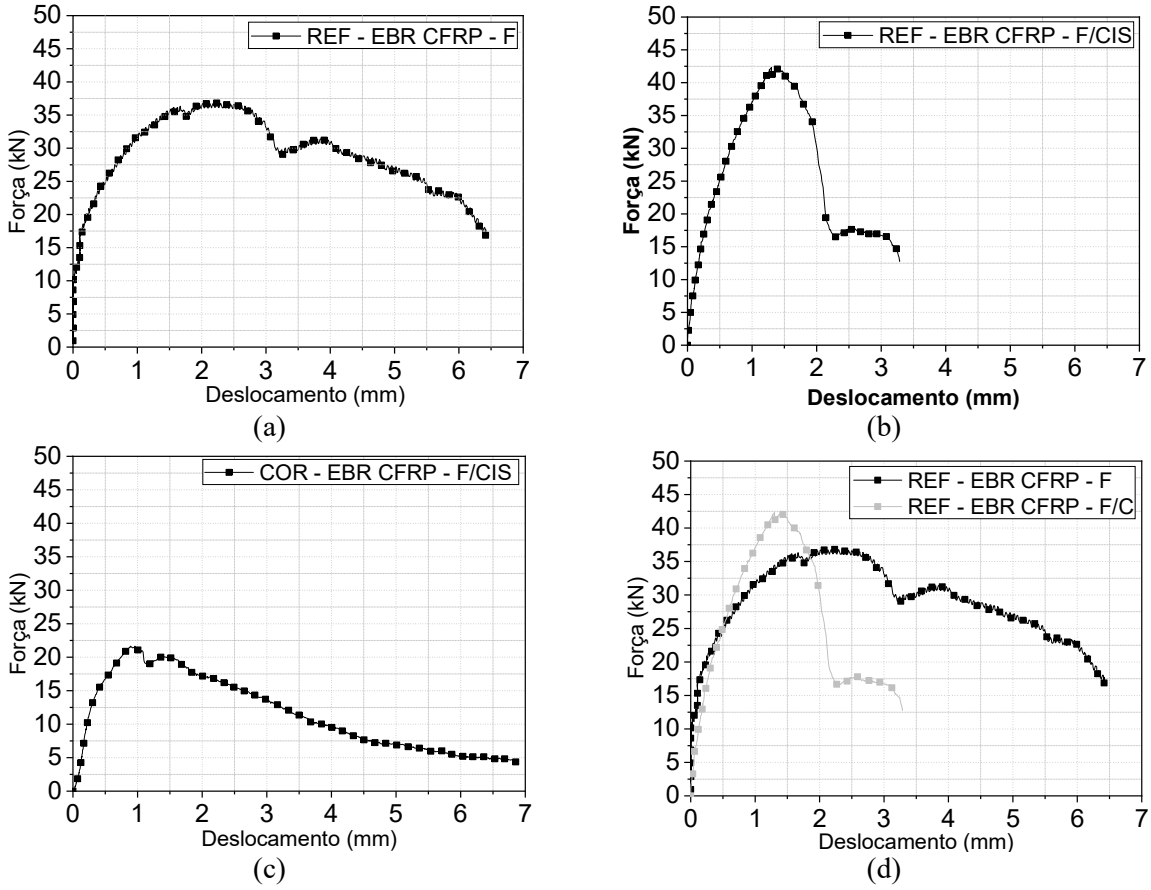
4.4 Ensaio de flexão das vigas

A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados obtidos para cada uma das vigas experimentalmente analisadas, onde $F_{máx}$é a força máxima registrada (em kN) e $\delta_{F,máx}$ é o deslocamento vertical a meio vão (em mm) para $F_{máx}$, enquanto a Figura 11 apresenta os diagramas Força *versus* deslocamento registrados para as vigas analisadas.

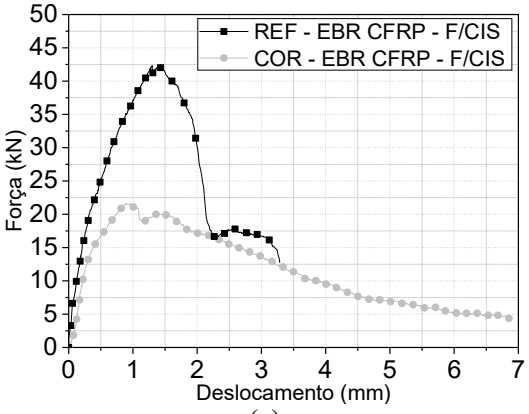
Tabela 3 - Resultados obtidos no ensaio de flexão das vigas

Identificação da viga	$F_{máx}$ (kN)	$\delta_{F,máx}$ (mm)	Modo de ruptura
REF – EBR CFRP – F	35,86	2,23	Cisalhamento/ruptura do apoio
REF – EBR CFRP – F/CIS	42,33	1,30	Cisalhamento/ruptura do apoio
COR – EBR CFRP – F/CIS	21,65	0,89	Cisalhamento/ruptura do apoio

Fonte: Autoria própria



Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591



(e)

Figura 11. Diagramas Força *versus* Deslocamento das vigas analisadas
Fonte: Autoria própria

Analisando-se os diagramas Força *versus* Deslocamento da Figura 11 e os resultados apresentados na Tabela 3 percebe-se que as vigas apresentaram comportamentos estruturais distintos em função do tipo de reforço aplicado (somente flexão e flexão e cisalhamento) e devido ao ambiente aos quais foram expostas.

4.4.1 Elementos reforçados e mantidos em ambiente laboratorial

Pela análise da Tabela 3 e Figuras 11 (a-b-d) percebe-se que os elementos mantidos em laboratório e reforçados somente à flexão (REF – EBR CFRP – F) ou a flexão e ao cisalhamento (REF – EBR CFRP – F/CIS) apresentaram força máxima de 35,86 kN e 42,33 kN, indicando um aumento de capacidade de carga de 18 % devido ao uso das mantas de CFRP aplicadas nas faces laterais do elemento. Para além disso, verifica-se redução do deslocamento vertical do elemento REF – EBR CFRP – F/CIS de 41,7 %, em relação ao elemento REF – EBR CFRP – F, devido a redução da fissuração que o sistema de reforço promove, restringindo a redução da inércia do elemento e influenciando sua rigidez. Tais valores corroboram o encontrado por Ferreira (2019), onde o uso de sistema de reforço EBR-CFRP levou ao aumento da capacidade de carga e redução da ductilidade dos elementos reforçados. Percebe-se, também, que ambos os elementos apresentaram ruptura por cisalhamento.

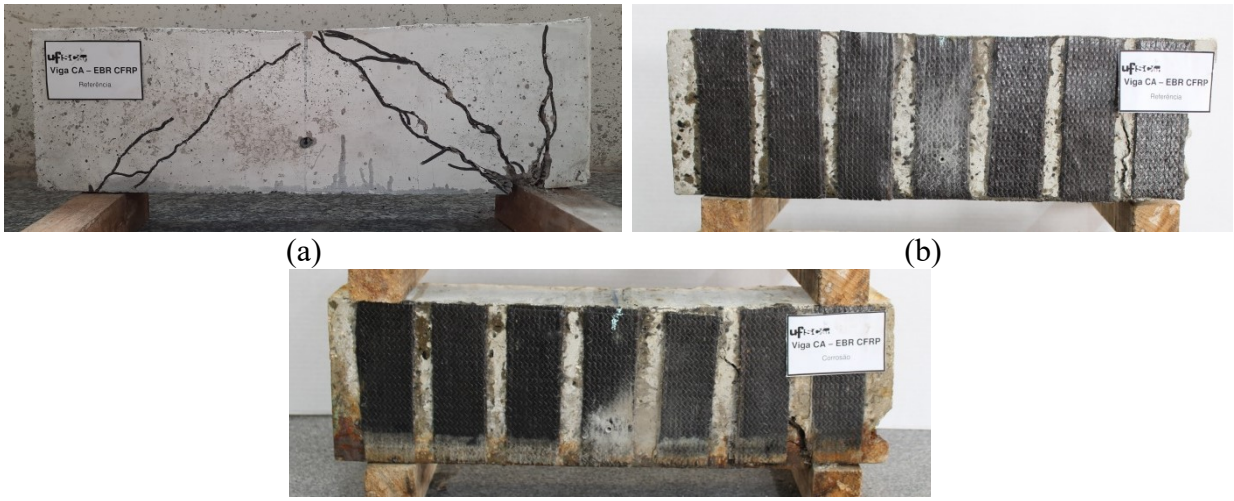
4.4.2 Elemento reforçado e expostoaoprotocolo acelerado de corrosão

Pela análise da Tabela 3 e Figuras 11 (c-e) percebe-se que o elemento exposto ao protocolo de corrosão e reforçado a flexão e ao cisalhamento (COR – EBR CFRP – F/CIS) apresenta força máxima de 21,65 kN, indicando uma redução de capacidade de carga de 48,9 %em comparação a viga REF – EBR CFRP – F/CIS devido a incidência da corrosão, mesmo com o uso de reforço ao cisalhamento. Entretanto, verifica-se uma a redução do deslocamento vertical em $F_{máx}$do elemento COR – EBR CFRP – F/CIS em 31,5 % em relação ao elemento REF – EBR CFRP – F/CIS devido a redução da fissuração que o sistema de reforço promoveu. Mesmo comportamento foi encontrado por Graeff (2007), a qual verificou redução da capacidade portante dos elementos quando submetidos ao protocolo de degradação acelerado.

A Figura 12 apresenta os modos de ruptura observados nas vigas após o ensaio de flexão. Analisando-se os modos de ruptura apresentados pelas vigas verifica-se que todas as

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

vigas apresentaram ruptura por cisalhamento e de um dosapoios, resultado também observado experimentalmente por Tang, Peng e Zhang (2020).



(a) (b)

(c)

Figura 12. Modos de ruptura das vigas após o ensaio de flexão: (a) REF – EBR CFRP – F, (b) REF – EBR CFRP – F/CIS e (c) COR – EBR CFRP – F/CIS.
Fonte: Autoria própria

4.4.3 Avaliação das armaduras

Após o ensaio de flexão foram verificadas as condições das armaduras da viga COR – EBR CFRP – F/CIS. A Figura 13 apresenta a armadura longitudinal e os estribos, enquanto a Tabela 4 apresenta os parâmetros das armaduras verificadas antes e após o protocolo acelerado de corrosão.

(a)

(b)

(c)

Figura 13. Armaduras: (a) após remoção do concreto e armaduras (b) longitudinal e (c) transversal após processo corrosivo. Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Verificação da corrosão das armaduras

Antes do protocolo			Após o protocolo				
Massa (g)	**Diâmetro (mm)**	**Área (mm^2)**	**Massa (g)**	**Diâmetro médio (mm)**	**Área (mm^2)**	**Menor diâmetro (mm)**	**Área equivalente ao menor diâmetro**

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

								(mm^2)
L	354,0	10,0 [(a)]	78,5 [(a)]	240,0	7,8	47,8	3,1	7,6
E	---	4,2 [(a)]	13,9 [(a)]	-----	N.A.	-----	0,0	0,0
Obs.: L – armadura longitudinal; E – estribo; (a) externo à nervura e N.A – não aferido.								

Fonte: Autoria própria

Pela análise da Tabela 4 e da Figura 13 percebe-se uma perda de massa 32,2 % da armadura longitudinalexposta ao processo corrosivo acelerado. Percebe-se, também, a redução do diâmetro médio das barras em 22 %, atingindo-se redução de até 69% do diâmetro da armadura longitudinal e de 100 % em algumas regiões dos estribos. Analisando-se os resultados, observa-se que o protocolo acelerado mostrou-se efetivo,apresentando perdas de área de seção das armaduras significativas, tanto na armadura longitudinal como na transversal, bem como perda de massa da armadura em função do tempo de exposição da viga ao referido protocolo.

Com relação ao padrão de corrosão, observou-se corrosão superficial generalizada em quase toda a armadura, bem como pontos localizados de corrosão (pites), os quais levaram a redução da aderência da barra ao concreto. Verificou-se, também, uma concentração de perda de área de seção transversal junto ao ponto de aplicação da tensão e corrente da fonte alimentadora.

Como anteriormente apresentado, a viga submetida ao protocolo acelerado apresentou modo de ruptura por cisalhamento seguido da ruptura do apoio, coincidindo com o trecho da armadura longitudinal em que se verificou maior perda de área de seção.Para além disso, percebe-se que no COR – EBR CFRP – F/CIS, devido à degradação total de trechos dos estribos, que os esforços cisalhantes foram transferidos, em sua quase totalidade, ao sistema de reforço CFRP-EBR.

5 Conclusões

Este trabalho buscou avaliar a influência da corrosão da armadura no comportamento de elementos de concreto armado reforçados com mantas de CFRP. Para isso, os elementos foram mantidos em ambiente laboratorial (interno e protegido) ou exposto a um protocolo acelerado de corrosão. Os principais aspectos analisados foram o incremento ou decréscimo da capacidade de carga dos elementos reforçados, incluindo sua ductilidade, o modo de ruptura e a perda de massa da armadura existente. Os resultados obtidos permitiram obter as seguintes considerações finais:

- Os elementos mantidos em laboratório e reforçados somente à flexão ou à flexão e ao cisalhamento apresentaram força máxima de 35,86 kN e 42,33 kN, indicando um aumento de capacidade de carga de 18 % devido ao uso das mantas de CFRP aplicadas nas faces laterais do elemento;
- Verifica-se que a redução do deslocamento vertical do elemento reforçado tanto à flexão quanto ao cisalhamento em relaçãoao reforçado somente à flexão deve-seà redução da fissuração que o sistema de reforço promove, restringindo a redução da inércia do elemento e influenciando sua rigidez;
- O elemento exposto ao protocolo de corrosão e reforçado à flexão e ao cisalhamento apresentou redução do deslocamento e força máxima de 21,65 kN, indicando uma redução de capacidade de carga de 48,9 %, em comparação à viga reforçada à flexão e ao cisalhamento e mantida em ambiente laboratorial, devido a incidência da corrosão, mesmo com o uso de reforço ao cisalhamento; e
- Os resultados obtidos confirmaram que a corrosão das armaduras em elemento de concreto armado influencia em seu comportamento estrutural, ressaltando a necessidade da

DOI: 10.4025/revtecnol.v30i1.56591

verificação das condições das armaduras de estruturas de concreto armado antes da aplicação de sistemas de reforço.

Referências

ABBAS, Y., NUTMAN, J. S., OLTHUIS, W., VAN DEN BERG, A. Corrosion Monitoring of Reinforcement Steel Using Galvanostatically Induced Potential Transients. **IEEE Sensors Journal**, Vol. 16, No. 3, 2016 – DOI: 10.1109/JSEN.2015.2485667

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R-2017 – Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures.** Detroit, 2017.

AHMAD, S. Techniques for inducing accelerated corrosion of steel in concrete. **The Arabian Journal for Science and Engineering**, Volume 34, Number 2C, 2009.

AL-SAIDY, A. H., SAADATMANESH, H., EL-GAMAL, S., AL-JABRI, K. S., WARIS, B. M.Structural behavior of corroded RC beams with/without stirrups repaired with CFRP sheets.**MaterialsandStructures**, 2015 - DOI 10.1617/s11527-015-0751-y

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 6118 – Projetos de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 12655 – Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

BALESTRA, C. E. T., LIMA, M. G., MEDEIROS-JUNIOR, R. A., MONTEIRO, A. J. A. E. Parâmetros ambientais e materiais que afetam a penetração de cloretos em estruturas de concreto –estudo de caso da Ilha dos Arvoredos. **Revista Eletrônica de Engenhacia Civil**, Volume 13, Nº 1, 270-282, 2017 – DOI: 10.5216/reec.V13i1.43054

DALFRÉ, G. M., ALVES, A., OLIVEIRA, A. C. F. Dimensionamento de sistema de reforço à flexão com materiais compósitos segundo a técnica EBR. **Revista Concreto& Construções**, 2019, São Paulo, Edição 94, Abr-Jun, 66-75.

DIETRICH, Y. P., TELES, C. R., VIEIRA, G. L. Desempenho mecânico e análise da corrosão das armaduras em concretos produzidos com adição de resíduos de rochas ornamentais. **RevistaMatéria**, v. 22, n. 4, 2017 – DOI: 10.1590/S1517-707620170004.0225

EL MAADDAWY, T. A. SOUDKI, K. A. Effectiveness of Impressed Current Technique to Simulate Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete**.JounalofMaterials in CivilEngineering** 2003.15:41-47 - DOI: 10.1061/(ASCE)0899-156115:1(41), 2003.

ESCOBAL, A. D. **Caracterização da degradação de adesivos estruturais utilizados em sistemas de reforço de estruturas de concreto armado**. 2017. Relatório Final de Iniciação Científica, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

FERREIRA, D. C. **Avaliação da degradação de vigas reforçadas com FRP quando expostas ao intemperismo**. 2019. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.

FEDERATION INTERNATIONAL DU BETON. **Bulletin 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures.** FIB-14. Lausanne, 2001.

_____. **Bulletin 90: Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. FIB-90**. Lausanne, 2019.

GRAEFF, A. G. **Avaliação Experimental e Modelagem dos Efeitos Estruturais da Propagação da Corrosão em Elementos de Concreto Armado**. 2007. 184 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

HUANG, L. HAILON, Y. XIANYU, J. NANGUO, J. ZHENNAN, X. Corrosion-induced shear performance degradation of reinforced concrete beams.**Construction and Building Materials**, 248 118668, 2020 – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118668.

JUNG J., YEON LEE B., LEE K. S. Experimental Studyonthe Structural Performance Degradation of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams. **Advances in Civil Engineering**, Volume 2019 – DOI: 10.1155/2019/9562574.

LINGGA, N. M., **Behavior of Concrete Beams with Corroded Reinforcement Retrofitted with Carbon Fiber Reinforced Polymer**. 2016, 78 p. Thesis (Master of Science in Civil &Enviromental Engineering) Portland State University. EUA.

LIU, Y., JIANG, N., DENG, Y., MA, Y., ZHANG, H., LI, M. Flexural experiment and stiffness investigation of reinforced concrete beam under chloride penetration and sustained loading. **Construction and Building Materials** 114 302-310, 2016 – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.110

PENG, J., TANG, H., ZHANG, J. Structural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams Strengthened with Steel Plate. **Journalof Performance ofConstructedFacilities**, 2017 – DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001004.

RAY, I., PARISH, G. C., DAVALOS, J. F., CHEN, A. Effect of Concrete Substrate Repair Methods for Beams Aged by Accelerated Corrosion and Strengthened with CFRP. **Journal of AerospaceEngineering**. 24:227-239, 2011 – DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000030.

SALES, A., TUTIKIAN, B. F., DE SOUZA, C. A. C., CUNHA, M. P. T., LOURENÇO, M. Z., CASCUDO, O., HELENE, P. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção.**Organização Daniel Véras Ribeiro, 1ª edição, Rio de Janeiro, Elsevier, 2018.

SAID, M. E., HUSSEIN, A. A. Structural behavior of two-way slabs with large corroded área. **EngineeringStructures** 199 109556, 2019 – DOI:

10.1016/j.engstruct.2019.109556

SARTI JUNIOR, L. A. S. **Comportamento e durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP submetidas ao protocolo de degradação acelerado**. 2020. 170 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.

STEIN, K. J.; GRAEFF, Â. G. T Análise experimental dos efeitos combinados de corrosão e fadiga em vigas de concreto armado. **AmbienteConstruído**, v. 19, n. 3, p. 69-81, 2019 – DOI: 10.1590/s1678-86212019000300325

TANG, H., PENG, J., ZHANG, J. Influence of Further Corrosion on Structural Behavior of Corroded Reinforced-Concrete Beam Strengthened with Steel Plate Using Different Strengthening Schemes. **Journalof Performance ofConstructedFacilities**, 34(2): 04019117, 2020 – DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001402.

TORRES, A. S.**Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada – frente ao processo de corrosão de armaduras de concreto armado**. 2006. 159 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

WANG, L. MA, Y. DING, W. ZHANG, J. LIU Y. Comparative Study of Flexural Behavior of Corroded Beams with Different Types of Steel Bars. **Journalof Performance ofConstructedFacilities**29(6): 04014163, 2015 – DOI:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000661.

XIE, J., HU, R. Experimental study on rehabilitation of corrosion-damaged reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer.**Contruction and Building Materials** 38, 708-716, 2012 – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.023

ZHANG, W., ZHANG, H., GU., X., LIU, W. Structural behavior of corroded reinforced concrete beams under sustained loading.**Construction and Building Materials** 174 675-683, 2018 – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.145

ZHU, W., FRANÇOIS, R., FANG, Q., ZHANG, D. Influence of long-term chloride diffusion in concrete and the resulting corrosion of reinforcement on the serviceability of RC beams. **Cementand Concrete Composites** 71, 2016, 144-152 – DOI:10.1016/j.cemconcomp.2016.05.003