

PROTOCOLO DE DEGRADAÇÃO ACELERADO DE FRPS COM SISTEMA DE AQUECIMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS AUTOMÁTICO COM USO DA PLATAFORMA ARDUÍNO

G. M. DALFRÉ¹, A. ALVES², A. D. E. MAZZÚ³, L. A. S. JÚNIOR⁴
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)^{1,3,4}
Universidade Federal do ABC (UFABC)²
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3623-5103>¹
glaucia.dalfre@ufscar.br¹

Submetido 14/05/2021 - Aceito 08/09/2021

DOI: 10.15628/holos.2022.12489

RESUMO

De modo geral, os agentes de degradação podem gerar alterações nos materiais por meio de reações químicas, processos físicos ou mecânicos, conduzindo a perdas de desempenho de materiais compósitos utilizados em sistema de reforço. A avaliação da degradação pode ser realizada via ensaios de campo, em estações de envelhecimento ambiental ou em laboratório com o uso de protocolos acelerados. Neste sentido, um sistema automático, baseado no uso da plataforma Arduino, foi desenvolvido e utilizado em ensaios que seguiram um protocolo normatizado de degradação artificialmente acelerada para vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), corpos de prova de resinas epoxídicas, de concreto e de CFRP. Tal sistema foi responsável pelo aquecimento da

água do tanque de degradação, mantendo-a dentro do intervalo de temperatura necessário. Os resultados obtidos indicaram que o projeto proposto com o uso da plataforma Arduino foi capaz de aquecer e manter a água em temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ao longo dos 42 dias de ensaio. Para além disso, verificou-se a degradação das resinas epoxídicas utilizadas no sistema de reforço com reduções de até 63 % da força máxima e 61 % do módulo de elasticidade. Com relação às vigas reforçadas submetidas ao protocolo normalizado de envelhecimento acelerado, observou-se uma redução da capacidade resistente de 11 %. Por fim, verificou-se que a resistência do concreto e dos compósitos de CFRP não foram afetados pelo protocolo de degradação acelerado.

PALAVRAS-CHAVE: Aquisição de dados, Arduino, degradação de FRPs, protocolo acelerado.

ACCELERATED FRPS DEGRADATION PROTOCOL WITH AUTOMATIC HEATING AND DATA ACQUISITION SYSTEM USING THE ARDUINO PLATFORM

ABSTRACT

In general, degradation agents can generate changes in materials through chemical reactions, physical or mechanical processes, leading to a decrease in performance of composite materials used in strengthening systems. The degradation evaluation can be performed through field tests, environmental aging stations, or in the laboratory using accelerated protocols. In this sense, an automatic system based on the use of Arduino platform was developed and used in an artificially accelerated degradation protocols of concrete beams strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer sheets, epoxy resins, CFRP and concrete specimens. The Arduino system was responsible for heating the water of the degradation tank, keeping it

within the required temperature range, and recording the data. The obtained results indicate that the proposed Arduino project could heat and maintain the water at a temperature of $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ over the 42 days of the test. In addition, it was observed the degradation of the epoxy resins used in the strengthening system with reductions of up to 63 % in the maximum resistance and 61 % in the modulus of elasticity. Regarding the strengthened beams submitted to the standardized accelerated aging protocols, a reduction of 11% in the load-carrying capacity was observed. Finally, it was verified that the degradation protocol did not affect the properties of the concrete and CFRP specimens.

KEYWORDS: Data acquisition, Arduino, FRP degradation, accelerated protocol.



1 INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O aumento da capacidade de suportar cargas em elementos estruturais pode ser obtido de diversas formas como com o uso de técnicas de protensão ou encamisamento; por meio do uso de perfis metálicos; aço-memória; chapas de aço externamente coladas ao elemento; concreto reforçado com materiais têxteis (TRC, *Textile-Reinforced Concrete*) e polímeros reforçados ou estruturados com fibras (FRP, *Fiber Reinforced Polymer*) para reforço de elementos.

Entre elas, destaca-se a aplicação de FRPs para reforço de estruturas de concreto armado devido à sua facilidade de instalação, às poucas alterações na geometria da seção transversal do elemento e ao ínfimo aumento de peso na estrutura. Por isso, o uso de polímeros reforçados ou estruturados com fibras está cada vez mais presente na construção civil.

Os FRPs são materiais compósitos formados por fibras de alta resistência envolvidas por uma resina. Esta forma uma matriz polimérica, assegura a forma, protege as fibras, garante transferência da força entre as fibras e atua como agente de aderência das fibras e a estrutura a ser reforçada. A Figura 1 ilustra a composição básica dos FRPs.

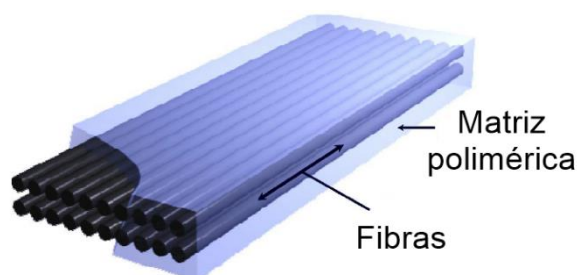


Figura 1: Componentes dos FRPs (ISIS, 2006, *apud* Oliveira, 2019)

Em estruturas de concreto, o principal desafio para aplicação de polímeros reforçados ou estruturados com fibras é a união do material compósito com a estrutura a ser reforçada. Em vista disso, foram desenvolvidas diversas técnicas baseadas no uso de resinas epoxídicas para colagem do material de reforço no substrato de concreto.

Entre essas técnicas, podem-se citar as seguintes: SBR (*Surface Bonded Reinforcement*) ou EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), NSM (*Near Surface Mounted*), EBRIG (*Externally Bonded Reinforcement in Grooves*) e EBROG (*Externally Bonded Reinforcement on Grooves*). A Figura 2 ilustra as técnicas SBR, EBR, NSM, EBRIG e EBROG.

Com exceção da técnica NSM, o material de reforço externo fica exposto a agressividade ambiental e pode sofrer degradação devido à presença de: umidade, intemperismo, atos de vandalismo e incêndio.

Segundo De Paoli (2008), o termo degradação refere-se a qualquer alteração de características inerente ao uso de um determinado material ou compósito polimérico por meio de reações químicas, tais como: a flexibilidade, a resistência elétrica, o aspecto visual, a resistência mecânica, a dureza, entre outras.

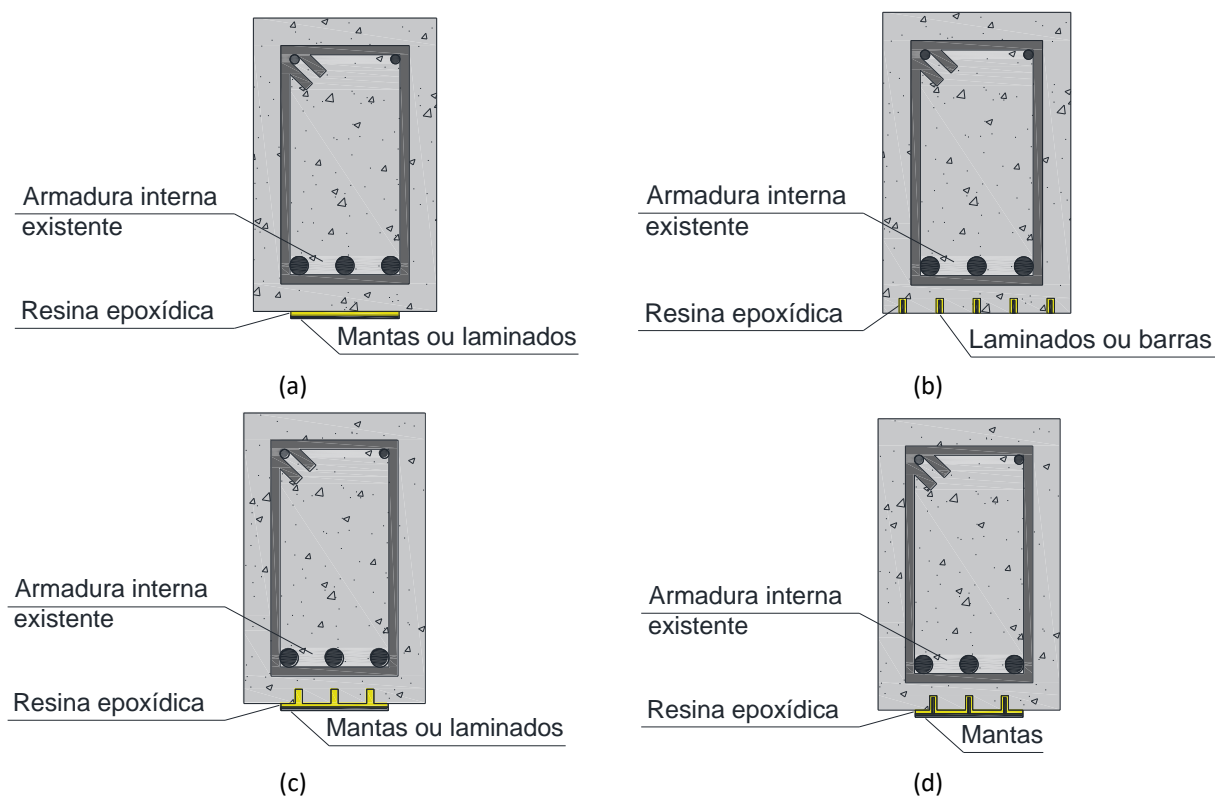


Figura 2: Técnicas (a) SBR/EBR, (b) NSM, (c) EBRIG e (d) EBROG

Silva (2014) considera que as alterações dos materiais compósitos frente aos agentes agressivos podem ser identificadas pela perda de desempenho de algumas de suas características fundamentais devido à sua degradação como consequência de seu envelhecimento. Para John e Sato (2006) *apud* Silva (2014), os agentes de degradação podem gerar alterações nos materiais por meio de reações químicas, processos físicos ou mecânicos, conduzindo a perdas de desempenho de compósitos.

De Paoli (2008) ressalta a importância de expor o material compósito a ensaios que representem as condições reais de uso para avaliar a estabilidade e a eficiência de seus componentes. Para este autor, tais ensaios podem ser feitos em estações de exposição ambiental (envelhecimento ambiental), em laboratório (envelhecimento acelerado) ou em campo.

1.1 Envelhecimento ambiental

O envelhecimento ambiental deve simular as condições reais de uso do material por meio de ensaios que o expõem ao intemperismo. Este tipo de ensaio possui custo elevado, pois geralmente é de longa duração, e é realizado em estações ambientais localizadas em regiões geográficas com diferentes condições climáticas (De Paoli, 2008).

Para isso, o local de exposição deve ser selecionado de modo a otimizar a degradação do material e possibilitar o monitoramento das condições meteorológicas (intensidade da luz solar, o índice pluviométrico, a direção e a intensidade dos ventos, entre outros).

Ainda segundo De Paoli (2008), o material compósito deve ser exposto a ciclos de claro e escuro, variações cíclicas de temperatura e outros efeitos sazonais durante o envelhecimento

ambiental. Os ensaios realizados em laboratório com iluminação contínua podem influenciar fortemente o processo de envelhecimento do material, quando comparados aos com iluminação intermitente.

Um exemplo de envelhecimento ambiental é realizado por Ferreira (2019). Em seu trabalho 4 vigas de concreto armado reforçadas com mantas de fibra de carbono (CFRP, *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) e corpos de prova de resinas epoxídicas e compósitos foram mantidos na estação meteorológica de superfície automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), designada por "São Carlos-A711", situada na área Norte da UFSCar, a qual é isenta de barreiras ou sombras que possam afetar os ensaios.

Sobre as condições ambientais, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) define o clima da cidade de São Carlos, no estado de São Paulo (com latitude 21°57'42" (S), longitude 47°50'28" (W) e altitude de 860 metros acima do nível do mar), como subtropical úmido com inverno seco e verão quente (Cwa).

Durante os ensaios foram coletados os seguintes dados medidos pelo INMET: temperatura, umidade relativa do ar, radiação UV e precipitação para os fins da pesquisa (Figura 3). A Figura 4a apresenta a estação meteorológica automática "São Carlos-A711", vigas expostas ao intemperismo (Figura 4b), corpos de prova de resinas epoxídicas e de compósitos (Figura 4c), enquanto a Figura 4d apresenta os resultados do ensaio de flexão onde V1/V2_REF_0 correspondem aos elementos de referência (não reforçados), V1/V2_REF_CFRP às vigas reforçadas de referência (mantidas em ambiente protegido) e V1/V2_WEA_CFRP das vigas reforçadas expostas mantidas pelo período de 6 meses em intemperismo.

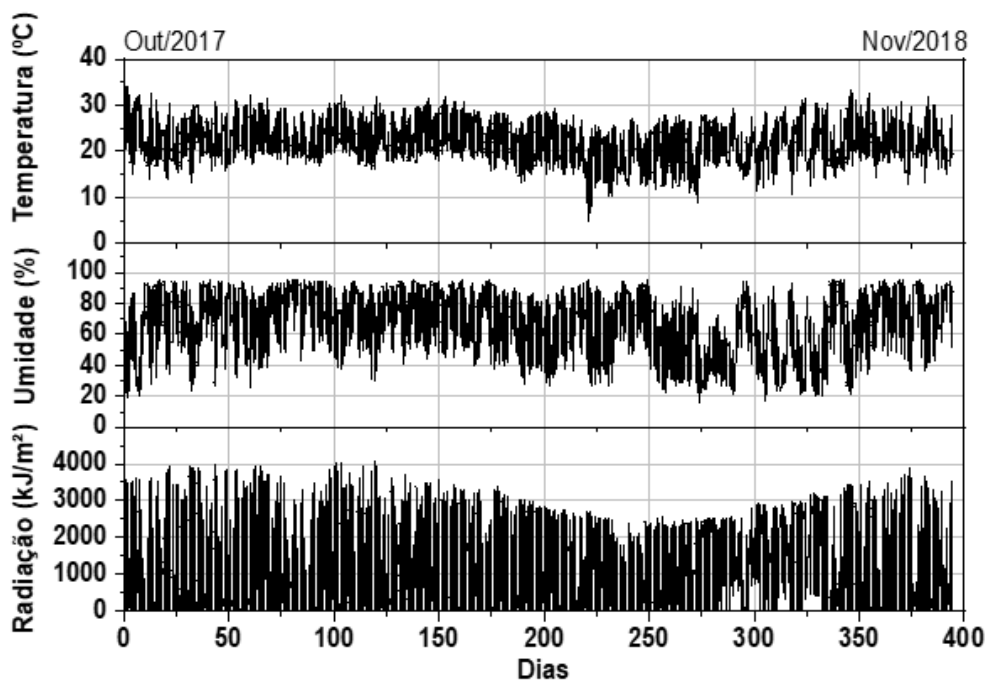


Figura 3: Dados meteorológicos para a exposição às intempéries (Ferreira, 2019)

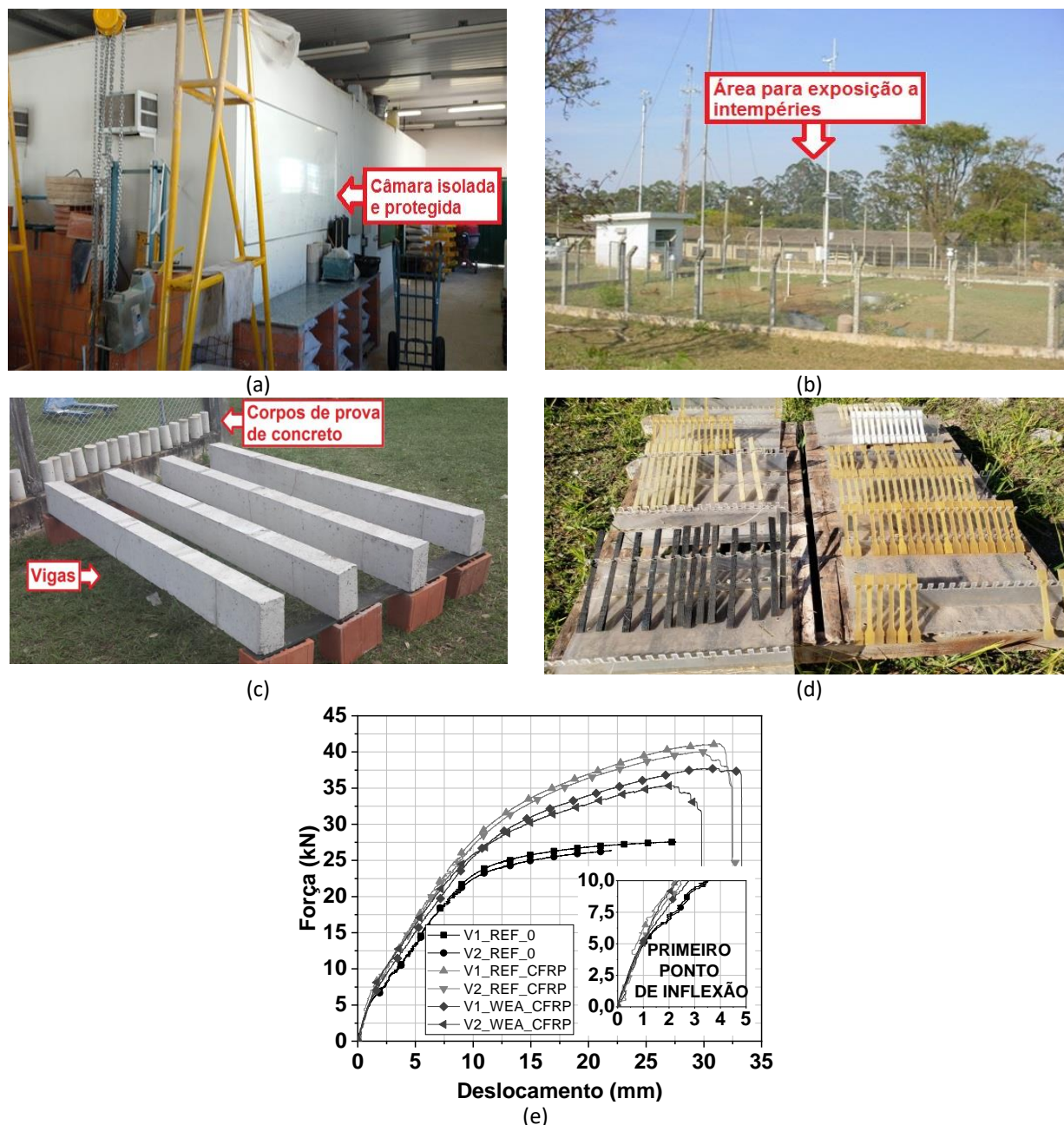


Figura 4: (a) Ambiente protegido, (b) Estação meteorológica "São Carlos-A711", (c) vigas e corpos de prova de concreto, (d) corpos de prova de resinas e de compósitos e (e) resultados obtidos em ensaio de flexão (Ferreira, 2019)

Ferreira (2019) analisou o comportamento de vigas expostas a intempéries e nas mantidas protegidas de intempéries em ambiente laboratorial, comparando-o com resultados obtidos experimentalmente para vigas de referência reforçadas. Este autor observou que os elementos submetidos às duas condições apresentaram diminuição de aproximadamente 6 % na rigidez e redução da carga média de escoamento da armadura longitudinal existente, sendo esta de 12,6 % para os expostos a intempéries e de 8,4 % para os mantidos em laboratório. Para além disso, o autor notou que a força máxima das vigas reforçadas reduziu em 10 % para os elementos expostos ao intemperismo.

1.2 Envelhecimento artificialmente acelerado

Os ensaios de longa duração permitem estabelecer uma correlação entre o envelhecimento artificialmente acelerado e o tempo real de envelhecimento, com isso é possível estimar a vida útil de materiais e sistemas. Em razão disso, são chamados de ensaios de envelhecimento acelerado e recomendados quando se pretende avaliar, de maneira controlada, em um intervalo de tempo de meses, os agentes causadores de degradação de um certo material ou formulação, seja isoladamente ou em conjunto (De Paoli, 2008).

Nessa mesma linha, John e Sato (2006) *apud* Silva (2014) notaram que os ensaios realizados em laboratório para simular a intensidade da ação de agentes de degradação em materiais e sistemas apresentam resultado muito superior à intensidade esperada para condições reais de uso.

Para Silva (2014), isso ocorre porque na maioria das vezes a taxa de degradação de um determinado material em condições reais de uso é muito baixa. Por consequência, ensaios para verificação de degradação do material ao longo de sua vida útil deve ocorrer por um intervalo de tempo suficiente para induzir uma degradação relevante. E, a partir desta informação, podem ser sugeridas medidas protetivas visando a extensão da vida útil do material frente ao meio de exposição, tal como o apresentado na Figura 5.

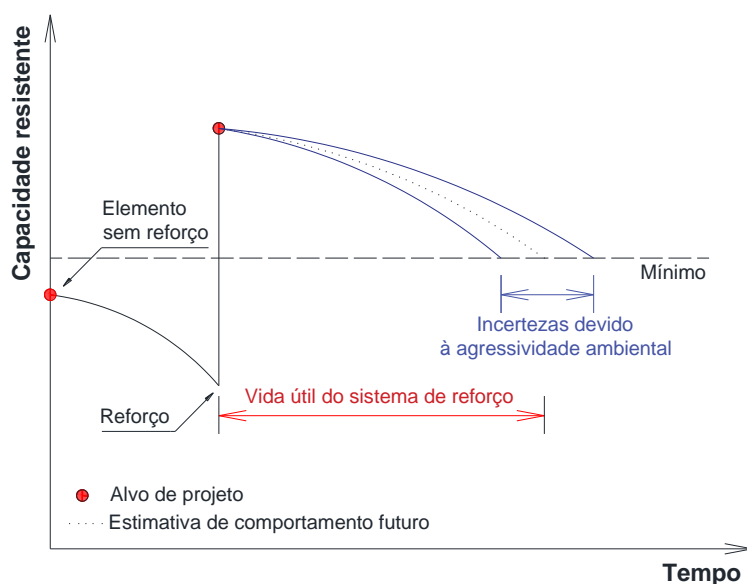


Figura 5: Diagrama capacidade resistente ao longo do tempo para elementos reforçados

No âmbito de ensaios artificialmente acelerados aplicados aos FRPs, destaca-se o uso dos protocolos ACPs (*Accelerated Conditioning Protocols*, na língua inglesa) apresentados na norma ACI 440.9R (2015). Segundo essa norma, os sistemas de reforço devem ser aplicados segundo as diretrizes apresentadas na norma ACI 440.2R (ACI, 2017) com posterior degradação nos seguintes ambientes de exposição:

- *Standart laboratory conditions*: ambiente laboratorial de referência com temperatura e umidade relativa de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $50\% \pm 10\%$, respectivamente;

- *Continuous immersion in water*: imersão contínua em água potável com temperatura controlada de $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- *Continuous exposure to humidity*: exposição contínua a umidade de 100% com temperatura controlada de $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$; e
- *Continuous immersion in alkaline solution*: imersão contínua em solução alcalina com temperatura controlada de $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Após o período de cura das resinas epoxídicas, o elemento reforçado e os materiais de reforço devem ser inseridos em um tanque, com geometria definida de modo a atender a demanda de ensaios a serem realizados, com a presença de água potável, solução alcalina ou umidade constante de acordo com o método de aceleração da degradação selecionado. A Figura 6 apresenta o esquema de ensaio proposto pelo código americano ACI 440.9R (2015) para realização do protocolo de degradação artificial acelerado.

O período de duração dos protocolos ACPs pode variar de 1000 e 10000 horas. Porém, a norma ACI 440.9R (ACI, 2015) sugere um período intermediário de 3000 horas de exposição. Os ensaios mecânicos para verificação do comportamento do elemento reforçado ou dos materiais pós-acondicionamento devem ser conduzidos, após o término do período de exposição, dentro de um intervalo de 2 a 5 horas (SARTI JÚNIOR, 2020).

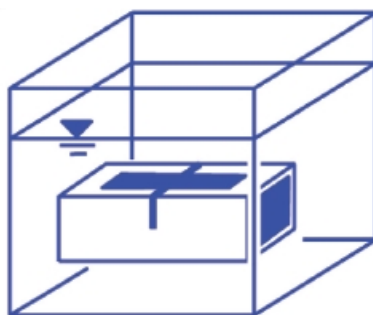


Figura 6: Arranjo de ensaio proposto para a degradação artificial acelerada (ACI 440.9R, 2015)

Com relação a temperatura da água potável ou solução alcalina, a norma ACI 440.9R (2015) indica que esta deve ser mantida com o valor de $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entretanto, a forma de aquecimento e monitoramento da temperatura do líquido não é especificado pela norma.

Assim, deve-se escolher a fonte de aquecimento e o mecanismo de controle da temperatura que melhor atenda os objetivos de sua pesquisa. Dessa maneira, para garantir a condição de ensaio indicada pela norma ACI 440.9R (2015), desenvolveu-se um sistema automático com o uso de plataforma Arduino para aquecer a água, mantê-la dentro do intervalo de temperatura necessário e registrar os dados obtidos experimentalmente durante os ensaios de envelhecimento acelerado das vigas de concreto reforçadas com CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*).

2 METODOLOGIA

Atualmente, as plataformas eletrônicas de código aberto tornaram possível o desenvolvimento de sistemas automatizados de baixo custo, quando comparados aos equipamentos comerciais com finalidades semelhantes. Entre elas destaca-se a plataforma

Arduino por sua grande disponibilidade no mercado nacional e seu ambiente integrado de desenvolvimento, cuja programação se baseia em linguagem C/C++.

Por esse motivo, para assegurar o atendimento aos requisitos determinados pelo protocolo ACI 440.9R (2015) durante a realização dos ensaios de degradação artificial acelerada nas vigas de concreto, corpos de provas de resinas e de materiais compósitos confeccionados por Sarti Júnior (2020), desenvolveu-se um sistema automático em plataforma Arduino capaz de aquecer a água no interior do tanque de ensaio dos elementos, mantê-la dentro do intervalo de temperatura estipulado por este protocolo e registrar as medições realizadas.

Para tanto, utilizou-se um aquecedor elétrico de 220 V e potência de 1000 W, o qual era acionado por um relé de 5 VDC e 10 A, modelo JQC3F-05VDC-C. Este era chaveado por um Arduino Uno ao receber informações de um sensor de temperatura, modelo DS18B20, de que a água no interior do tanque de ensaios estava fora do intervalo necessário para atender a norma.

Adicionalmente, todas as informações das temperaturas medidas pelo sensor foram registradas em tempo real, com data e hora, por meio do módulo RTC (*Real Time Clock*), modelo DS3231, e enviadas para o módulo SD onde foram gravadas em um cartão de memória.

Além do hardware utilizado, para que fosse possível realizar o controle e o registro da temperatura da água durante os ensaios, implementou-se uma rotina computacional por meio do ambiente integrado de desenvolvimento. Este a compilou em linguagem de máquina, a qual foi executada pelo processador do Arduino.

As Figuras 7 e 8 apresentam o esquema elétrico e o hardware montado, respectivamente, do sistema de controle e registro de temperatura da água desenvolvido para ensaios de degradação artificial acelerada. Na Figura 9 é possível visualizar separadamente cada um dos componentes do sistema.

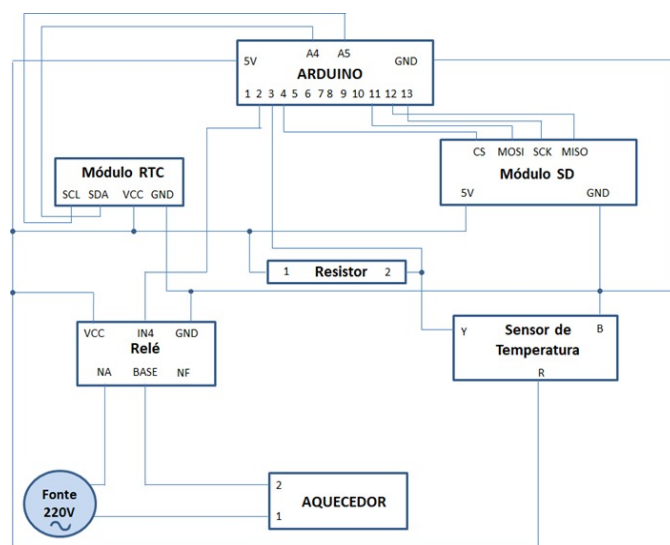


Figura 7: Esquema de ligação elétrica do sistema de controle e registro de temperatura da água (Russo *et. al*, 2019)

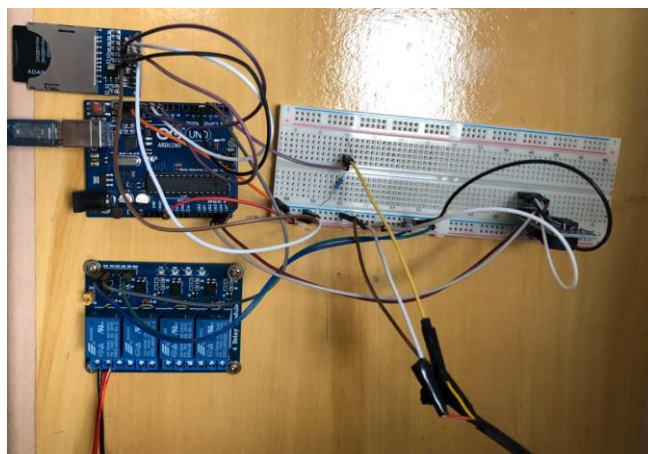


Figura 8: Montagem do hardware do sistema desenvolvido (Russo *et. al*, 2019)

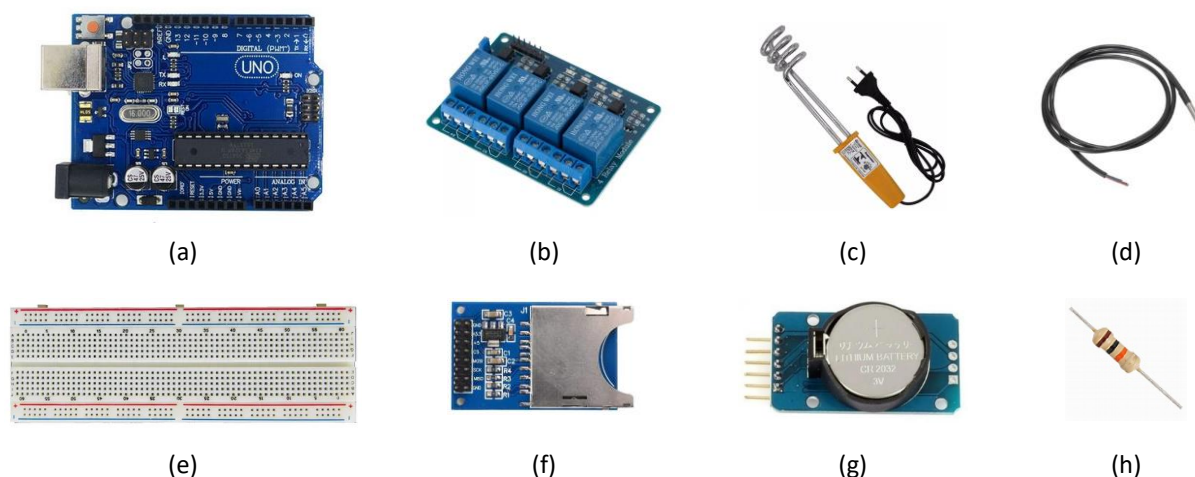


Figura 9: (a) Arduino, (b) Relé, (c) Aquecedor, (d) Sensor, (e) Protoboard, (f) Módulo SD, (g) RTC e (h) Resistor

O sistema desenvolvido foi instalado em um tanque de degradação construído em ambiente interno e protegido no interior da oficina mecânica do Departamento de Engenharia Civil (DECiv) da UFSCar, onde foram posicionadas as vigas com e sem sistema de reforço com FRPs, os corpos de prova de concreto, de resinas epoxídicas e de compósitos. Após isso, o tanque foi preenchido com água potável obtida na rede pública de abastecimento até atingir a altura de lâmina d'água de 12 cm, equivalente a 300 litros, suficiente para imersão total dos corpos de prova e do sistema de reforço no líquido.

Em seguida, o sistema de controle e aquisição de dados foi ajustado para manter água dentro do intervalo temperatura necessário. Posteriormente, iniciou-se o ensaio, o líquido foi aquecido até que a água no tanque chegou à temperatura indicada pelo protocolo ACI 440.9R (2015) para a realização de degradação artificialmente acelerados.

Depois disso, foram utilizados um termômetro digital, para medir a temperatura da água em diferentes regiões do tanque, uma câmera térmica, marca Flir com resolução de 4800 pixels, para obter a imagem termográfica do ensaio e, assim, conferir e validar as medições realizadas pelo sistema. A Figura 10 apresenta o tanque para ensaios de degradação acelerada com o

aquecedor, as vigas de concreto com e sem sistema de reforço de FRPs, os corpos de prova de concreto, de resinas epoxídicas e de compósitos.



Figura 10: Tanque com: (a) vigas de concreto com e sem sistema de reforço de FRPs, (b) corpos de prova, (c) vigas e corpos de prova durante o ensaio e (d) aquecedor em funcionamento (Sarti Júnior, 2020)

Adicionalmente, vigas com e sem sistema de reforço, corpos de provas de concreto, de resinas epoxídicas e de compósitos FRPs foram mantidos em ambiente de laboratório, fora do tanque, para que suas propriedades mecânicas fossem obtidas experimentalmente e utilizadas como referência, em comparação aos resultados apresentados pelos elementos submetidos aos ensaios de degradação artificial acelerada.

No vigésimo oitavo dia após a concretagem das vigas e dos corpos de prova, determinou-se a resistência a compressão e o módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios, seguindo as recomendações das normas NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 8522 (ABNT, 2017). No trigésimo primeiro dia após a concretagem aplicou-se o sistema de reforço nas vigas de concreto

e foram moldados os corpos de prova de FRPs e de resinas epoxídicas, os quais foram ensaiados segundo as normas ISO 527-5 (2009) e ISO 527-1 (2012).

Para a cura completa do sistema de reforço o fabricante recomenda aguardar 14 dias, motivo pelo qual as vigas com reforço somente foram avaliadas experimentalmente no quadragésimo quinto dia após a concretagem. Já as os corpos de provas de resinas epoxídicas “A” e “B” e de FRPs foram avaliados sete dias (meia cura) e quatorze dias (cura completa) após serem moldados.

Além disso, tanto as propriedades mecânicas das vigas com sistema de reforço quanto dos corpos de prova de resinas e de FRPs mantidos em laboratório fora do tanque também foram obtidas experimentalmente após o período de 1000 horas ou 42 dias da aplicação do reforço e moldagem dos corpos de prova, tempo de duração do ensaio de degradação artificial acelerada, ou seja, 87 dias após a concretagem. Maiores informações sobre o programa experimental realizado podem ser encontradas em Sarti Júnior (2020).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema desenvolvido aqueceu a água no interior do tanque desde a temperatura ambiente de 26 °C, no início do ensaio, quando o líquido encontrava-se em equilíbrio termodinâmico, até 50 °C em um intervalo de tempo de 485 minutos, conforme mostra a Figura 11. O tempo elevado para atingir a temperatura determinada pelo protocolo ACI 440.9R (2015) se deu pela alta inércia térmica conjunto ensaiado.

Após a água atingir 50 °C, a verificação de sua temperatura em diversas regiões do tanque com um termômetro digital apresentou uma diferença menor a 1 °C em relação à medida pelo sistema de controle de aquecimento, o que representa um erro inferior a 2 %. A Figura 12 mostra a medição da temperatura da água realizada com um termômetro digital em vários pontos do tanque de ensaios.

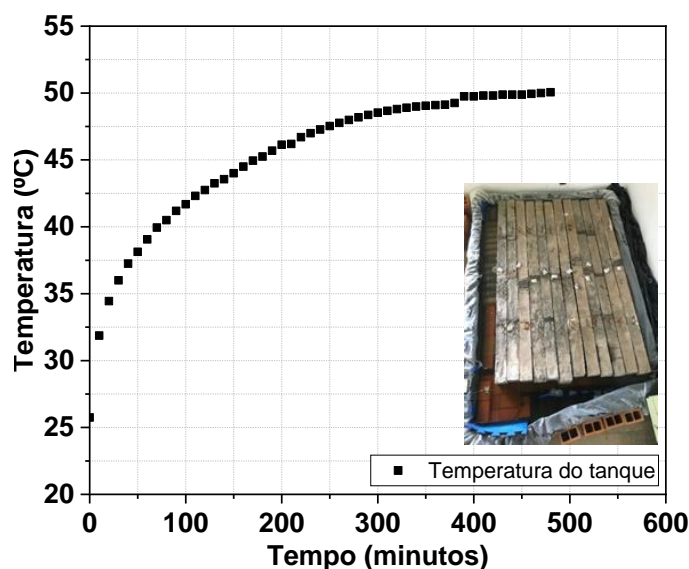


Figura 11: Resultados obtidos do tanque de degradação acelerado



Figura 12: Medição da temperatura da água com termômetro digital em variados pontos do tanque (Sarti Júnior, 2020)

Por sua vez, a imagem termográfica, obtida com o uso de uma câmara térmica, não possui precisão para determinar o erro de medição do sistema. Porém, por meio dela é possível observar a distribuição de temperatura ao longo do tanque durante o ensaio, onde os corpos de prova e a água são representados pela cor vermelha, o que significa que estavam a aproximadamente 50 °C, e as vigas encontram-se nas regiões amarelas, indicando que suas temperaturas eram inferiores à da água.

Essa diferença de temperatura entre as vigas de concreto e água aquecida era esperada, uma vez que estes elementos estruturais estavam submetidos a dois meios com temperaturas diferentes, água (necessária para a ação capilar do líquido) e ar ambiente, não poderiam alcançar o equilíbrio termodinâmico com qualquer um desses meios. A imagem termográfica do ensaio de envelhecimento acelerado pode ser visualizada na Figura 13.

Durante o período de 1000 horas de realização do ensaio, a temperatura a água no interior do tanque se manteve dentro dos limites indicados pelo protocolo ACI 440.9R (2015), independente da variação de temperatura do ar ambiente, conforme pode ser observado graficamente por meio da Figura 14. Assim, percebe-se que o projeto proposto com o uso da plataforma Arduino foi capaz de aquecer a água até que esta atingisse e mantivesse a temperatura em 50 °C \pm 3 °C ao longo dos 42 dias de ensaio.

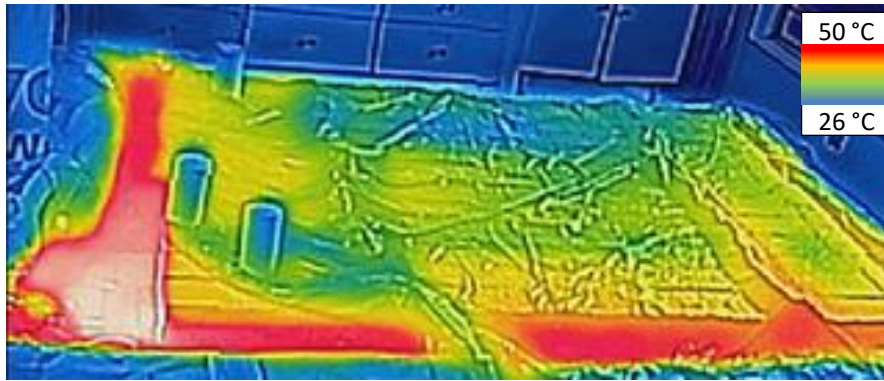


Figura 13: Imagem termográfica do tanque (Mazzú, 2020)

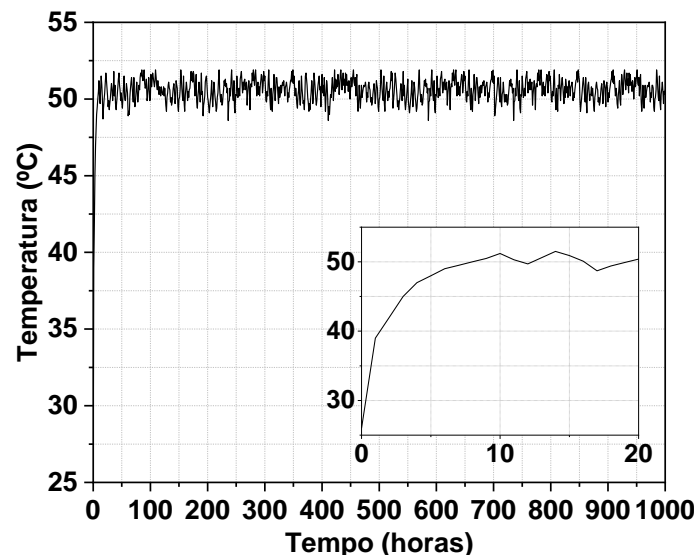


Figura 14: Temperatura da água aquecida medida pelo sistema durante o ensaio de 1000 horas

Os valores médios das propriedades mecânicas do concreto, apresentados na Tabela 1, foram obtidos por meio de ensaios do corpo de prova mantidos em ambientes laboratorial (fora do tanque) e de degradação artificial acelerada em diferentes dias após sua concretagem: 28, 45 e 87 dias. Note-se que os resultados para o ambiente de exposição laboratorial e o protocolo ACP da norma ACI 440.9R (2015) apresentam valores similares de resistência a compressão e módulo de elasticidade, não indicando degradação do concreto frente ao meio de exposição.

Tabela 1: Propriedades mecânicas do concreto

Ambiente de exposição	Tempo após a concretagem (dias)	Resistência a compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Laboratorial	28	32,7 (6,9) *	---
Laboratorial	45	32,7 (10,2) *	---
Laboratorial	87	33,4 (2,8) *	34,7 (1,1) *
Degradação artificial acelerada (ACP)	87	35,7 (2,7) *	38,2 (1,1) *

* (valor) Coeficiente de Variação (COV) = (Desvio-padrão/Média) × 100

Fonte: Adaptado de Sarti Júnior (2020)

Os resultados médios de tensão máxima e módulo de elasticidade das resinas epoxídicas do tipo A (*primer*) e B (laminação), expostas aos ambientes laboratorial e degradação artificial

acelerada (ACP), foram obtidos por meio dos ensaios mecânicos de tração uniaxial e são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Principais resultados para as resinas A e B mantidas em ambientes laboratorial e em protocolo de acondicionamento acelerado

Ambiente/ Tempo de moldagem	Resina A						Resina B					
	Tensão máxima			Módulo - Elasticidade			Tensão máxima			Módulo - Elasticidade		
	Média (MPa)	D.P. (MPa)	COV (%)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	COV (%)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	COV (%)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	COV (%)
LAB_07D	38,2	1,1	3,1	2,1	0,1	6,0	37,5	1,5	4,2	2,2	0,1	5,9
LAB_14D	37,8	1,7	4,7	2,0	0,05	2,5	39,4	3,3	8,4	2,1	0,1	6,6
LAB_1000h	34,8	10,0	28,7	1,8	0,6	35,4	30,5	3,3	10,9	1,1	0,3	26,5
ACP_1000h	12,7	0,9	7,0	0,7	0,2	31,0	15,2	0,7	5,0	1,0	0,1	0,37

Legenda: D.P.= Desvio Padrão; COV = Coeficiente de Variação = (D.P./média) x 100.

Fonte: Adaptado de Sarti Júnior (2020)

Observe-se que a resina A (*primer*), mantida em laboratório fora do tanque, apresentou módulos de elasticidade e tensão máximas similares para os ensaios realizados 7 dias, 14 dias e 42 dias (1000 horas) após a moldagem. Entretanto, as resinas expostas ao protocolo de degradação artificial acelerada de 1000 horas apresentaram reduções de 63 % da força máxima e 61 % do módulo de elasticidade.

Com relação à resina B (laminação), os resultados obtidos apresentam reduções de 22,6 % e 47,6 % na tensão máxima e no módulo de elasticidade, respectivamente, do período mantido em laboratório de 14 dias para o de 42 dias de moldagem. Quando esta resina foi exposta ao protocolo de degradação artificial acelerada de 1000 horas, o módulo de elasticidade não apresentou variação significativa, porém a tensão máxima reduziu 50 % em relação à mesma resina mantida em laboratório, fora do tanque, por 1000 horas.

No que se refere aos resultados médios obtidos por meio dos ensaios mecânicos de tração uniaxial nos corpos de prova de CFRPs, expostos a ambiente laboratorial fora do tanque ou à degradação artificial acelerada e ensaiados após o período de 1000 horas, verifica-se que os corpos de prova apresentaram um comportamento elástico linear até sua ruptura, típico de materiais frágeis, indicando reduções insignificativas (cerca de 6 %) da tensão máxima e do módulo de elasticidade na comparação entre os ensaios de degradação acelerada e o de ambiente laboratorial. A Tabela 3 apresenta os resultados médios de tensão e módulo de elasticidade.

Tabela 3: Principais resultados para as amostras de CFRP expostas aos ambientes laboratorial e degradação acelerada

Ambiente/ Tempo de moldagem	Tensão máxima			Módulo de Elasticidade		
	Média (MPa)	D.P. (MPa)	COV (%)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	COV (%)
LAB_07D	2560,2	377,5	14,7	243,1	23,8	9,8
LAB_14D	2715,5	228,0	8,4	244,9	23,2	9,4
LAB_1000h	2603,8	557,6	21,4	236,2	18,2	7,7
ACP_1000h	2450,3	199,4	8,14	219,9	19,7	8,9

Legenda: D.P.= Desvio Padrão; COV = Coeficiente de Variação = (D.P./média) x 100.

Fonte: Adaptado de Sarti Júnior (2020)

Ao término do período de 42 dias, as vigas de concreto com reforço de CFRPs foram retiradas do tanque de degradação acelerada e submetidas a ensaios de carregamento para determinar os seus deslocamentos, até a ruptura, em função da força aplicada. Estas vigas apresentaram redução de aproximadamente 11% na força média máxima em relação ao comportamento obtido para as vigas de referência, consequência da degradação do sistema de reforço. Também foram ensaiadas vigas com reforços de FRPs mantidas por 1000 horas no laboratório, protegidas de intempéries, mas fora do tanque de degradação acelerada. Estas vigas apresentaram o mesmo comportamento das vigas de referência.

Esse resultado condiz com os obtidos por Ferreira (2019) em seu estudo experimental de vigas semelhantes com reforço de CFRPs. Neste trabalho o autor expôs algumas dessas vigas ao intemperismo e outras ao ensaio de degradação acelerada, seguindo o protocolo da norma ACI 440.9R (2015). Os resultados indicaram a redução da força máxima em aproximadamente 10 % para as vigas expostas ao intemperismo e em 11 % para as vigas submetidas à aplicação do protocolo normalizado de envelhecimento acelerado.

A Figura 15a apresenta os diagramas médios de força versus deslocamento para as vigas com esse reforço (ACP_CFRP_1000h) submetidas ao ensaio de degradação acelerada e as que não foram expostas ao envelhecimento artificialmente acelerado, mas permaneceram protegidas de intempéries no interior do laboratório por 1000 horas (LAB_CFRP_1000h), em comparação às vigas de referência (LAB_CFRP_14 dias). Nestas os diagramas médios de força versus deslocamento foram determinados por ensaios realizados 14 dias após a aplicação dos reforços de FRPs, tempo determinado pelo fabricante da resina para a cura.

Já na Figura 15b é possível observar os resultados obtidos no estudo experimental realizado por Ferreira (2019), onde WEA_CFRP refere-se a vigas com reforços de FRPs expostas ao intemperismo e ACP_CFRP_1000h são as submetidas ao ensaio de degradação acelerada seguindo o protocolo da norma ACI 440.9R (2015).

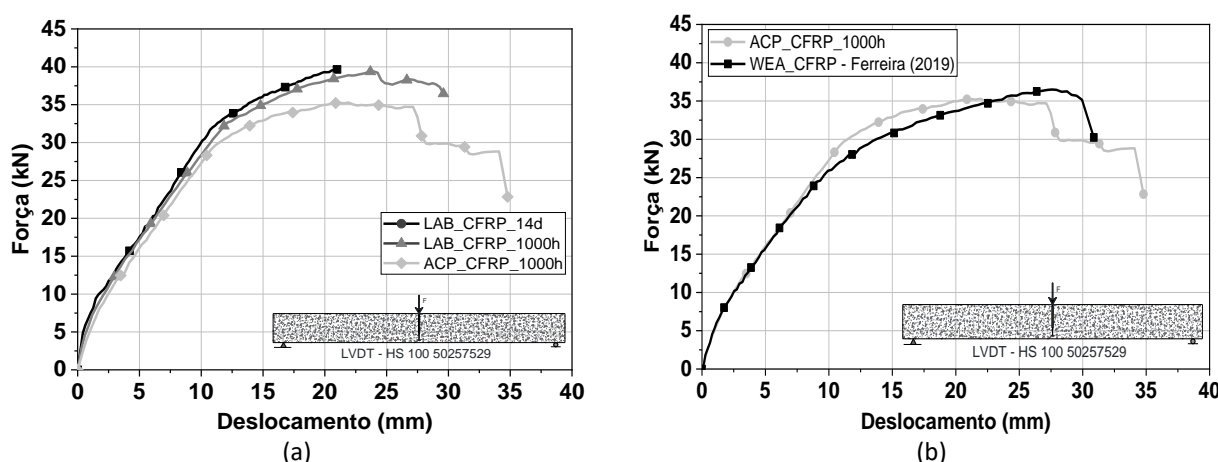


Figura 15: Diagrama de Força versus Deslocamento em vigas: (a) mantidas em ambiente protegido, submetidas ao protocolo de degradação acelerada e de referência e (b) expostas ao intemperismo e submetidas ao ensaio normalizado de degradação acelerada

CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema automático baseado no uso da plataforma aberta de prototipação eletrônica Arduino para avaliação da degradação de sistemas de reforço com materiais compósitos de FRP. Para isso, o sistema foi responsável pelo aquecimento da água do tanque de degradação segundo o recomendado pela norma ACI 440.9R (ACI, 2015), mantendo-a dentro do intervalo de temperatura necessário, e registro de dados. Os resultados obtidos permitiram a obtenção das seguintes conclusões:

- O projeto proposto com o uso da plataforma Arduino foi capaz de aquecer e manter a água em temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ao longo dos 42 dias de ensaio e levou a degradação do sistema de reforço;
- As resinas do tipo A (primer) acondicionadas nos tanques e ensaiadas aos 42 dias apresentaram reduções de 63 % da força máxima e 61 % do módulo de elasticidade. Com relação à resina B (saturação), tendo como referência a idade de 14 dias, reduções de 22,6 % e 47,6 % na tensão máxima e no módulo de elasticidade foram observadas para a resina mantida em ambiente laboratorial e ensaiada com idade de 42 dias. Quando exposta ao protocolo de degradação artificial acelerada, e tendo como referência o ambiente laboratorial e idade de 42 dias, uma redução de 50 % da tensão máxima foi obtida, sem alteração do módulo de elasticidade;
- Com relação aos compósitos, verifica-se que os corpos de prova apresentaram um comportamento elástico linear até sua ruptura, típico de materiais frágeis. Com relação aos resultados obtidos, reduções de 6 % da tensão máxima e do módulo de elasticidade foram verificados na comparação entre os ensaios segundo o protocolo de acondicionamento e o ambiente laboratorial;
- Todas as vigas sem reforço mantidas em ambiente laboratorial ou expostas as ACPs e ensaiadas após o período de 1000h apresentaram comportamento força versus deslocamento similar, independentemente do meio de exposição. Assim, percebe-se que não houve degradação dos elementos não reforçados frente ao protocolo de acondicionamento utilizado;
- Para as vigas reforçadas e ensaiadas com idade de 87 dias e considerando-se o comportamento obtido para a viga mantida em ambiente laboratorial, percebe-se que o protocolo apresentado pela ACI 440.9R (ACI, 2015) levou a degradação do sistema de reforço e redução da capacidade portante em 11 % da força média máxima; e
- Tendo em vista a correlação com os resultados obtidos em outro programa experimental em andamento, uma análise simplista, baseada somente na força máxima registrada, indica que um ciclo de 1000 h do protocolo de acondicionamento recomendado pela norma ACI 440.9R (ACI, 2015) corresponde a um período de degradação natural do sistema de reforço, devido intemperismo de, aproximadamente, 6 meses.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI COMMITTEE 440.9R (2015). Guide to Accelerated Conditioning Protocols for Durability Assessment of Internal and External Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement, ACI Committee 440, 10pp.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 (2018): Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522 (2018): Concreto – Determinação dos módulos elásticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro.

De Paoli, M.A. (2008). Degradação e estabilização de polímeros. Editora Chemkeys.

FERREIRA, D. C. (2019). Avaliação da degradação de vigas reforçadas com FRP quando expostas ao intemperismo. [Dissertação, Universidade Federal de São Carlos]. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12121>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 527-1 (2012). Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles. International Organization for Standardization (ISO), Genève, Switzerland.

_____. ISO 527-5 (2009). Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.

OLIVEIRA, M. C. (2019). Análise do comportamento estrutural e durabilidade de pilares de concreto armado reforçados com mantas de GFRP. [Dissertação, Universidade Federal de São Carlos]. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11979>

SARTI JÚNIOR, L. A. (2020). Durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP submetidas a degradação acelerada. [Dissertação, Universidade Federal de São Carlos]. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12781>

SILVA, S. C. B. (2014). Estudo da degradação acelerada de argamassa em um sistema de revestimento cerâmico de fachada. [Dissertação, Universidade do Extremo Sul Catarinense]. https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNESC-1_21c81c19c3cd5156fc75980b5f8ae2c1

MAZZÚ, A. D. E. (2020). Estudo sobre a substituição de armadura metálica por barras de GFRP em vigas de concreto armadas à flexão. [Dissertação, Universidade Federal de São Carlos]. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12770?show=full>.

COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Dalfré, G. M., Alves, A., Mazzú, A. D. E., & Júnior, L. A. S. (2022). Protocolo de degradação acelerado de FRPs com sistema de aquecimento e aquisição de dados automático com uso da plataforma Arduino. HOLOS, 7. Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/12489>.



G. M. DALFRÉ

Doutora em Engenharia Civil pela Universidade do Minho, em Portugal. Também possui formação técnica em Edificações pelo Colégio Técnico de Limeira (Cotil/Unicamp), graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia de Piracicaba (EEP/FUMEP) e mestrado em Engenharia de Estruturas pela USP/São Carlos. É membro do Instituto Brasileiro do Concreto (Ibracon), atuando na diretoria regional de São Carlos. Também atua como membro do Comitê IBRACON/ABECE 303: Uso de Materiais não convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras. É Professora do curso de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Na pesquisa atua nas áreas de durabilidade com barras não metálicas e reforço de estruturas com materiais compósitos.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3623-5103>

E-mail: glaucia.dalfre@ufscar.br

A. ALVES

Possui formação em Engenharia Mecânica e Aeronáutica com especialização em Engenharia Aeroespacial. Tem experiência na área de Termodinâmica, Aerodinâmica, Propulsão e Energia com ênfase em Combustão.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4370-4991>

E-mail: a.alves@ufabc.edu.br

A. D. E. MAZZÚ

Doutoranda em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv) da Universidade Federal de São Carlo como bolsista CAPES. Mestra em Engenharia Civil pelo PPGECiv da UFSCar. Graduada em Engenharia Civil com ênfase em Sistemas Construtivos pela UFSCar.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9383-3260>

E-mail: amandadescobal@hotmail.com

L. A. S. JÚNIOR

Doutorando em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv) da Universidade Federal de São Carlo como bolsista CAPES. Mestre em Engenharia Civil pelo PPGECiv da UFSCar.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5169-5031>

E-mail: luiz.sarti.junior@gmail.com

Editor(a) Responsável: Francinaide de Lima Silva Nascimento



Recebido: 14 de maio de 2021

Aceito: 08 de setembro de 2021

Publicado: 28 de dezembro de 2022

