

Protocolo de degradação acelerado de FRPs com sistema de aquecimento e aquisição de dados automático com uso da plataforma Arduíno

Gláucia Maria Dalfré¹, Alexandre Alves², Amanda Duarte Escobal Mazzú¹ & Luiz Antonio Sarti Junior¹

¹ Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil

² Universidade Federal do ABC, Santo André, São Paulo, Brasil

Correspondência: Gláucia Maria Dalfré, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil.
E-mail: gmdalfre@gmail.com

Recebido: Dezembro 30, 2021

Aceito: Junho 17, 2022

Publicado: Julho 01, 2022

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 Arduíno, 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 Arduíno foi capaz de aquecer e manter a água em temperatura de 50 ± 3 °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 normatizado 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, Arduíno, Degradação de FRPs, Protocolo acelerado.

Abstract

In general, degradation agents can generate changes in materials through chemical reactions, physical or mechanical processes, leading to a decrease in the 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 the Arduino platform was developed and used in artificially accelerated degradation protocols of concrete beams strengthened with CFRP (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 ± 3 °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.

Resumen

En general, los agentes de degradación pueden generar cambios en los materiales a través de reacciones químicas, procesos físicos o mecánicos, dando lugar a pérdidas de rendimiento de los materiales compuestos utilizados en los sistemas de refuerzo. La evaluación de la degradación se puede realizar a través de pruebas de campo, en estaciones de envejecimiento ambiental o en el laboratorio utilizando protocolos acelerados. En este sentido, se desarrolló un sistema automático, basado en el uso de la plataforma Arduino, y se utilizó en ensayos que siguieron un protocolo estandarizado de degradación acelerada artificialmente para vigas de hormigón armado reforzado con láminas de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), especímenes de resinas epoxi, hormigón y CFRP. Este sistema se encargaba de calentar el agua del tanque de degradación, manteniéndola dentro del rango de temperatura requerido. Los resultados obtenidos indicaron que el proyecto propuesto utilizando la plataforma Arduino fue capaz de calentar y mantener el agua a una temperatura de 50 ± 3 °C durante los 42 días de prueba. Además, se verificó la degradación de las resinas epoxi utilizadas en el sistema de refuerzo, con reducciones de hasta un 63% de la resistencia máxima y un 61% del módulo de elasticidad. En cuanto a las vigas reforzadas sometidas al protocolo estandarizado de envejecimiento acelerado, se observó una reducción del 11% en la capacidad resistente. Finalmente, se encontró que la resistencia del hormigón y los compuestos CFRP no se vieron afectados por el protocolo de degradación acelerada.

Palabras clave: Adquisición de datos, Arduino, Degradación de FRP, Protocolo acelerado.

1. Introdução

O aumento da capacidade de suportar cargas em elementos estruturais pode ser obtido 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. Dentre estas, a aplicação de FRPs para reforço de estruturas de concreto armado se destaca devido à sua facilidade de instalação, às poucas alterações na geometria da seção transversal do elemento e ao ínfimo aumento de peso na estrutura (Dalfré; Parsekian, 2022). Por isso, o uso de FRPs está cada vez mais presente na construção civil.

Os FRPs são materiais compósitos formados por fibras de alta resistência envolvidas por uma matriz polimérica (resina). Esta matriz polimérica assegura a forma, protege as fibras, garante transferência de tensões entre as fibras e atua como agente de aderência entre as fibras e a estrutura a ser reforçada (ISIS, 2006; Machado; Machado, 2015; Dalfré *et al.*, 2020; Dalfré; Parsekian, 2022). A Figura 1 ilustra a composição básica dos FRPs.

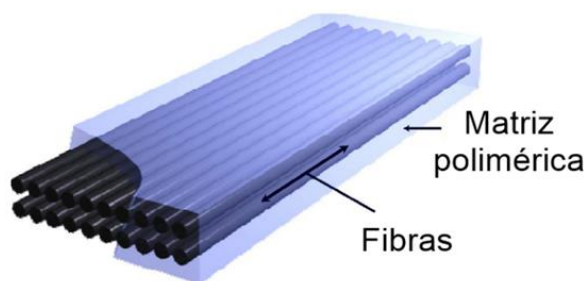


Figura 1. Componentes dos FRPs. Fonte: ISIS, 2006.

Em estruturas de concreto, o principal desafio para aplicação de FRPs 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 estas técnicas, podem ser citadas a técnica 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*) (Dalfré; Parsekian, 2022). A Figura 2 ilustra estas técnicas.

Quando uma estrutura é reforçada, 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 (Dalfré *et al.*, 2019; Dalfré *et al.*, 2020; Dalfré *et al.*, 2022).

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

Silva (2014) considera que as alterações nos FRPs pela ação de agentes agressivos podem ser identificadas pela perda de desempenho de algumas de suas características fundamentais, o que se deve à sua degradação como consequência de seu envelhecimento. Os agentes de degradação podem gerar alterações nos materiais por meio de reações químicas, processos físicos ou mecânicos, conduzindo a perdas de desempenho dos FRPs (Dalfré *et al.*, 2021; Dalfré *et al.*, 2022).

Assim, De Paoli (2008) ressalta a importância de submeter os FRPs a ensaios que representem as condições reais de uso para avaliar a estabilidade e a eficiência de seus componentes. Tais ensaios podem ser feitos em estações de exposição ambiental (envelhecimento ambiental), em laboratório (envelhecimento acelerado) ou em campo.

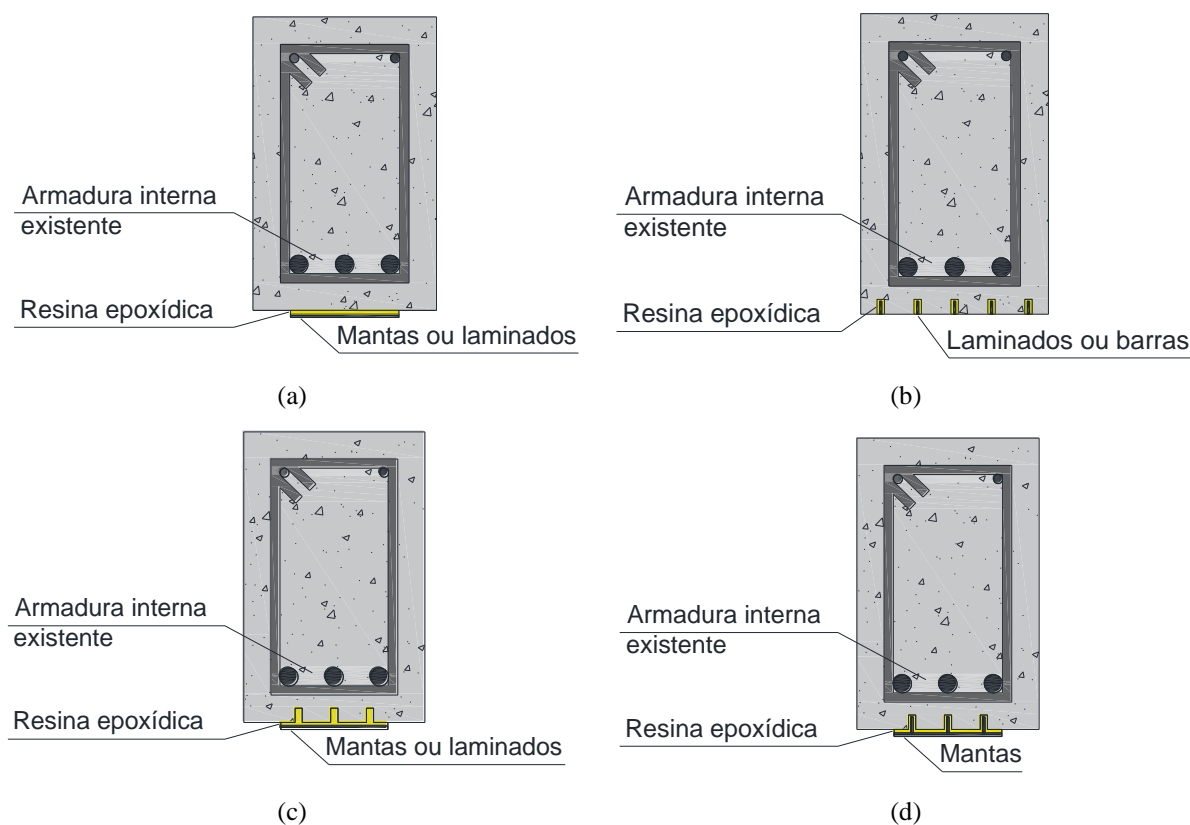


Figura 2. Técnicas SBR/EBR (a), NSM (b), EBRIG (c) e EBROG (d). Fonte: Autores, 2022.

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 FRP 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 pode ser encontrado no trabalho de Dalfré *et al.* (2021), os quais analisaram o comportamento mecânico de vigas de concreto armado não reforçadas mantidas ambiente laboratorial (protegidas do intemperismo) e de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer* – Polímero Reforçado com Fibras de Carbono) aplicadas segundo a técnica

EBR submetidas ao intemperismo e à ambiente laboratorial (protegidas). Os autores submeteram, ainda, corpos de prova concreto, resinas epoxídicas e CFRP aos mesmos ambientes de exposição das vigas. As vigas e corpos de prova submetidos ao intemperismo 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 (Universidade Federal de São Carlos), a qual é isenta de barreiras ou sombras que pudessem 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) (Dalfré *et al.*, 2021). Durante os ensaios, Dalfré *et al.* (2021) coletaram dados medidos pelo INMET, tais como temperatura, umidade relativa do ar, radiação UV e precipitação para os fins da pesquisa (Figura 3). A Figura 4 apresenta a câmara que caracteriza o ambiente laboratorial (Figura 4a), a estação meteorológica automática “São Carlos-A711” (Figura 4b), vigas e corpos de prova de concreto expostos ao intemperismo (Figura 4c) e corpos de prova de resinas epoxídicas e de FRP (Figura 4d).

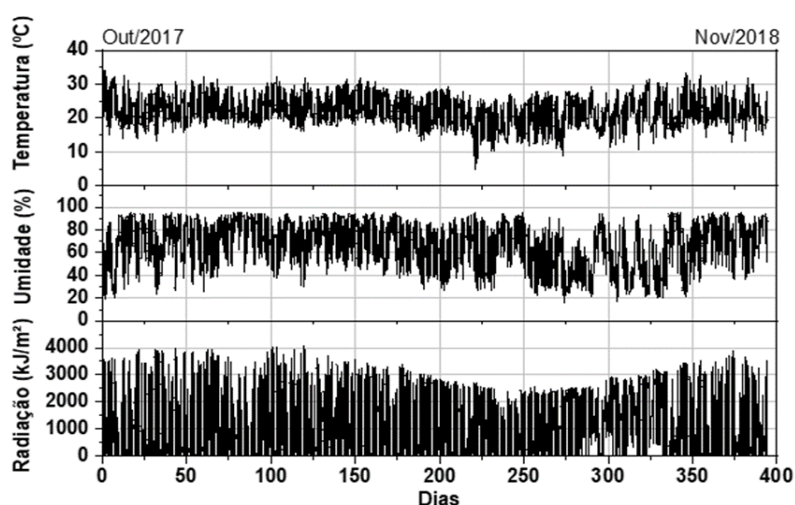


Figura 3. Dados meteorológicos para exposição às intempéries. Fonte: Dalfré *et al.*, 2021.

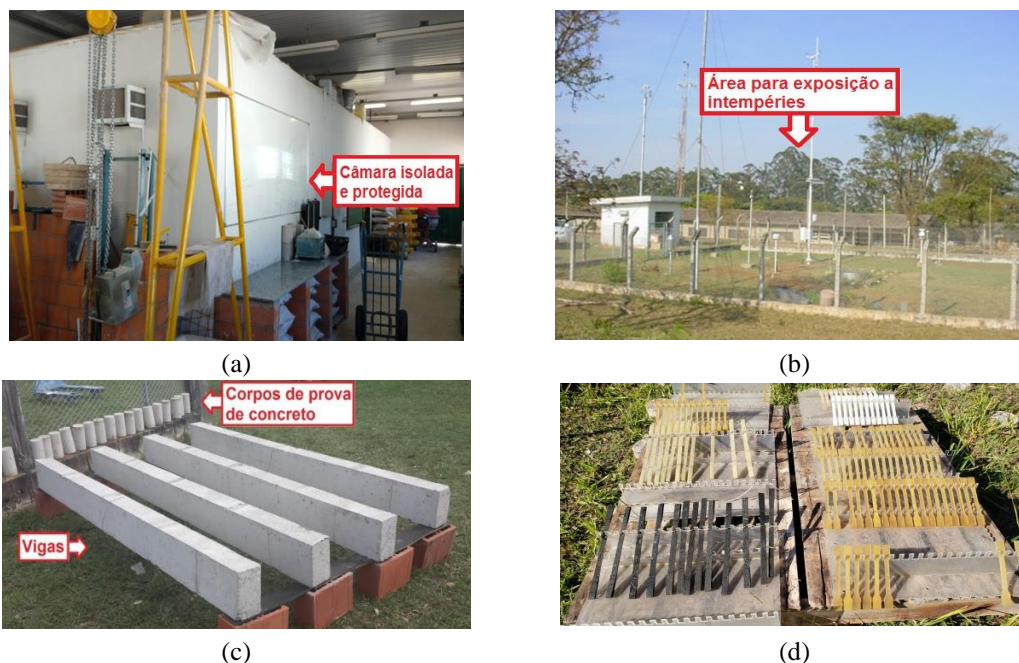


Figura 4. Ambiente protegido (a), estação meteorológica “São Carlos – A711” (b), vigas e corpos de prova de

concreto (c) e corpos de prova de resinas epoxídicas e CFRP (d). Fonte: Dalfré *et al.*, 2021.

Após o ensaio de flexão em três pontos de todas as vigas (reforçadas e não reforçadas), os resultados obtidos experimentalmente foram comparados entre si. A Figura 5 apresenta os resultados do ensaio de flexão em três pontos aos quais as vigas foram submetidas, sendo V1/V2_REF_0 correspondentes aos elementos de referência (não reforçados), V1/V2_REF_CFRP às vigas reforçadas de referência (mantidas em ambiente protegido) e V1/V2_WEA_CFRP às vigas reforçadas expostas ao intemperismo durante 6 meses. Assim, os autores observaram que as vigas não reforçadas mantidas em ambiente laboratorial apresentaram rigidez 6% inferior do que as vigas reforçadas, tanto as mantidas em ambiente laboratorial quanto expostas ao intemperismo. Além disso, observaram que a força média de início de escoamento da armadura longitudinal existente das vigas não reforçadas mantidas em ambiente laboratorial foi 12,6 % e 8,4% inferior em relação às vigas reforçadas mantidas em ambiente laboratorial e expostas às intempéries, respectivamente. Ainda, os autores notaram que a força máxima das vigas reforçadas reduziu em 10 % para os elementos expostos ao intemperismo, em relação aos mantidos em ambiente laboratorial.

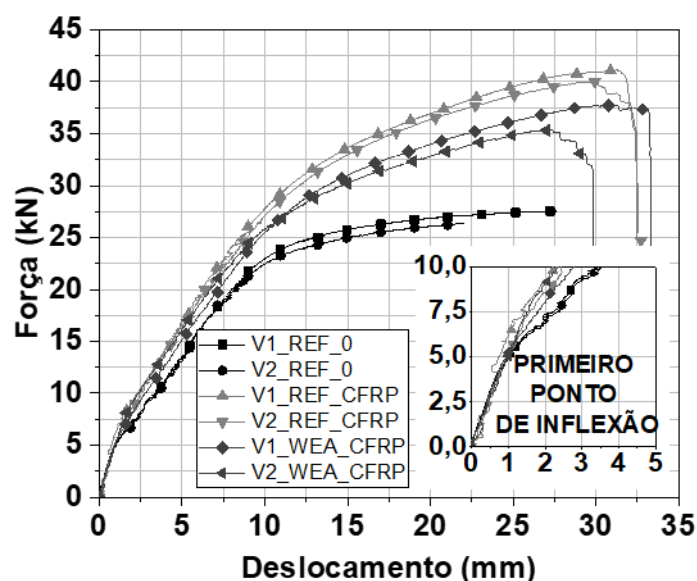


Figura 5. Resultados obtidos em ensaios de flexão em três pontos. Fonte: Dalfré *et al.*, 2021.

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, tornando 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) 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 devem ser realizados por um intervalo de tempo suficiente para induzir uma degradação relevante. Segundo o FIB *Bulletin* 40 (2007), nos ensaios acelerados o ambiente de exposição utilizado é mais agressivo do que os ambientes encontrados em serviço, e, desta forma, os resultados obtidos podem ser utilizados para a extrapolação do comportamento à longo prazo de um material, tal como o FRP.

Visando a extensão da vida útil de um sistema de reforço com FRP frente ao meio de exposição, podem ser aplicadas medidas de proteção que visem mitigar os efeitos da exposição sobre a capacidade resistente do elemento reforçado, tal como o apresentado na Figura 6.

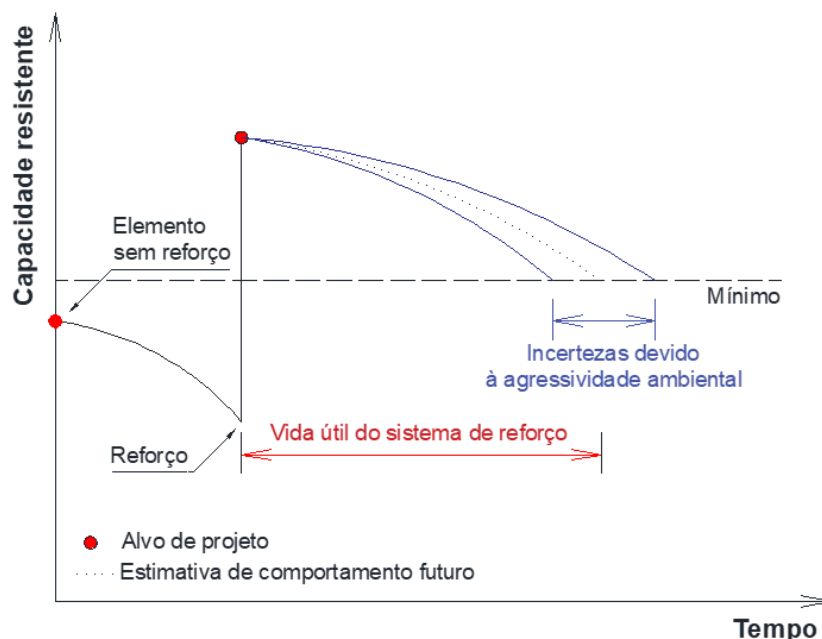


Figura 6. Diagrama da capacidade resistente ao longo do tempo para elementos reforçados. Fonte: Autores, 2022.

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

- Standart laboratory conditions: ambiente laboratorial de referência com temperatura e umidade relativa de 23 ± 3 °C e 50 ± 10 %, respectivamente;
- Continuous immersion in water: imersão contínua em água potável com temperatura controlada de 50 ± 3 °C;
- Continuous exposure to humidity: exposição contínua a umidade de 100% com temperatura controlada de 60 ± 3 °C; e
- Continuous immersion in alkaline solution: imersão contínua em solução alcalina com temperatura controlada de 50 ± 3 °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 presença de água potável ou solução alcalina, de acordo com o método de aceleração da degradação selecionado. A Figura 7 apresenta o esquema proposto pela norma ACI 440.9R (2015) para a realização do protocolo de degradação artificial acelerado em elementos reforçados com FRP segundo a técnica EBR.

O período de duração dos protocolos ACPs pode variar entre 1000h e 10000 h. Porém, a norma ACI 440.9R (2015) sugere um período intermediário de 3000 h 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 (ACI 440 9R, 2015).

Com relação à temperatura da água potável ou solução alcalina, a norma ACI 440.9R (2015) indica que esta deve ser mantida a 50 ± 3 °C. Entretanto, a forma de aquecimento e o tipo de monitoramento da temperatura do líquido não são especificados, podendo ser escolhida a metodologia que melhor atenda os objetivos da pesquisa.

Desta maneira, para garantir a condição de ensaio indicada pela norma ACI 440.9R (2015), foi desenvolvido 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 segundo a técnica EBR.

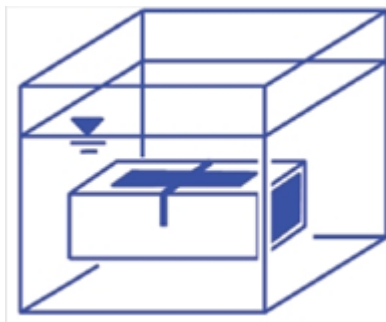


Figura 7. Arranjo de ensaio proposto para a degradação artificial acelerada. Fonte: ACI 440.9R, 2015.

2. Material e Métodos

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 (Silva *et al.*, 2014; Dalfré *et al.*, 2017). 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 apresentado no ACI 440.9R (2015) durante a realização dos ensaios de degradação artificial acelerada nas vigas de concreto, corpos de provas de resinas e CFRP 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 os requisitos da 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 8 e 9 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 10 é possível visualizar separadamente cada um dos componentes do sistema.

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 (Universidade Federal de São Carlos), onde foram posicionadas as vigas com e sem sistema de reforço com mantas de CFRP aplicadas segundo a técnica EBR, os corpos de prova de concreto, de resinas epoxídicas e de CFRP. 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 de temperatura necessário. Posteriormente, iniciou-se o ensaio e o líquido foi aquecido até que a água no tanque chegasse à temperatura indicada pelo protocolo ACI 440.9R (2015) para a realização de degradação artificialmente acelerada.

Depois disso, foi utilizado um termômetro digital para medir a temperatura da água em diferentes regiões do

tanque e uma câmera térmica da marca Flir (resolução de 4800 pixels) para obter a imagem termográfica do ensaio e, assim, conferir e validar as medições realizadas pelo sistema. A Figura 11 apresenta o tanque para ensaios de degradação acelerada com o aquecedor, as vigas de concreto com e sem sistema de reforço, os corpos de prova de concreto, de resinas epoxídicas e de CFRP.

Adicionalmente, vigas com e sem sistema de reforço, corpos de provas de concreto, de resinas epoxídicas e de CFRP 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 ABNT NBR 5739 (2018) e ABNT NBR 8522 (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 CFRP e de resinas epoxídicas, os quais foram ensaiados segundo as normas ISO 527-5 (2009) e ISO 527-1 (2012).

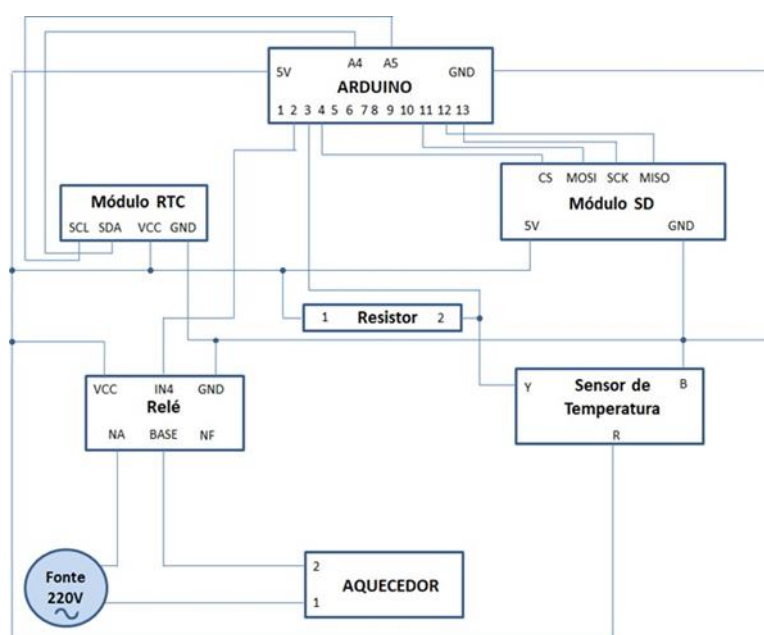


Figura 8. Esquema de ligação elétrica do sistema de controle e registro de temperatura da água. Fonte: Autores, 2022.

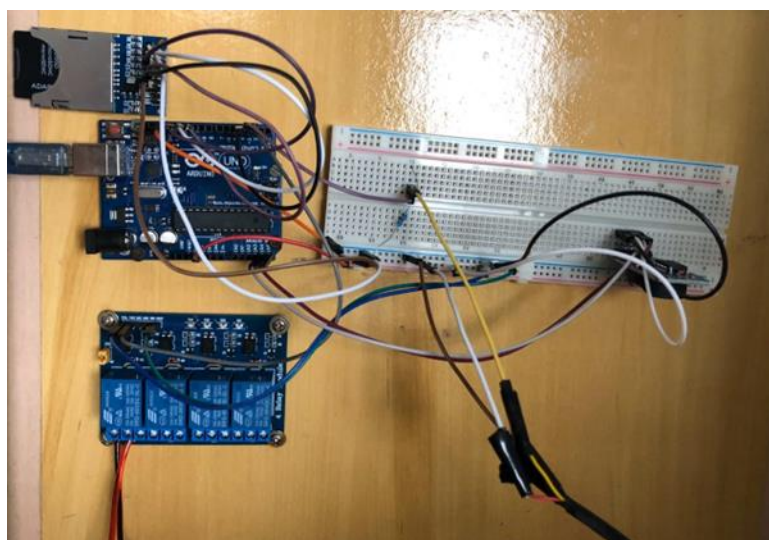


Figura 9. Montagem do hardware do sistema desenvolvido. Fonte: Autores, 2022.

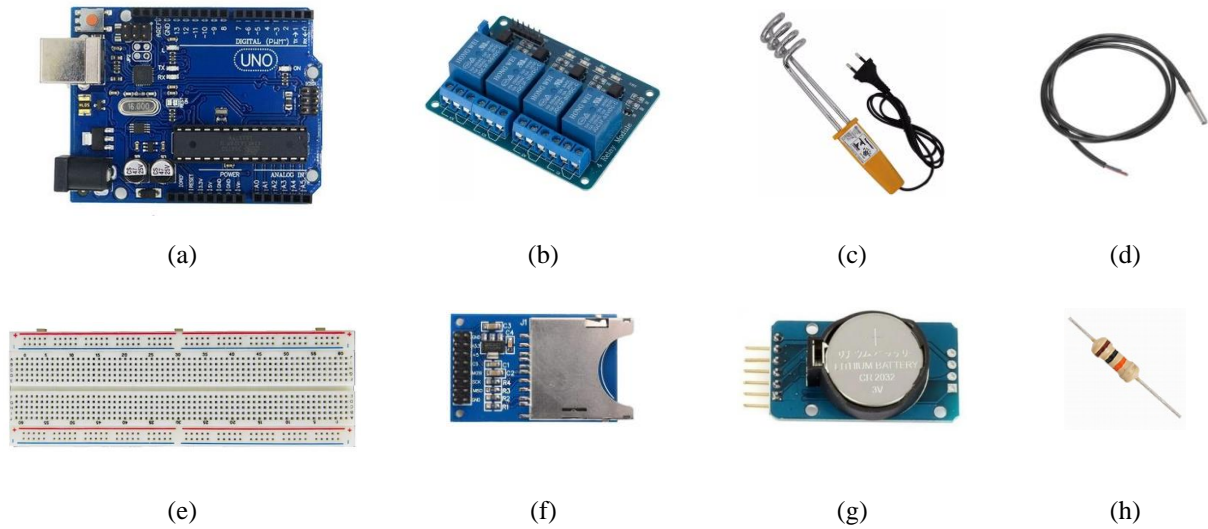


Figura 10. Arduino (a), Relé (b), Aquecedor (c), Sensor (d), Protoboard (e), Módulo SD (f), RTC (g) e Resistor (h). Fonte: Autores, 2022.



Figura 11. Tanque com vigas de concreto armado (a) e corpos de prova (b), vigas e corpos de prova durante o ensaio (c) e aquecedor em funcionamento (d). Fonte: Sarti Junior, 2020.

3. Resultados e Discussão

O sistema desenvolvido aqueceu a água no interior do tanque desde a temperatura ambiente de 26 °C, no início do ensaio, quando o líquido se encontrava em equilíbrio termodinâmico, até 50 °C em um intervalo de tempo de 485 minutos, conforme mostra a Figura 12. O tempo elevado para atingir a temperatura determinada pelo protocolo ACI 440.9R (2015) se deu pela alta inércia térmica do conjunto ensaiado.

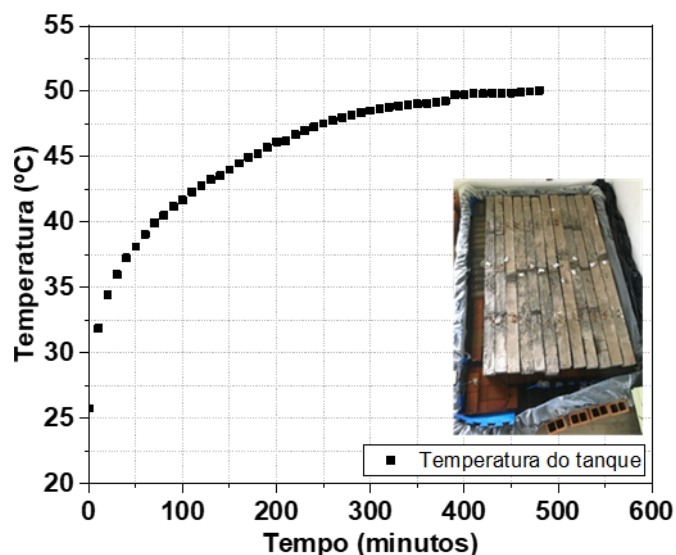


Figura 12. Resultados obtidos do tanque de degradação acelerada. Fonte: Autores, 2022.

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 13 mostra a medição da temperatura da água realizada com um termômetro digital em vários pontos do tanque de ensaios.



Figura 13. Medição da temperatura da água com termômetro digital em variados pontos do tanque. Fonte: Mazzú, 2020.

Por sua vez, a imagem termográfica, obtida com o uso de uma câmera 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 14.

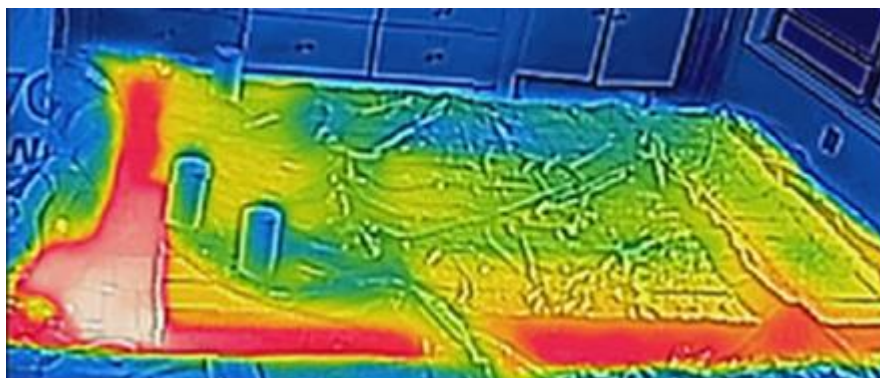


Figura 14. Imagem termográfica do tanque. Fonte: Mazzú, 2020.

Durante o período de 1000h de realização do ensaio, a temperatura da 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 15. 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 $50 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ao longo dos 42 dias de ensaio.

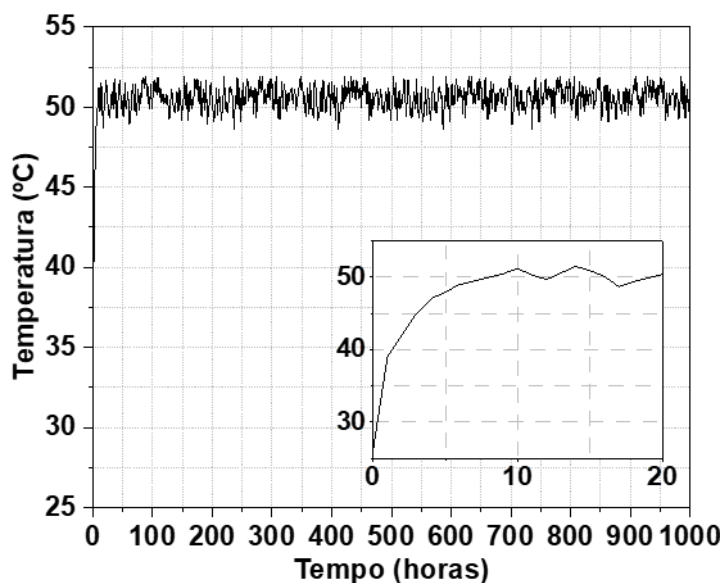


Figura 15. Temperatura da água aquecida medida pelo sistema durante ensaio de 1000h. Fonte: Autores, 2022.

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. Fonte: Adaptado de Sarti Junior, 2020.

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

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 ambiente laboratorial e em protocolo de acondicionamento acelerado. Fonte: Adaptado de Sarti Junior, 2020.

Ambiente/ Tempo de moldagem	Resina A						Resina B					
	Tensão máxima			Módulo de elasticidade			Tensão máxima			Módulo de 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.

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 (1000h) após a moldagem. Entretanto, as resinas expostas ao protocolo de degradação artificial acelerada de 1000h 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 1000h, 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 1000h.

No que se refere aos resultados médios obtidos por meio dos ensaios mecânicos de tração uniaxial nos corpos de prova de CFRP, expostos a ambiente laboratorial fora do tanque ou à degradação artificial acelerada e ensaiados após o período de 1000h, 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.

Ao término do período de 42 dias, as vigas de concreto com reforço de CFRP 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 CFRP mantidas por 1000h 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 Dalfré *et al.* (2021) em seu estudo experimental de vigas semelhantes

com reforço de CFRP. Neste trabalho os autores expuseram 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.

Tabela 3. Principais resultados para as amostras de CFRP expostas aos ambientes laboratorial e degradação acelerada. Fonte: Adaptado de Sarti Junior, 2020.

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.

A Figura 16a 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 CFRP, tempo determinado pelo fabricante da resina para a cura.

Já na Figura 16b é possível observar os resultados obtidos no estudo experimental realizado por Dalfré *et al.* (2021), onde WEA_CFRP refere-se a vigas com reforço de CFRP expostas ao intemperismo e ACP_CFRP_1000h são as submetidas ao ensaio de degradação acelerada seguindo o protocolo da norma ACI 440.9R (2015).

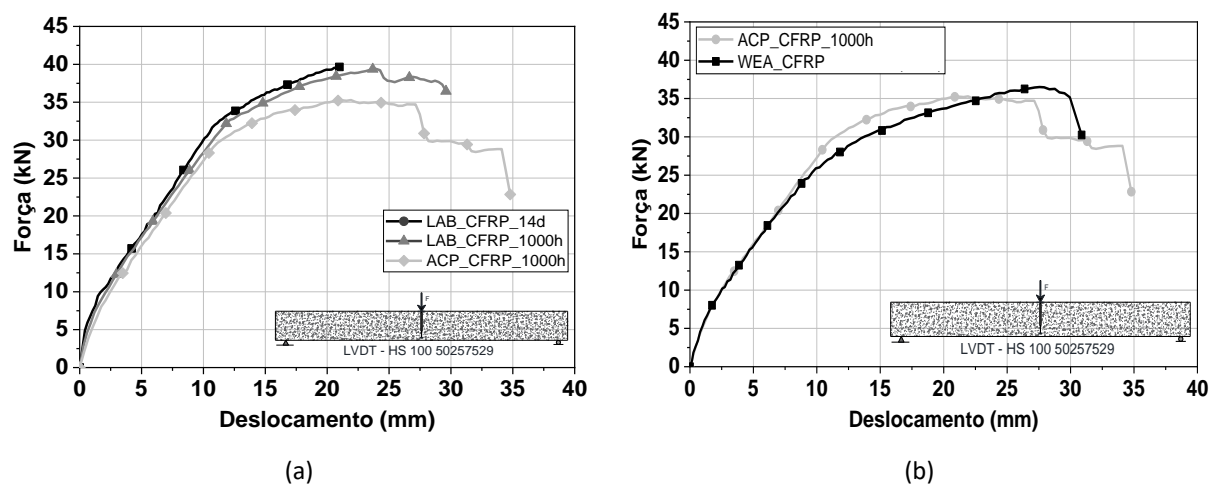


Figura 16. Diagrama de Força versus Deslocamento em vigas mantidas em ambiente protegido, submetidas à protocolo de degradação acelerada e de referência (a) e expostas ao intemperismo e submetidas ao ensaio normalizado de degradação acelerada (b). Fonte: Sarti Junior, 2020.

4. 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 (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 de CFRP 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 aos 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 (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 1000h do protocolo de acondicionamento recomendado pela norma ACI 440.9R (2015) corresponde a um período de degradação natural do sistema de reforço, devido à ação do intemperismo de, aproximadamente, 6 meses.

5. Referências

- American Concrete Institute. (2015). ACI COMMITTEE 440.9R. *Guide to Accelerated Conditioning Protocols for Durability Assessment of Internal and External Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement*. American Concrete Institute, ACI Committee 440.
- American Concrete Institute. (2017). ACI COMMITTEE 440.2R. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute, ACI Committee 440.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). NBR 5739: *Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). NBR 8522: *Concreto – Determinação dos módulos elásticos de elasticidade e de deformação à compressão*. Rio de Janeiro.
- Dalfré, G. M.; Escobal, A. D.; Tarallo, A. S.; Silva, T. G. C. & Ribeiro, R. O. (2017). *A plataforma open-source Arduino e suas aplicações na engenharia civil para monitoramento de temperatura e umidade*. Anais: XLV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE). Joinville, SC.
- Dalfré, G. M.; Sarti Junior, L. A.; Oliveira, M.; Araújo, C.; Mazzú, A. & Parsekian, G. (2019). *Avaliação de ingresso de CO₂ em vigas de concreto reforçadas segundo a técnica EBR*. Anais: 2º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos (TECSIC). São Paulo, SP.
- Dalfré, G. M.; Sarti Junior, L. A.; Oliveira, M. C. & Araújo, C. J. R. V. (2020). Avaliação do comportamento de resinas epoxídicas submetidas a ciclos de umidade. *Brazilian Applied Science Review*. 4(1), 1-13.
- Dalfré, G. M.; Parsekian, G. A. & Ferreira, D. C. (2021). Degradation of the EBR-CFRP strengthening system applied to reinforced concrete beams exposed to weathering. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*.

12(2). DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000200008>.

- Dalfré, G. M. & Parsekian, G. A. (2022). *Introdução*. In: Dalfré, G. M. *Polímeros Reforçados com Fibras na Construção Civil: Dimensionamento de sistemas de reforço e armaduras não metálicas à flexão e ao cisalhamento segundo normas ACI*. São Carlos: EdUFSCar.
- Dalfré, G. M.; Mazzú, A. D. E.; Sarti Junior, L. A.; Posterli, M. C.; Oliveira, M. C.; Ferreira, D. C.; Pinto, C. P. & Goulart, F. (2022). *Durabilidade dos materiais compósitos*. In: Dalfré, G. M. *Polímeros Reforçados com Fibras na Construção Civil: Dimensionamento de sistemas de reforço e armaduras não metálicas à flexão e ao cisalhamento segundo normas ACI*. São Carlos: EdUFSCar.
- De Paoli, M. A. (2008). *Degradação e estabilização de polímeros*. 2ª versão online: Editora Chemkeys.
- Fédération Internationale du Béton. (2007). *Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures*. FIB, Lausanne.
- International Organization for Standardization. (2012). ISO 527-1. *Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles*. International Organization for Standardization (ISO), Genève, Switzerland.
- International Organization for Standardization. (2009). ISO 527-5. *Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.
- ISIS. (2006). *Durability of FRP Composites for Construction: Educational Module no.8*. The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, ISIS Canada Corporation, Manitoba, Canada.
- John, V. M. & Sato, N. M. N. (2006). *Durabilidade dos componentes da construção*. Porto Alegre: ANTAC.
- Machado, A. P. & Machado, B.A. (2015). *Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP*. Editora Pini.
- Mazzú, A. D. E. (2020). *Estudo sobre a substituição de armadura metálica por barras de GFRP em vigas de concreto armadas à flexão*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- Sarti Junior, L. A. (2020). *Durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP submetidas a degradação acelerada*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- Silva, S. C. B. (2014). *Estudo da degradação acelerada de argamassa em um sistema de revestimento cerâmico de fachada*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC.
- Silva, J. L. S; Melo, M.C.; Camilo, R. S.; Galindo, A. L. & Viana, E. C. (2014). *Plataforma Arduino integrado ao PLX-DAQ: Análise e aprimoramento de sensores com ênfase no LM35*. Anais: XIV Escola Regional de Computação Bahia Alagoas e Sergipe (ERBASE) in SBC – Proceedings of SBGames.

Copyrights

Copyright for this article is retained by the author(s), with first publication rights granted to the journal.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).