

DEGRADAÇÃO ARTIFICIALMENTE ACELERADA DE RESINAS EPOXÍDICAS UTILIZADAS EM SISTEMA DE REFORÇO COM FRPS

DALFRÉ, Gláucia (1)

(1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), glaucia.dalfre@ufscar.br

RESUMO: *Atualmente, técnicas de reforço baseadas no uso de polímeros reforçados, ou estruturados, com fibras (PRFs ou FRPs, em língua inglesa) tem sido utilizadas. Entretanto, o comportamento a longo prazo dos sistemas de reforço com FRPs, não protegidos, é pouco conhecido. Neste sentido, o presente trabalho apresenta o resultado obtido na avaliação de resinas utilizadas no sistema de reforço quando expostas ao protocolo de acondicionamento acelerado proposto pela norma americana ACI 440.9R (ACI, 2015) após exposição por um período de 1000h. Os resultados demonstraram que os adesivos epoxídicos apresentam alterações significativas de suas propriedades mecânicas.*

Palavras-chave: *Degradação, resinas epoxídicas, protocolo de degradação acelerado.*

Área do Conhecimento: *Qualidade e desempenho de produtos e sistemas construtivos*

1 INTRODUÇÃO

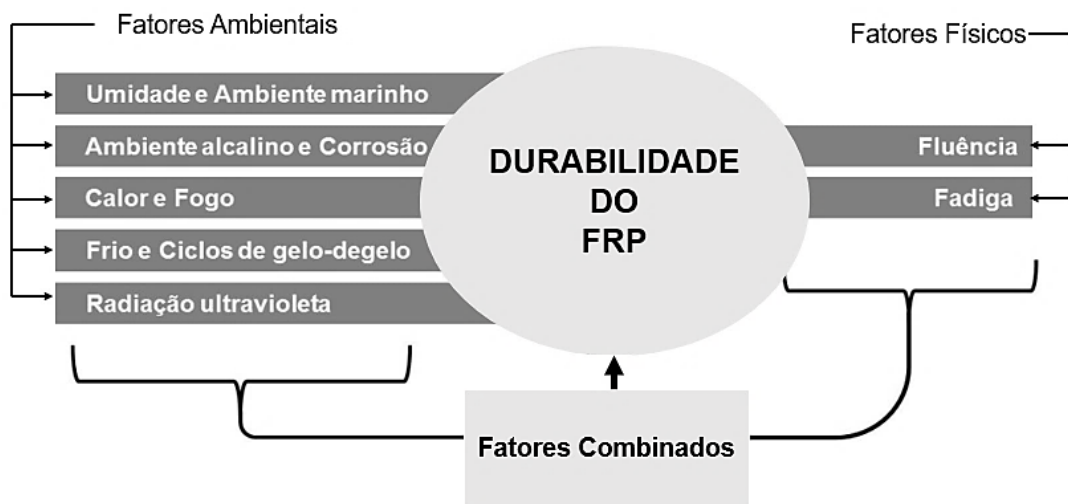
Nos últimos anos, questões voltadas ao reparo e reforço de elementos estruturais estão cada vez mais comuns e diversas pesquisas têm sido realizadas para o desenvolvimento de novas tecnologias visando o incremento de carga de elementos de concreto armado já existentes. Nesse sentido, diversos sistemas podem ser utilizados, tais como o baseado no aumento da seção transversal (encamisamento) com concreto armado, perfis metálicos ou chapas de aço externamente coladas ao concreto, protensão, aço-memória, e com o uso de polímeros reforçados, ou estruturados, com fibras (PRFs ou FRPs, *Fiber Reinforced Polymers*). Algumas destas tecnologias baseiam-se no uso de resinas epoxídicas para colagem do material de reforço no substrato de concreto. Neste contexto citam-se, por exemplo, a 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*). 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. A seguir apresenta-se um breve resumo sobre ensaios de envelhecimento ambiental ou artificialmente acelerados que podem induzir a degradação dos materiais e elementos.

Segundo a ACI 440.2R (2017), os elementos em FRP podem apresentar reduções significativas quando expostos a alguns fatores ambientais, tais como alta temperatura, umidade e produtos químicos. Além disso, fatores como tempo de exposição, tipo de resina e modelo das fibras podem contribuir para ampliação da degradação do sistema, acarretando na redução das propriedades mecânicas dos materiais.

Além dos fatores ambientais, existem também os fatores físicos relacionados principalmente com a degradação das estruturas quando expostas a um longo período. Segundo Ferreira (2019) esses fatores podem atuar de maneira isolada, como também, de forma combinada, acentuando o processo de degradação, assim como apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Fatores de degradação dos materiais em FRP



Fonte: adaptado de ISIS (2006)

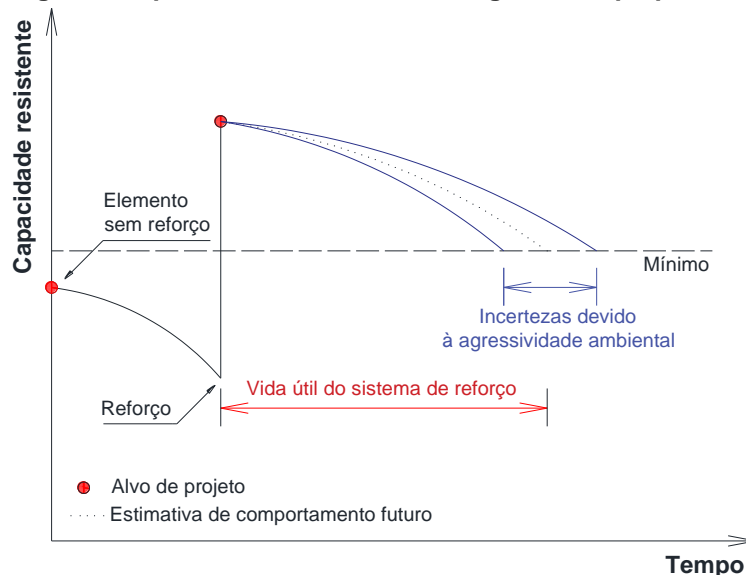
O envelhecimento ambiental deve simular as condições reais de uso do material por meio de ensaios que o expõem ao intemperismo. Este tipo de ensaio possui custo elevado, pois geralmente é de longa duração, e é realizado em estações ambientais localizadas em regiões geográficas com diferentes condições 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 natural pode ser encontrado em Ferreira (2019).

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).

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 ocorrer por um intervalo de tempo suficiente para induzir uma degradação relevante. E, a partir desta informação, obtém-se um melhor entendimento dos materiais e, neste caso, de elementos reforçados ao longo do tempo e podem-se ser sugeridas medidas protetivas visando a extensão da vida útil do material frente ao meio de exposição, tal como o apresentado na Figura 2.

Neste sentido, o foco principal desta pesquisa é a análise da degradação do material utilizado no sistema de reforço mais suscetível a agressividade ambiental, neste caso, das resinas epoxidicas, quando expostas a um protocolo de degradação acelerado.

Figura 2 – Diagrama capacidade resistente ao longo do tempo para elementos reforçados



Fonte: Próprio autor

2 METODOLOGIA

Encontra-se em andamento um programa experimental iniciado no ano de 2019 por Sarti Júnior (2020), o qual estuda o comportamento de vigas, resinas epoxídicas e compósitos de CFRP expostos ao protocolo de acondicionamento apresentado pela 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 $23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ e $50\% \pm 10\%$, respectivamente;
- *Continuous immersion in water*: imersão contínua em água potável com temperatura controlada de $50\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$;
- *Continuous exposure to humidity*: exposição contínua a umidade de 100% com temperatura controlada de $60\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$; e
- *Continuous immersion in alkaline solution*: imersão contínua em solução alcalina com temperatura controlada de $50\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$.

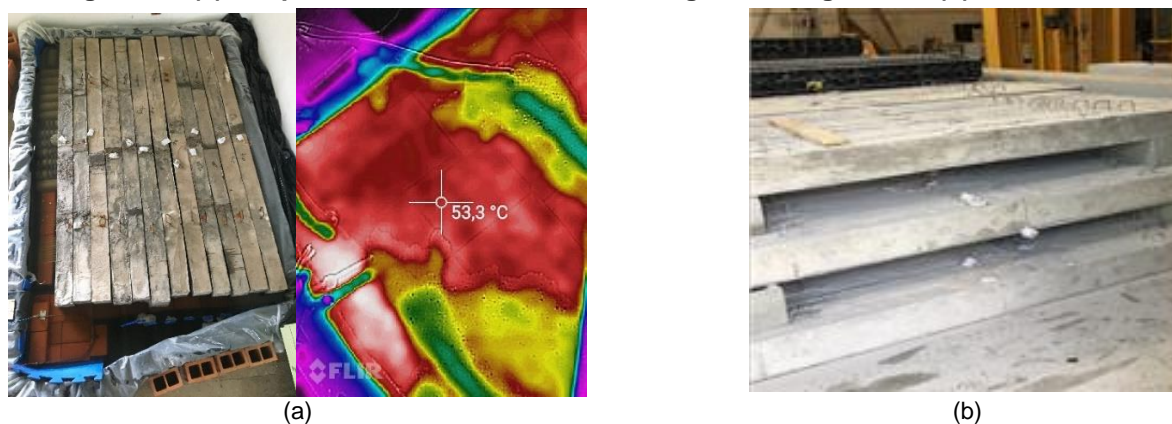
Após o período de cura das resinas epoxídicas, os elementos reforçados e os materiais de reforço devem ser inseridos em um tanque com imersão em água potável, solução alcalina ou umidade constante. Com relação a duração, a norma ACI 440.9R (ACI, 2015) recomenda que os ensaios sejam realizados em um intervalo de 2 a 5 horas após o término do período de exposição compreendido entre 1000 e 10000 horas,.

Neste âmbito, este trabalho apresentará os resultados obtidos em ensaios artificialmente acelerados de resinas epoxídicas utilizadas em sistema de reforço EBR. Utilizando a mesma metodologia proposta por Escobal (2017), oitenta corpos de prova (CP) de resinas epoxídicas do tipo A e B foram confeccionadas para serem ensaiadas nas idades de 7 e 14 dias (considerando como sendo cura completa), 1000h (42 dias), 5000 horas (208 dias) e 10000 horas (416 dias). Assim, após o período total de cura, os CPs de resinas foram mantidos em ambiente laboratorial ou inseridos no tanque de acondicionamento. Note-se que neste trabalho serão apresentados os resultados obtidos nas idades de 7 e 14 dias (cura completa) e 1000h (42 dias) após exposição ao protocolo de acondicionamento.

Segundo Sarti Júnior (2020), o ambiente adotado como laboratorial é o NETPRE (Núcleo de Estudo e

Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), o qual é coberto e protegido das intempéries. Para o ACP, tanques de alvenaria foram construídos para a imersão dos materiais utilizados no sistema de reforço e de vigas reforçadas em água potável, obtida da rede pública de abastecimento, a qual foi mantida com temperatura constante de $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. A Figura 3 apresenta o tanque com umidade constante e temperatura controlada (ACP) e o ambiente laboratorial (interno e protegido).

Figura 3 – (a) tanque de umidade constante e imagem termográfica e (b) ambiente laboratorial



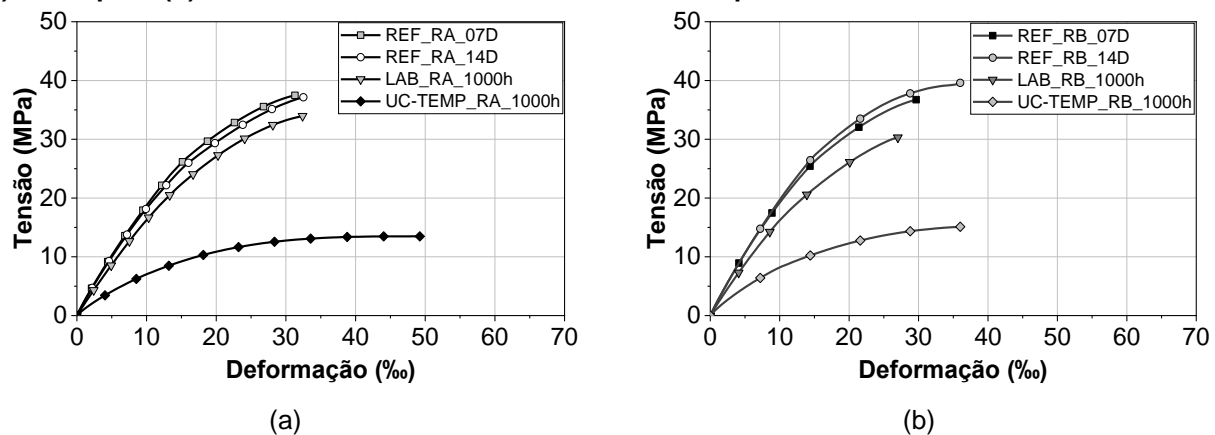
Fonte: Sarti Júnior (2020)

Os ensaios de caracterização das resinas epoxídicas foram realizados no Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar segundo as recomendações das normas ISO 527-1 (2012) e ISO 527-5 (2012). Para isso utilizou-se a máquina de ensaios universal da marca Instron, modelo 5569, com velocidade de aplicação de carga de 2 mm/min. A geometria, dimensões dos corpos de prova e ensaio seguiram as recomendações da norma ISO 527-2 (2012). Maiores informações sobre a caracterização dos adesivos e resultados experimentais também podem ser encontradas nos trabalhos de Escobal (2017), Ferreira (2019) e Sarti Júnior (2020). A nomenclatura utilizada para indicar os ensaios é x_y_z , onde x indica o ambiente de exposição (REF para referência, LAB para os CPs mantidos em ambiente protegido e UC para os CPs mantidos nos tanques de acondicionamento), y indica o tipo de resina avaliada (A ou B) e z indica a idade de realização dos ensaios (7 e 14 dias para os CPs de referência ou após 42 dias (1000h) de exposição à ACP ou mantido em ambiente protegido).

3 RESULTADOS

O comportamento das resinas epoxídicas do tipo *primer* e de saturação, aqui denominadas por A e B, respectivamente, mantidas em ambiente laboratorial ou expostas ao protocolo de degradação acelerada, foram avaliados por meio de ensaios de tração uniaxial realizados nas idades de 7, 14 e 42 dias (1000 h). Na Figura 3 apresentam-se os diagramas com as curvas médias de tensão *versus* deformação para os CPs de resinas do tipo A (Figura 4a) e do tipo B (Figura 4b), os quais foram obtidos por meio dos ensaios mecânicos de tração uniaxial nas as amostras de resinas epoxídicas expostas à degradação acelerada.

Figura 4 – Diagrama com as curvas médias de tensão *versus* deformação para as resinas do tipo A (a) e do tipo B (b) mantidas em ambientes laboratorial e em protocolo de acondicionamento acelerado



Fonte: Sarti Júnior (2020)

Segundo Sarti Júnior (2020), a resina A (*primer*) mantida em laboratório apresentou módulos de elasticidade e tensão máximas similares para as idades de referência (7 e 14 dias) e 42 dias. Entretanto, as resinas expostas ao protocolo de degradação acelerado 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 as resinas mantidas em ambiente laboratorial e ensaiada com idade de 42 dias. Quando exposta ao protocolo acelerado, 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. Tais resultados corroboram os obtidos por Yang, Xian e Karbhari (2008), Frigione (2015) e Escobal (2017), os quais indicam redução da resistência e rigidez devido a incidência de umidade e temperatura sobre a matriz polimérica.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta os resultados de um programa experimental em andamento que visa avaliar o comportamento a longo prazo de sistemas de reforço EBR-CFRP. Para isso, dois ambientes de exposição foram adotados nesta pesquisa: laboratorial, o qual serviu de referência para as demais análises, e tanque de imersão do sistema de reforço baseado no protocolo de acondicionamento, recomendado pela norma ACI 440.9R (ACI, 2015), visando a possível degradação dos FRPs.

Com relação a resina A (*primer*) mantida em laboratório, esta apresentou módulos de elasticidade e tensão máximas similares para as idades de 14 dias e 42 dias. Entretanto, as resinas 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 acondicionamento, 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.

Deste modo, verifica-se que o protocolo de acondicionamento apresentado pela norma ACI 440.9R (ACI, 2015) pode ser utilizado para verificação da possível degradação e estimativa do comportamento de materiais utilizados em sistema de reforço. Entretanto, a correlação dos resultados obtidos no protocolo artificialmente acelerado ainda será realizada com resultados de outras pesquisas em andamento, tais como em exposição ao intemperismo natural de elementos reforçados sem proteção.

5 REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **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, 116p., 2017.

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

DE PAOLI, M.A. **Degradação e estabilização de polímeros**. Editora Chemkeys, 2ª versão online, 2008.

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

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

FRIGIONE, M. Fiber Reinforced Polymers in Civil Engineering: Durability Issues. **Advanced Materials Research**, vol. 1129, pp 283-289, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-1**. Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles. International Organization for Standardization (ISO), Genève, Switzerland, 9 p., 2012.

_____. **ISO 527-2**. Plastics - Determination of Tensile Properties - Part 2: Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 2012.

_____. **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, 2012.

SARTI JÚNIOR, L. A. **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, 2020.

SILVA, S. C. B. **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, 2014.

YANG, Q.; XIAN, G.; KARBHARI, V. M. **Hygrothermal ageing of an epoxy adhesive used in FRP strengthening of concrete**. Journal of Applied Polymer Science, v.107, n.4, p. 2607-2617, 2008.