

Estudo do comportamento de resinas epoxídicas utilizadas em sistemas de reforço quando expostas ao protocolo de degradação acelerado proposto pela norma ACI 440.9R (2015)

Study of the behavior of epoxy resins used in strengthening systems when exposed to the accelerated degradation protocol proposed by ACI 440.9R (2015)

Gláucia Maria Dalfré 
Luiz Antônio Sarti Júnior 
Ciro José Ribeiro Vilella Araújo 

Resumo

Atualmente, como alternativa de reforço de elementos de concreto armado, técnicas baseadas no uso de materiais compósitos, tal como a EBR (*Externally Bonded Reinforcement*, na língua inglesa), aplicada diretamente no substrato de concreto do elemento a ser reforçado com o uso de resinas epoxídicas, têm sido utilizadas. Embora os FRP (*Fiber Reinforced Polymers*) sejam muito utilizados, o comportamento a longo prazo dos sistemas de reforço ainda é pouco conhecido. Nesse âmbito, o presente trabalho utiliza o protocolo de condicionamento acelerado proposto pelo código americano ACI 440.9R (2015) para avaliação do comportamento de resinas epoxídicas comumente utilizadas em sistemas de reforço com FRP. Assim, corpos de prova de resina do tipo *primer* e de saturação foram produzidos e expostos a dois ambientes distintos recomendados pelo ACI 440.9R (2015), laboratorial e degradação acelerado, e ensaiados após um período de 1.000 horas. Os resultados obtidos demonstraram que os adesivos epoxídicos mantidos em laboratório não apresentam reduções estatisticamente distintas de seu módulo de elasticidade e tensão máxima. Entretanto, as resinas expostas ao protocolo de degradação acelerado demonstraram reduções de até 63% do módulo de elasticidade e de até 69% da tensão máxima.

Palavras-chave: Resinas epoxídicas. Degradação. Técnica EBR. Ensaio acelerado.

Abstract

As an alternative to strengthen reinforced concrete elements, techniques based on the use of composite materials formed by combining continuous fibers and bi-component resins have been used. Among the strengthening techniques, the Externally Bonded Reinforcement (EBR), directly applied to the concrete substrate of the element to be strengthened with epoxy resins, is one of the most used. Although FRP is widely used, the long-term behavior of the strengthening systems is unknown. Thus, the present work uses the accelerated conditioning protocol proposed by ACI 440.9R (2015) to evaluate the behavior of standard epoxy resins used in strengthening systems with FRP. Thus, primer and saturation resin specimens were exposed to two different environments recommended by ACI 440.9R (2015), laboratory and accelerated degradation, and tested after 1000 hours. The results showed that the epoxy adhesives maintained in the laboratory do not present reductions in their modulus of elasticity and maximum tensile stress. However, the resins exposed to the accelerated degradation protocol demonstrated reductions of up to 63% in the modulus of elasticity and up to 69% in the ultimate tensile stress.

Keywords: Epoxy resins. Degradation. EBR strengthening technique. Accelerated degradation.

¹Gláucia Maria Dalfré
¹Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

²Luiz Antônio Sarti Júnior
²Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

³Ciro José Ribeiro Vilella Araújo
³Instituto de Pesquisas Tecnológicas
São Paulo - SP - Brasil

Recebido em 16/11/22
Aceito em 23/02/23

Introdução

De acordo com Fernandes (2016) e Rezazadeh, Barros e Ramezansfat (2016), estruturas de concreto armado, aço ou madeira têm sido cada vez mais reforçadas com técnicas que empregam os materiais compósitos. Tal afirmação se justifica pelo fato dos polímeros reforçados, ou estruturados, com fibras (*FRP, Fiber Reinforced Polymers*) possuírem excelentes propriedades mecânicas, com destaque maior para alta resistência, módulo de elasticidade e, principalmente, a elevada resistência a corrosão (FÉDÉRATION..., 2019).

Atualmente, a principal técnica de reforço com FRP é conhecida na literatura internacional por EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) ou, mais recentemente, por SBR (*Surface Bonded Reinforcement*), e consiste na colagem externa de mantas ou laminados na superfície do elemento a ser reforçado (Figura 1).

Embora as propriedades e vantagens do reforço utilizando FRP sejam bem conhecidas, este permanece desprotegido e susceptível às ações ambientais que podem atuar, individualmente ou em sinergia, na degradação dos compósitos.

Mecanismos de degradação de FRP

As resinas geralmente utilizadas em sistemas de reforço com FRP são as do tipo termoendurecíveis podendo ser apresentadas como poliéster, vinila ou epóxi. Dentre estas, a mais utilizada na aplicação em reforço de estruturas são as resinas epoxídicas devido às suas excelentes propriedades adesivas, baixa retração, alta resistência e módulo de elasticidade. A durabilidade das resinas, bem como a integridade da ligação ao substrato de concreto frente ao processo de envelhecimento a longo prazo, é pouco conhecida. Porém, sabe-se que existe uma potencialização de degradação que pode ser causada por efeitos ambientais tal como os apresentados na Figura 2 (INTELLIGENT..., 2006; ZHAO *et al.*, 2017; POSTERLLI; CARRAZEDO; DALFRÉ, 2018).

Umidade

Segundo ISIS (INTELLIGENT..., 2006), os materiais poliméricos tendem a sofrer amolecimento de sua matriz quando expostos à umidade, levando à redução de sua capacidade resistente, deformação última e módulo de elasticidade.

Figura 1 - Técnica SBR/EBR



Figura 2 - Fatores que afetam a durabilidade dos FRP (INTELLIGENT..., 2006)



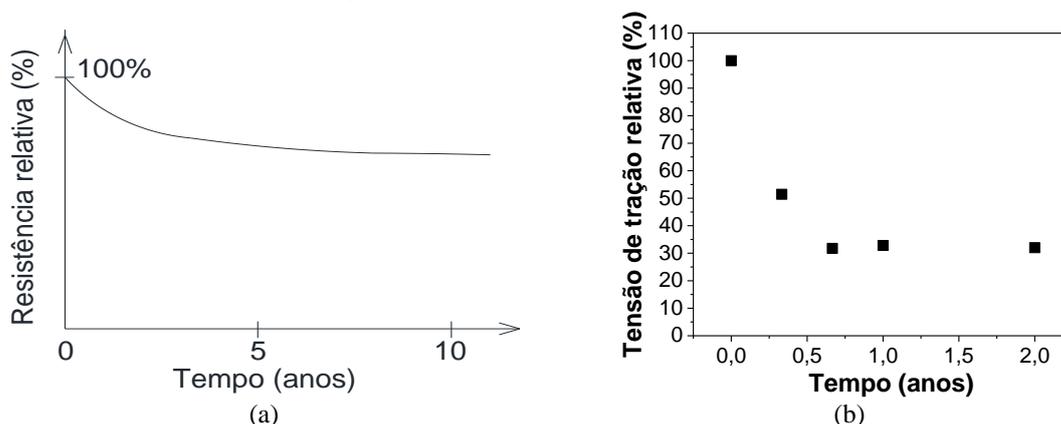
A Figura 3a ilustra um diagrama genérico da evolução da perda de resistência em função do tempo em polímeros submetidos a condições de absorção de umidade.

Escobal (2017), Ferreira (2019) e Sarti Júnior (2020) realizaram ensaios em dois tipos de resinas epoxídicas (*primer* e saturação), identificadas em seu trabalho como A e B, respectivamente, imersas em água com temperatura constante (23 °C) para as idades de 7 e 14 dias (idade considerada como sendo referência para os demais ensaios) e 4, 8, 12 e 24 meses. A Figura 3b apresenta a evolução da resistência à tração da resina B ao longo dos 24 meses. Verifica-se, para o trabalho realizado, redução média de até 68% após 2 anos de exposição à umidade constante.

A Figura 4a ilustra um diagrama genérico de ganho de massa em função do tempo para materiais poliméricos expostos à umidade. Tal comportamento também foi verificado nos ensaios realizados por Escobal (2017), tal como apresentado na Figura 4b.

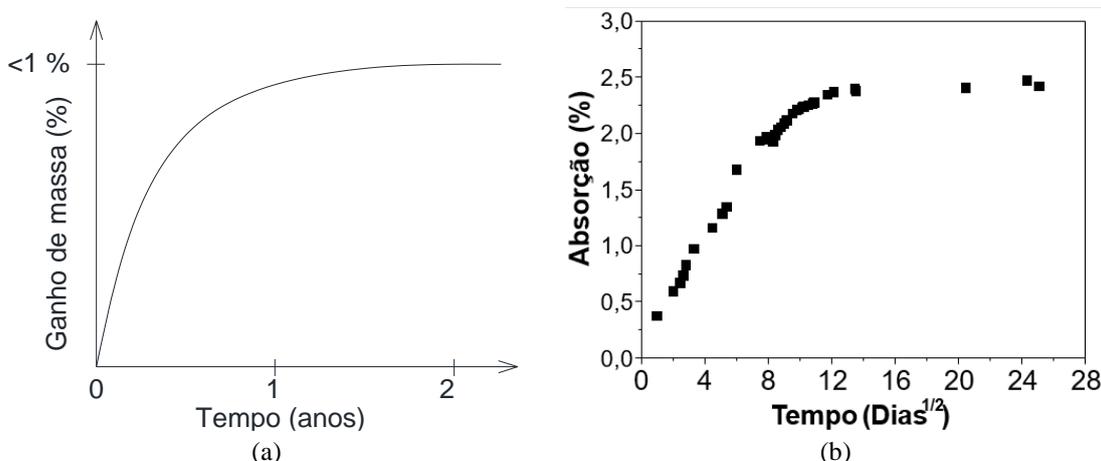
Para Juvandes (1999), quase todos os adesivos são suscetíveis à absorção de água, levando a um processo de amolecimento da matriz e ao aumento de volume, influenciando nas propriedades mecânicas e reduzindo a temperatura de transição vítrea (T_g), a qual pode ser definida como sendo a temperatura acima da qual as propriedades mecânicas do polímero mudam de um sólido rígido e frágil para as de um plástico fluido e viscoso. Segundo Ghorbel e Valentim (1994)¹ *apud* Posterli, Carrazedo e Dalfré (2018), no caso de exposição à umidade por um longo período, pode ocorrer a hidrólise, que pode ser definida como um ataque às ligações químicas da resina, modificando irreversivelmente sua estrutura química e reduzindo a sua T_g .

Figura 3 - Perda de resistência de polímeros expostos à umidade em função do tempo



Fonte: (a) adaptado de ISIS (INTELLIGENT..., 2006); e (b) Escobal (2017), Ferreira (2019) e Sarti Júnior (2020).

Figura 4 - Ganho de massa em polímeros submetidos à umidade



Fonte: (a) adaptado de ISIS (INTELLIGENT..., 2006); e (b) Escobal (2017).

¹GHORBEL, I.; VALENTIN, D. Hydrothermal effects on the physico-chemical properties of pure and glass fiber reinforced polyester and vinylester resins. *Polymer Composites*, v. 14, n. 4, p. 324-334, 1994.

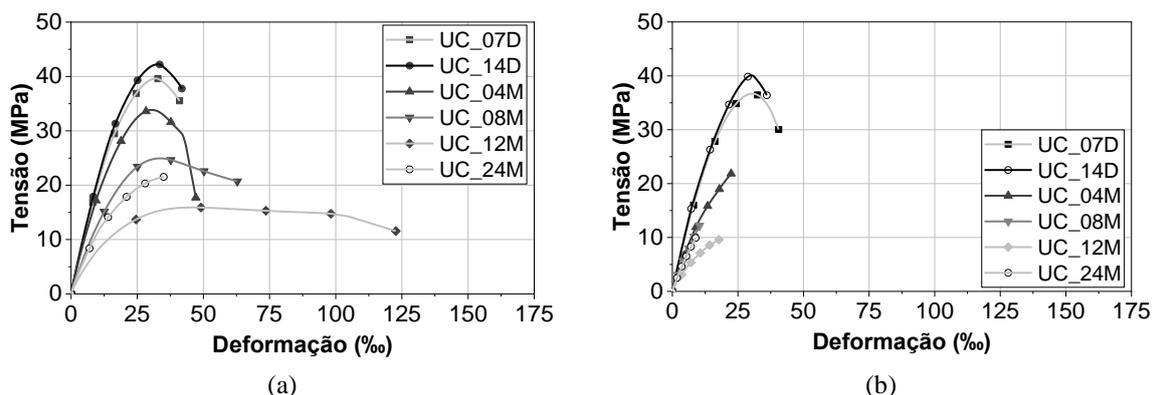
Nesse âmbito, Lin e Chen (2005) realizaram testes com resinas epoxídicas para analisar os efeitos da umidade, secagem e reabsorção de água frente ao comportamento mecânico dessas resinas. Os autores concluíram que o coeficiente de difusão da umidade da resina epoxídica é independente da espessura da amostra, ou seja, o processo de secagem e reabsorção ocorreu mais rapidamente do que a absorção de água e que o módulo de elasticidade e a resistência à tração do adesivo diminuíram. A umidade absorvida pelas resinas epoxídicas pode alterar os mecanismos de ruptura do material passando de frágil para dúctil nas amostras não saturadas e de dúctil para frágil nas amostras saturadas.

Em sua pesquisa, Fernandes (2016) concluiu que as resinas epoxídicas submetidas às diferentes condições ambientais apresentam reduções nos valores da temperatura de transição vítrea em torno de 21% em amostras mantidas em água com cloretos.

Escobal (2017), Ferreira (2019) e Sarti Júnior (2020) realizaram ensaios em dois tipos de resinas epoxídicas (primer e saturação), identificadas em seu trabalho como A e B, respectivamente, imersas em água com temperatura constante (23 °C) para as idades de 7 e 14 dias (idade considerada como sendo referência para os demais ensaios) e 4, 8, 12 e 24 meses. A Figura 5 apresenta os diagramas tensão *versus* deformação obtidos por meio dos ensaios mecânicos de tração uniaxial, enquanto a Tabela 1 apresenta um resumo dos principais resultados obtidos.

Considerando-se a idade de 14 dias como referência devido à cura total da resina, percebe-se que as resinas A e B apresentaram reduções médias de até 69,6 e 67,9% da tensão máxima e de 18,2 e 40,9% do módulo de elasticidade, respectivamente, em ensaios realizados no período de 24 meses. Note-se que a resina A se apresenta mais dúctil devido ao amolecimento da matriz, enquanto a resina B apresenta comportamento mais frágil com a absorção de umidade.

Figura 5 - Diagrama tensão versus deformação para os corpos de prova de resinas A (a) e B (b) expostas à umidade constante



Fonte: Escobal (2017), Ferreira (2019) e Sarti Júnior (2020).

Tabela 1 - Principais resultados para as resinas A e B expostas a umidade constante

Ambiente/ idade	Resina A				Resina B			
	Tensão máxima		Módulo de elasticidade		Tensão máxima		Módulo de elasticidade	
	Média (MPa)	COV (%)	Média (GPa)	COV (%)	Média (MPa)	COV (%)	Média (GPa)	COV (%)
UC_07D ¹	39,7	2,4	2,2	3,2	36,7	2,6	2,1	4,4
UC_REF ¹	40,1	3,0	2,2	4,2	38,1	14,9	2,2	7,6
UC_04M ¹	24,5	5,0	1,9	10,0	19,6	19,3	1,5	5,8
UC_08M ²	24,8	3,5	1,4	7,0	12,1	4,8	1,3	6,9
UC_12M ³	22,7	2,6	1,3	2,6	12,5	3,9	0,8	6,0
UC_24M ³	12,2	13,9	1,8	5,5	12,2	11,9	1,3	3,5

Temperatura

Segundo Seong (2003), quando as resinas são submetidas ao processo de aquecimento e ultrapassam a T_g ocorre uma queda brusca do módulo de elasticidade, da resistência à tração e à compressão. Dessa forma, a melhor temperatura de manuseio para aplicação das resinas deve ser sempre mantida abaixo da T_g .

Banea, Silva e Campilho (2011) avaliaram a influência de altas temperaturas nas propriedades mecânicas de adesivos epoxídicos. Corpos de prova de um tipo de adesivo epoxídico com T_g de 155 °C foram confeccionados nas dimensões de 150 mm de comprimento por 45 mm de largura e espessura de 2 mm. Os corpos de prova foram expostos a temperaturas de 100 °C, 125 °C, 150 °C e 200 °C e os ensaios foram conduzidos 5 minutos após atingir as temperaturas pré-definidas. Por meio dos resultados obtidos, os autores observaram redução de 34%, 68%, 90% e 98% na resistência à tração após a exposição à temperatura de 100 °C, 125 °C, 150 °C e 200 °C, respectivamente. Em relação ao módulo de elasticidade, foram verificadas reduções em torno de 24%, 74%, 98% e 99% para as mesmas temperaturas analisadas anteriormente. Contudo, observou-se nos diagramas tensão *versus* deformação um aumento expressivo na ductilidade após a exposição a altas temperaturas (Figura 6).

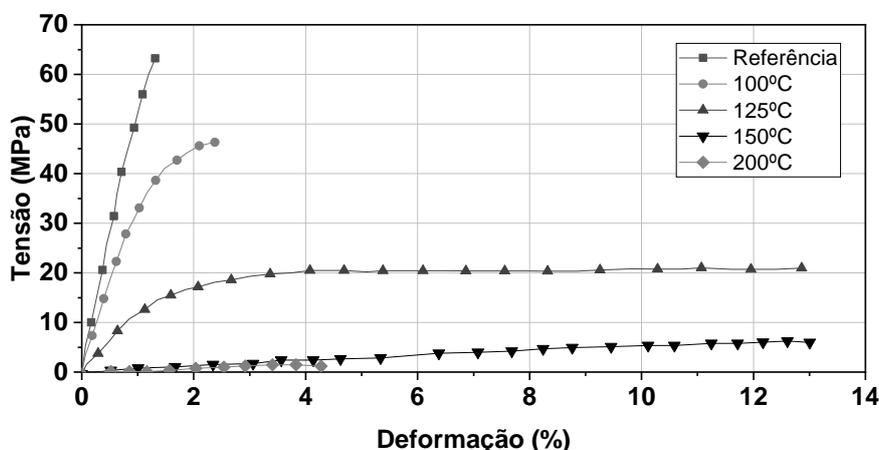
Em sua pesquisa, Fernandes (2016) concluiu que as resinas epoxídicas submetidas às diferentes condições ambientais apresentam reduções nos valores na T_g em torno de 23% nas resinas expostas a ciclos de gelo/degelo. Ainda, com base nos resultados obtidos por meio de ensaios de tração em amostras de resina epoxídica, foi observado um acréscimo de 31% na resistência à tração e de 15% no módulo de elasticidade nas amostras submetidas a ciclos térmicos de -15 °C a 60 °C. Já nos ensaios com ciclos de temperatura entre 20 °C a 80 °C, a resistência à tração e o módulo de elasticidade elevaram em torno de 58% e 33%, respectivamente. Seguindo com a análise dos resultados obtidos por meio das amostras de resina epoxídica submetidas a ciclos de gelo/degelo, Fernandes (2016) observou uma diminuição de 47% da resistência à tração e 38% do módulo de elasticidade.

Intemperismo

Escobal (2017), Ferreira (2019) e Sarti Júnior (2020) realizaram ensaios de caracterização de resinas epoxídicas (*primer* e saturação, denominados de resina A e B, respectivamente) foram realizados com as idades de 7 e 14 dias de cura (referência) e após 4, 8 e 12 meses de exposição ao intemperismo em região de clima local definido como subtropical úmido com inverno seco e verão quente (C_{wa}). A Figura 7 apresenta o diagrama tensão *versus* deformação das resinas A e B ao longo do tempo.

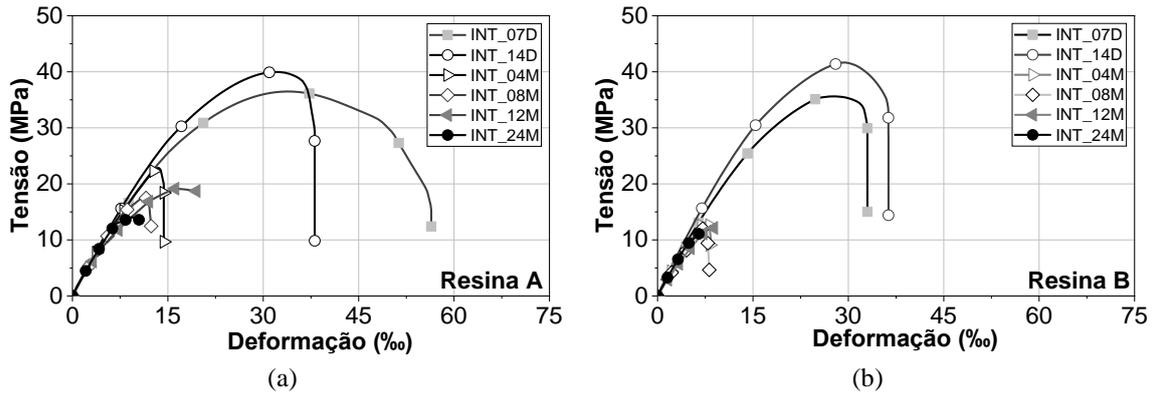
Resinas desse mesmo lote mantidas em ambiente laboratorial não apresentaram reduções significativas ao ponto de torná-las distintas. Entretanto, quando expostas ao intemperismo, sem nenhum tipo de proteção, os resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial demonstraram redução da tensão máxima e do módulo de elasticidade de 62% e 68% e 31% e 16% para as resinas A e B, respectivamente, para a idade de 2 anos. Um exemplo de fotodegradação das resinas tipo A é apresentado na Figura 8.

Figura 6 - Diagrama tensão versus deformação das resinas epoxídicas



Fonte: adaptado de Banea, Silva e Campilho (2011).

Figura 7 - Curvas médias para corpos de prova de resina A (a) e B (b) expostas ao intemperismo



Fonte: Escobal (2017), Ferreira (2019), Oliveira (2019) e Sarti Júnior (2020).

Figura 8 - Fotodegradação da resina A

Idade	Laboratorial	Intemperismo
REF (14 dias)		
4 meses		
8 meses		
12 meses		
24 meses		

Fonte: Ferreira (2019), Oliveira (2019) e Sarti Júnior (2020).

Desse modo, este estudo visa obter um melhor entendimento sobre o comportamento de resinas epoxídicas, comumente utilizadas em térmicas de reforço, quando expostas à degradação acelerada por meio de umidade constante com temperatura controlada.

Metodologia

Corpos de prova

Encontra-se em andamento um programa experimental iniciado em 2019 por Sarti Júnior (2020) baseado na caracterização da degradação de adesivos estruturais por meio de ensaios de tração uniaxial em corpos de prova de resinas epoxídicas bicomponentes do tipo *primer* (resina A) e de saturação (resina B), os quais foram mantidos em ambientes laboratorial ou expostos ao protocolo de degradação acelerado apresentado pela norma ACI 440.9R (AMERICAN..., 2015).

Assim, 80 corpos de prova foram confeccionados com o uso de moldes de teflon segundo a geometria apresentada nas normas ISO 527-1 (INTERNATIONAL..., 2012a) e ISO 527-2 (INTERNATIONAL..., 2012b). O procedimento de obtenção dos corpos de prova de resinas proposto por Escobal (2017) é apresentado na Figura 9, enquanto um resumo do programa experimental em andamento é apresentado na Tabela 2.

Assim, os corpos de prova de resinas foram confeccionados e mantidos em ambiente laboratorial nas idades de 7, 14 e 42 dias (1.000h) ou expostos ao protocolo de degradação acelerado pelo período de 1.000 horas (42 dias). Note-se que futuramente serão obtidos os resultados para as idades de 3.000 horas (125 dias) e 10.000 horas (417 dias).

Figura 9 - Processo de fabricação dos corpos de prova de resinas epoxídicas



Fonte: Escobal (2017).

Tabela 2 - Resumo da campanha experimental adotada para as resinas epoxídicas

Idades	Corpos de prova de Resina A		Corpos de prova de Resina B	
	Laboratorial	Degradação acelerada	Laboratorial	Degradação acelerada
7 dias	5	-	5	-
14 dias	5	-	5	-
1.000 horas	5	5	5	5
3.000 horas*	5	5	5	5
10.000 horas*	5	5	5	5

Nota: *ensaios a serem futuramente realizados.

Ambientes de exposição

O estudo da verificação da degradação de um determinado material compósito pode levar anos pois tal processo está diretamente ligado ao ambiente degradante cujos elementos estão inseridos. Assim, dependendo do ambiente de exposição, as propriedades mecânicas dos materiais compósitos são afetadas de forma amena (quando mantidos em ambientes internos e protegidos) ou de forma mais severa (quando expostos a ambientes externos e meios agressivos), podendo levar a alterações significativas do comportamento do material analisado.

O código americano ACI 440.9R (AMERICAN..., 2015) recomenda o uso de ACPs (*Accelerated Conditioning Protocols*, na língua inglesa) para a avaliação da durabilidade de materiais compósitos. Segunda esta norma os ambientes de exposição propostos são:

- (a) *standart laboratory conditions*: ambiente laboratorial de referência, o qual é caracterizado pelo uso e temperatura e umidade relativa de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $50\% \pm 10\%$, respectivamente;
- (b) *continuous immersion in water*: imersão contínua em água potável com temperatura controlada de $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- (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
- (d) *continuous immersion in alkaline solution*: imersão contínua em solução alcalina com temperatura controlada de $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A norma ACI 440.9R (AMERICAN..., 2015) recomenda que os materiais de reforço sejam confeccionados seguindo as diretrizes propostas pela norma ACI 440.2R (AMERICAN..., 2017) e, após o período de cura, indica que o elemento reforçado e corpos de prova do sistema de reforço (nomeadamente, resinas e compósitos) devam ser inseridos em um tanque 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.

Nesse sentido, dois ambientes de exposição foram adotados neste trabalho, nomeadamente o laboratorial (LAB, ambiente interno, protegido, o qual serviu como referência aos demais ensaios) e o baseado na imersão em água com temperatura controlada.

O ambiente adotado como laboratorial é o Laboratório NETPRE (Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), o qual é coberto e protegido de intempéries (Figura 10a). Com relação ao protocolo acelerado, tanques de acondicionamento (ACPs) para avaliação da durabilidade foram construídos e a imersão de vigas e resinas foi realizada em água potável, obtida da rede pública de abastecimento, com temperatura constante de $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 10b). O aquecimento da água foi realizado por meio de uma resistência elétrica tubular, do tipo U, com 2.000 Watts de potência e dimensões de 250 mm de abertura, 400 mm de comprimento e pontas a 45°, ligada à rede elétrica com tensão de 220 V e instalada no interior do tanque, com controle da temperatura realizado por meio de um termostato analógico.

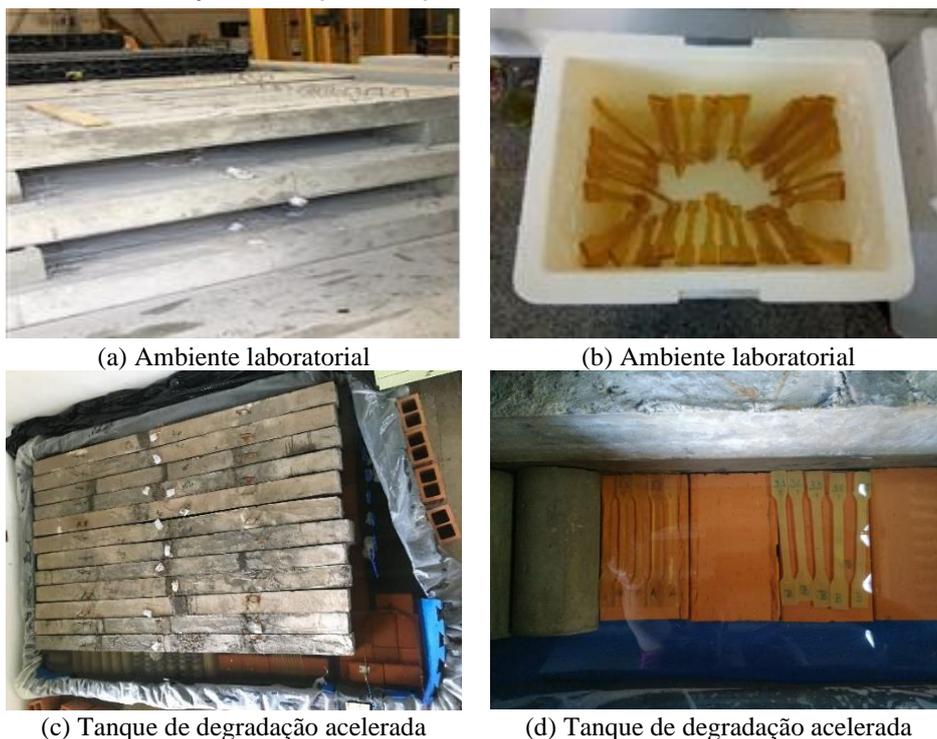
De acordo com a norma, a temperatura da água potável ou solução alcalina deve ser mantida ente $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. O período de duração dos ACPs pode variar entre 1.000 e 10.000 horas. Porém, um período intermediário de 3.000 horas de exposição é indicado pelo código ACI 440.9R (AMERICAN..., 2015). Por fim, os ensaios mecânicos para verificação do comportamento do elemento reforçado e dos materiais de reforço pós-acondicionamento devem ser conduzidos, após o término do período de exposição, dentro de um intervalo de 2 a 5 horas.

Caracterização das resinas epoxídicas

Os ensaios de caracterização das resinas epoxídicas foram realizados no Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar utilizando a máquina de ensaios universal da marca Instron, modelo 5569, com velocidade de aplicação de carga de 2 mm/min segundo as recomendações das normas ISO 527-1 (INTERNATIONAL..., 2012a) e ISO 527-5 (INTERNATIONAL..., 2009). As deformações foram medidas com o uso de um extensômetro eletrônico, da marca Instron, com base de 50 mm e foi posicionado no centro dos corpos de prova e removidos quando uma deformação de 1% foi atingida.

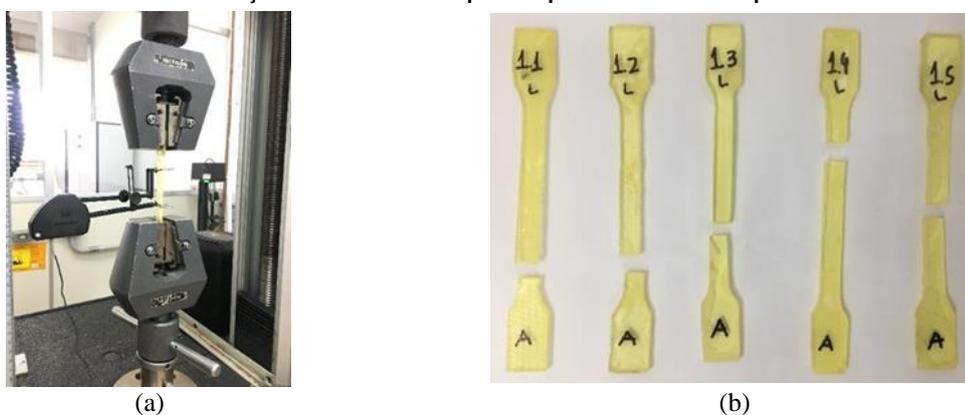
Nas Figuras 11a e 11b apresenta-se o arranjo de ensaio de tração uniaxial e o aspecto final dos corpos de prova ensaiados, respectivamente.

Figura 10 - Locais de execução da campanha experimental



Fonte: Sarti Júnior (2020).

Figura 11 - Ensaio mecânico de tração uniaxial em corpos de prova de resinas epoxídicas



Fonte: Sarti Júnior (2020).

Análise estatística

Estatística é definida por Valleman (2002) como a ciência que permite obter conclusões a partir da análise de dados. O processo de análise estatística de um conjunto de dados inicia-se pela organização das informações seguida pelo tratamento dos dados, análises e, por fim, a divulgação dos resultados.

Considerando-se que a análise direta dos valores médios de um conjunto de dados pode induzir a falsas conclusões sobre o assunto analisado, optou-se por realizar a análise estatística nos resultados obtidos experimentalmente. Assim, análises estatísticas dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração uniaxial dos corpos de prova de resinas epoxídicas foram realizados com o propósito de facilitar a compreensão dos resultados e amparar a discussão.

Para melhor interpretação dos resultados optou-se por realizar o teste de Tukey com o uso do software de análise estatística Minitab 18, versão 2018, desenvolvido pela empresa Minitab. Os parâmetros adotados na análise foram nível de significância em 5% e confiabilidade de 95% para os intervalos de confiança.

A metodologia utilizada para classificação das equivalências dos resultados foi realizada com o uso de letras inseridas em colunas dos gráficos. Aplicou-se os seguintes conjuntos de letras para as amostras analisadas: ambiente de exposição: laboratorial (LAB) A, B, e degradação acelerada (ACP): P e Q.

Nesse contexto, a primeira letra do conjunto indica os valores médios estatisticamente equivalentes à maior média obtida em um mesmo grupo de dados; a segunda letra do conjunto estipulado expressa a segunda maior média observada estatisticamente diferente da maior (primeira letra) e assim sucessivamente. Assim, definiu-se que letras iguais se referem a médias estatisticamente equivalentes, enquanto letras diferentes remetem a médias estatisticamente divergentes.

Resultados e discussões

Apresentam-se na Tabela 3 os resultados médios de tensão máxima e módulo de elasticidade, os quais foram obtidos por meio dos ensaios mecânicos de tração uniaxial nos corpos de prova de resinas epoxídicas do tipo A e B, as quais foram expostas aos ambientes laboratorial e umidade constante com temperatura controlada. Além disso, a Figura 12 apresenta os diagramas médios tensão *versus* deformação para as resinas analisadas. Note-se que a idade de 14 dias (cura completa) foi considerada como referência para as análises realizadas.

Tendo como referência os resultados obtidos para a idade de 14 dias (cura completa) e analisando-se os dados da Tabela 3 e Figuras 12 e 13 observa-se que as tensões e módulos de elasticidade médios verificados para os corpos de prova de ambas as resinas mantidas em ambiente laboratorial apresentaram resultados estatisticamente semelhantes. Assim, as reduções observadas não foram significativas ao ponto de torná-las distintas.

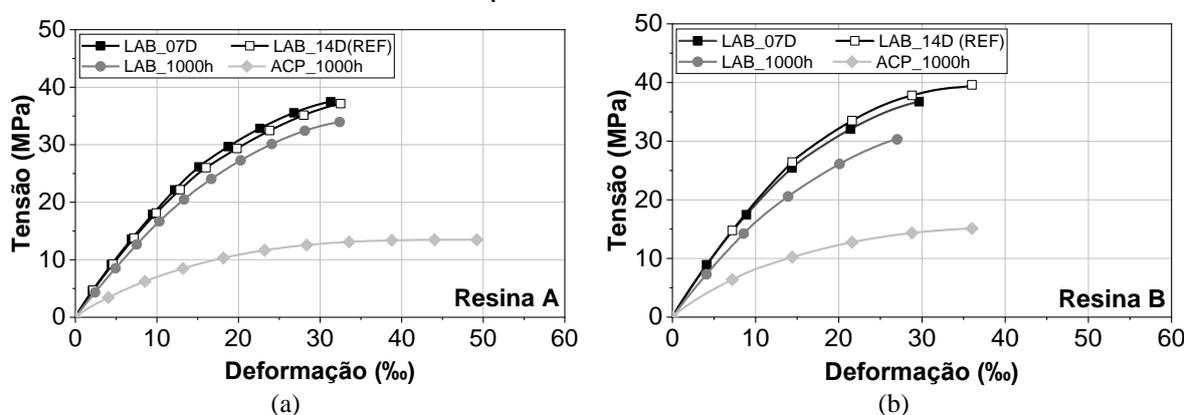
Tabela 3 - Principais resultados para as resinas A e B mantidas em ambientes laboratorial e em protocolo de acondicionamento acelerado

Ambiente/ idade	Resina A				Resina B			
	Tensão máxima		Módulo de elasticidade		Tensão máxima		Módulo de elasticidade	
	Média (MPa)	COV (%)	Média (GPa)	COV (%)	Média (MPa)	COV (%)	Média (GPa)	COV (%)
LAB_07D	38,2	3,1	2,1	6,0	37,5	4,2	2,2	5,9
LAB_14D (REF)	37,8	4,7	2,0	2,5	39,4	8,4	2,1	6,6
LAB_1000h	34,8	28,7	1,8	35,4	30,5	10,9	1,1	26,5
ACP_1000h	12,7	7,0	0,7	31,0	15,2	5,0	1,0	0,4

Fonte: Sarti Júnior (2020).

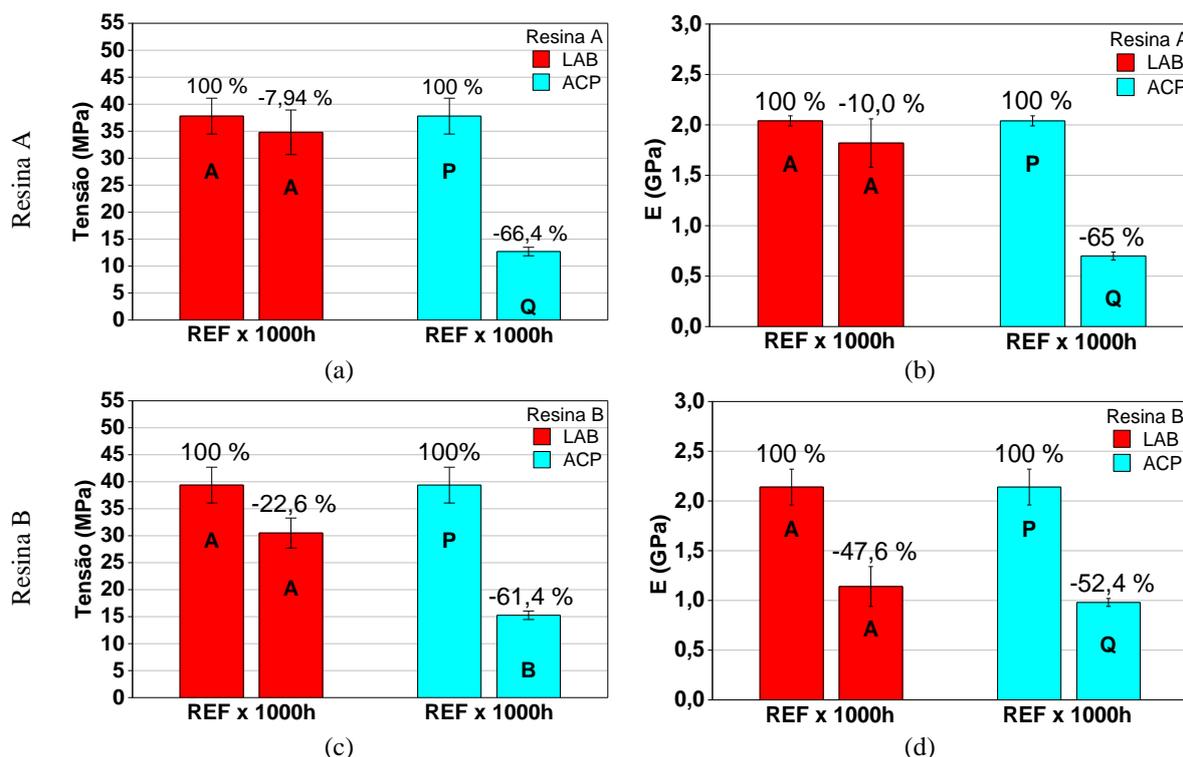
Nota: COV = Coeficiente de variação = (Desvio padrão/média) x 100.

Figura 12 - Diagrama médio 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).

Figura 13 - Diagrama com Intervalo de confiança de 95% e teste de Tukey para os corpos de prova de resinas do tipo A e B para tensão máxima (a-c) e módulo de elasticidade (b-d), respectivamente



Fonte: Sarti Júnior (2020).

Entretanto, as médias obtidas para os corpos de prova expostos à degradação acelerada indicam reduções de aproximadamente 66 e 61% na tensão máxima e de 65 e 52% do módulo de elasticidade das resinas A e B, respectivamente. Posteriormente, tais valores serão correlacionados com os obtidos em ensaios experimentais de degradação natural de resinas frente à umidade constante em temperatura ambiente, ciclos de umidade, intemperismo, névoa salina, dentre outros, para se estimar em quanto tempo se obterá as mesmas reduções das propriedades mecânicas dos materiais frente à agressividade do meio.

Conclusões

Este trabalho apresenta um programa experimental que visa avaliar o comportamento a longo prazo de resinas epoxídicas comumente utilizadas em sistemas de reforço com materiais compósitos. Para isso, dois ambientes de exposição foram adotados nesta pesquisa: laboratorial, o qual serviu de referência para as demais análises, e degradação acelerada baseada no protocolo de acondicionamento recomendado pelo código americano ACI 440.9R (AMERICAN..., 2015). Os resultados obtidos permitiram a obtenção das seguintes conclusões:

- com relação aos materiais utilizados no sistema de reforço, por meio das análises estatísticas, foi possível observar que a resina A (*primer*) mantida em ambiente laboratorial apresentou módulos de elasticidade e tensão máximas estatisticamente similares para as idades de 14 dias e 42 dias. Entretanto, as resinas acondicionadas no tanque e também ensaiadas aos 42 dias apresentaram reduções de 66%, tanto na força máxima como módulo de elasticidade; e
- a resina B (saturação) mantida em laboratório também apresentou módulos de elasticidade e tensão máximas estatisticamente similares para as idades de 14 dias e 42 dias (tendo como referência a idade de 14 dias). Quando exposta ao protocolo de acondicionamento, e tendo como referência o ambiente laboratorial e idade de 42 dias, apresentou redução estatisticamente distinta de 61% da tensão máxima e 52% no módulo de elasticidade.

Nesse sentido, recomenda-se o uso de sistemas de proteção do sistema de reforço de modo a se evitar sua possível degradação devido a agressividade ambiental.

Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI COMMITTEE 440.2R**: guide for the design and construction of externally bonded frp systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills, 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. Farmington Hills, 2015.
- BANEA, M. D.; SILVA, L. F. M.; CAMPILHO, R. D. S. G. Mechanical characterization of a high temperature epoxy adhesive. **Welding Equipment and Technology**, v. 22, p. 58-62, 2011.
- ESCOBAL, A. D. **Caracterização da degradação de adesivos estruturais utilizados em sistemas de reforço de estruturas de concreto armado**. São Paulo: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 2017. Relatório Final de Iniciação Científica.
- FERNANDES, P. M. G. **Bond behavior of NSM CFRP-concrete systems**: durability and quality control. Guimarães, 2016. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2016.
- FERREIRA, D. C. **Avaliação da degradação de vigas reforçadas com FRP quando expostas ao intemperismo**. São Carlos, 2019, 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.
- FÉDÉRATION INTERNACIONALE DU BETÓN. **Bulletin 90**: externally applied FRP reinforcement for concrete structures. Lausanne, 2019.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-1**: plastics: determination of tensile properties: part 1: general principles. Genève, 2012a.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-2**: plastics: determination of tensile properties: part 2: test conditions for moulding and extrusion plastics. Geneva, 2012b.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-5**: plastics: determination of tensile properties: part 5: test conditions for unidirectional fiber-reinforced plastic composites. Geneva, 2009.
- INTELLIGENT SENSING FOR INNOVATIVE STRUCTURES. **Durability of FRP composites for construction**. Educational module nº 8 (student notes). Manitoba: The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, 2006.
- JUVANDES, L. F. P. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”**. Porto, 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 1999.
- LIN, Y.; CHEN, X. Moisture sorption-desorption-resorption characteristics and its effect on the mechanical behavior of the epoxy system. **Polymer**, v. 46, p. 11994-12003, 2005.
- OLIVEIRA, M. C. **Análise do comportamento estrutural e durabilidade de pilares de concreto armado reforçados com manta de GFRP**. São Carlos, 2019. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.
- POSTERLLI, M. C.; CARRAZEDO, R.; DALFRÉ, G. M. Durabilidade de estruturas reforçadas com FRP. In: ENCONTRO LUSO-BRASILEIRO DE DEGRADAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO, 3., São Carlos, 2018. **Anais [...]** Foz do Iguaçu, 2018.
- REZAZADEH, M.; BARROS, J. A. O.; RAMEZANSEFAT, H. End concrete cover separation in RC structure strengthened in flexure with NSM FRP: Analytical Design Approach. **Engineering Structure**, v. 128, p. 415-427, 2016.
- SARTI JÚNIOR, L. A. **Durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP submetidas a degradação acelerada**. São Carlos, 2020. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.
- SEONG, L. Y. **Durability of fiber reinforced polymer composites under tropical climate**. Singapura, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – National University of Singapore, Singapura, 2003.

VALLEMAN, P. **Estatística aplicada**: administração, economia e negócios. 2. ed. São Paulo: Bookman, 2002.

ZHAO, J. *et al.* Deterioration of basic properties of the materials in FRP-strengthening RC structures under ultraviolet exposure. **Polymers**, v. 9, 2017.

Gláucia Maria Dalfré

Conceitualização, Metodologia, Supervisão, Análise de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Rod. Washington Luiz (SP-310), km 235 | Caixa Postal 676 | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13565-905 | Tel.: (16) 3351-8262 | E-mail: glaucia.dalfre@ufscar.br

Luiz Antônio Sarti Júnior

Pesquisa, Análise de dados, Redação do manuscrito original.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Tel.: (16) 3351-8262 | E-mail: luiz.sarti.junior@gmail.com

Ciro José Ribeiro Vilella Araújo

Supervisão, Análise de dados, Redação do manuscrito original.

Departamento de Cidades, Infraestrutura e Meio Ambiente, Seção de Obras Civas | Instituto de Pesquisas Tecnológicas | Av. Prof. Almeida Prado, 532, Prédio 54 | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-901 | Tel.: (11) 3767-4166 | E-mail: ciroaraujo@ipt.br

Editor do artigo: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

Editor de seção: **Ercília Hitomi Hirota e Juliana Parise Baldauf**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.