

Efecto de la difusión y degradación mecánica de resina epóxica y un material compuesto de fibra de carbón/resina epóxica bajo exposición hídrica

Effect of diffusion and mechanical degradation of epoxy resin and a carbon fiber/epoxy resin composite under water exposure

Emilio Pérez Pacheco ¹

Alejandro Ortiz Fernández ²

Carlos Rolando Ríos Soberanis ³

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la absorción de agua destilada y de agua de mar en el comportamiento higroscópico y en las propiedades mecánicas de la resina epóxica y de un material compuesto en forma de lámina de fibra de carbón y resina epóxica. Para ello se determinaron experimentalmente las cinéticas de absorción, se ajustó el proceso difusivo del laminado al modelo de Fick y se analizó la variación de la resistencia a la tensión y del módulo elástico en función del contenido de humedad absorbida. Los resultados demostraron que la resina epóxica tuvo niveles más altos de absorción cercanos a 3% en agua destilada y 2.4-2.5% en agua de mar, mientras que el laminado tuvo absorciones de equilibrio de 0.29% y 0.26%, respectivamente. El modelo de Fick ajustado describió satisfactoriamente la difusión en el laminado. La resistencia y la rigidez se vieron reducidas progresivamente por la absorción de agua; la pérdida de resistencia a la tensión en el material compuesto laminado fue del 74% en agua destilada y del 47% en agua de mar. Se concluye que la matriz epóxica controla la degradación hidromecánica y estos resultados son relevantes para el diseño de componentes estructurales en ambientes acuosos y marinos.

PALABRAS CLAVES: resina epóxica; laminado de fibra de carbono; absorción de agua; difusión de fick; propiedades mecánicas; degradación hidromecánica

Fecha de recepción: 04 de marzo, 2026.

Fecha de aceptación: 14 de abril, 2026.

¹ Tecnológico Nacional de México/ITS de Calkiní. C.A. Bioprocesos, Av. Ah-Canul, Calkiní, Campeche, C.P. 24900, México. eperez@itescam.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2242-1183>

² Tecnológico Nacional de México/ITS de Calkiní. C.A. Bioprocesos, Av. Ah-Canul, Calkiní, Campeche, C.P. 24900, México. aeortiz@itescam.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-9689-2124>

³ Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., Calle 43 No. 130 x 32 y 34, Chuburná de Hidalgo, CP 97205, Mérida, Yucatán, México, rolando@cicy.mx, <https://orcid.org/0000-0003-3915-7331>

Efecto de la difusión y degradación mecánica de resina epóxica y un material compuesto de fibra de carbón/resina epóxica bajo exposición hídrica

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the effect of distilled water and seawater absorption on the hygroscopic behavior and mechanical properties of epoxy resin and a composite material in the form of a carbon fiber and epoxy resin sheet. To achieve this, the absorption kinetics were experimentally determined, the diffusive process of the laminate was adjusted to the Fick model, and the variation in tensile strength and elastic modulus as a function of the absorbed moisture content was analyzed. The results demonstrated that the epoxy resin had higher absorption levels close to 3% in distilled water and 2.4-2.5% in seawater, while the laminate had equilibrium absorptions of 0.29% and 0.26%, respectively. The fitted Fick model satisfactorily described the diffusion in the laminate. The strength and stiffness were progressively reduced by water absorption; the loss of tensile strength in the laminated composite material was 74% in distilled water and 47% in seawater. It is concluded that the epoxy matrix controls hygro-mechanical degradation and these results are relevant for the design of structural components in aqueous and marine environments.

KEYWORDS: epoxy resin; carbon fiber laminate; water absorption; fick diffusion; mechanical properties; hydromechanical degradation.

INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de carbón son uno de los materiales avanzados más importantes para aplicaciones estructurales de alto desempeño mecánico, gracias a su elevada relación resistencia-peso, a su buena rigidez específica, a su estabilidad dimensional y a la versatilidad de su procesamiento. Los sistemas basados en resina epóxica, entre otros, sobresalen por su amplia utilización en los sectores aeroespacial, marino, energético e infraestructura, donde la integridad mecánica y la durabilidad en condiciones de servicio son factores determinantes para el diseño y la seguridad operacional (Osa-uwagboe et al., 2024; Wang et al., 2025). Sin embargo, pese a sus ventajas, estos materiales no son inmunes a los efectos del medio ambiente. La exposición prolongada a medios acuosos, especialmente a agua de mar, promueve procesos de absorción de humedad, plastificación de la matriz, degradación interfacial y evolución de microdaño; fenómenos que pueden comprometer progresivamente sus propiedades físicas y mecánicas (Bone et al., 2022). Asimismo, el transporte de agua en materiales poliméricos de resina epoxica y de materiales compuestos de fibra de carbón y resina epóxica se han estudiado a menudo mediante el modelo de difusión de Fick. Este modelo describe adecuadamente la cinética de absorción en muchos sistemas durante las etapas iniciales e intermedias de envejecimiento. Sin embargo, la literatura reciente ha demostrado que la respuesta higroscópica y la magnitud del deterioro mecánico dependen de la matriz, de la arquitectura del refuerzo, la calidad de la interfase fibra-matriz, la presencia de vacíos o microgrietas y la composición química del medio de exposición (Bel Haj Frej et al., 2021). En especial, se ha observado que el agua destilada y el agua de mar pueden producir respuestas diferentes en la absorción de humedad y en la degradación estructural. Estos avances coadyuvan a la comprensión del comportamiento de la resina epóxica y de materiales compuestos laminados de fibras de carbón y resina epóxica frente a ambientes acuosos de distinta naturaleza. En particular, todavía hay que establecer claramente cómo difiere la cinética de absorción entre la matriz y el material compuesto, en qué medida el ajuste al modelo de Fick sigue siendo válido en ambos medios, y cómo la humedad absorbida se traduce en pérdidas de resistencia a la tensión y de módulo elástico en cada escala material.



Efecto de la difusión y degradación mecánica de resina epóxica y un material compuesto de fibra de carbón/resina epóxica bajo exposición hídrica

El presente trabajo estudia la absorción de agua en resina epóxica y en materiales compuestos laminados de fibra de carbono y resina epóxica sumergidos en agua destilada y en agua de mar, y sus efectos sobre las propiedades mecánicas. El trabajo se basa en la comparación entre los resultados experimentales de cinética de absorción, ajuste por la ley de Fick y la evolución de la resistencia a la tensión y del módulo elástico. De esta manera, se pretende aportar evidencia experimental para una mejor comprensión de los mecanismos hidromecánicos que rigen la degradación de estos materiales, así como fortalecer los criterios de selección, diseño y predicción de vida útil para aplicaciones estructurales en ambientes marinos y acuáticos (Osa-uwagboe et al., 2024; Wang et al., 2025). Por ello, el objetivo de la presente investigación es evaluar el efecto de la absorción de agua destilada y agua de mar sobre el comportamiento higroscópico y las propiedades mecánicas de la resina epóxica y de un material compuesto laminado de fibras de carbón y resina epóxica, mediante el análisis de la cinética de absorción, el ajuste del proceso difusivo al modelo de Fick y la determinación de la variación sus propiedades mecánicas en función del contenido de humedad absorbida. Lo anterior con la finalidad de generar conocimiento para comprender los mecanismos de degradación hidromecánica de estos sistemas y fortalecer los criterios de diseño y durabilidad para su uso en ambientes marinos y acuáticos.

JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se justifica por la necesidad de conocer, sobre una base experimental, el efecto de la absorción de agua sobre la durabilidad y el desempeño mecánico de la resina epóxica y los laminados de fibra de carbón y resina epóxica cuando se exponen a ambientes acuáticos, especialmente bajo condiciones del medio marino. Estos materiales son muy utilizados en aplicaciones estructurales, de rehabilitación y de recubrimiento en sectores estratégicos como el energético, el naval y el de infraestructura que están sometidos de forma continua a humedad, agua de mar y variaciones ambientales que pueden comprometer su integridad estructural. En este sentido, el conocimiento de la cinética de absorción, el ajuste al modelo de difusión de Fick y la evolución de propiedades mecánicas, resulta esencial para establecer criterios más confiables de selección, diseño y vida útil en servicio. El estudio también permite diferenciar la respuesta de la matriz polimérica de la del material compuesto, aportando evidencia sobre el papel que desempeña la interfase fibra-matriz en los procesos de degradación. Por lo tanto, el presente trabajo contribuye al entendimiento de los mecanismos hidromecánicos que gobiernan el deterioro de materiales compuestos avanzados en ambientes marinos y acuáticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Como matriz polimérica se empleó una resina epóxica basada en diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA), comercializada como Epon 828 (Shell Co.), utilizando metafenilendiamina (mPDA) como agente de entrecruzamiento. La formulación se preparó con una proporción de 14.5 partes de mPDA por cada 100 partes de resina. Asimismo, se utilizó un laminado unidireccional de polímero reforzado con fibra de carbono, fabricado por pultrusión y comercializado bajo la denominación Sika® CarboDur® 10S12. Este laminado tuvo un espesor nominal de 1.2 mm, un ancho de 10 cm, una densidad de 1.6 g/cm³ y un contenido de volumen de fibras de 68%.

Efecto de la difusión y degradación mecánica de resina epóxica y un material compuesto de fibra de carbón/resina epóxica bajo exposición hídrica

METODOLOGÍA

Preparación de material de resina epóxica

La resina y el agente de curado se pesaron por separado y se calentaron hasta 75 °C para favorecer la fusión completa del agente entrecruzante. Posteriormente, ambos componentes se mezclaron durante 7 min hasta obtener una mezcla homogénea, y se vertió en moldes de silicón previamente calentados. El curado se realizó durante 2 h a 75 °C, seguido de un poscurado de 2 h a 125 °C. A partir de este procedimiento se elaboraron especímenes para las pruebas de absorción y de caracterización mecánica.

Preparación de material compuesto

Las probetas del material compuesto se obtuvieron a partir de láminas comerciales unidireccionales cortadas con disco de diamante conforme a la norma ASTM D3039/D3039M. Las dimensiones de los especímenes fueron 250 mm de longitud, 15 mm de ancho y 1.2 mm de espesor. Para los ensayos mecánicos, los extremos de las probetas fueron acondicionados con “tabs” de aluminio adheridos con adhesivo epóxico comercial, con el propósito de mejorar la transferencia de carga y evitar fallas prematuras en la zona de sujeción.

Determinación de la fracción volumétrica de fibra

La fracción volumétrica de fibra del laminado se determinó mediante calcinación de acuerdo con la norma ASTM D2584-02. Para ello, muestras del laminado fueron sometidas a 550 °C durante 20 min en una mufla, eliminando la matriz polimérica y permitiendo cuantificar la masa remanente de fibra. A partir de la masa inicial, la masa residual y las densidades de los constituyentes, se calculó el contenido volumétrico de fibra del material compuesto.

Acondicionamiento hídrico

Antes del acondicionamiento en medios acuosos, todas las probetas se secaron en estufa para eliminar humedad residual. En el caso de la resina epóxica, el secado se llevó a cabo a 75 °C durante 72 h, mientras que en el laminado el tratamiento se realizó a la misma temperatura durante 24 h. Posteriormente, las muestras se sumergieron por separado en recipientes con agua destilada y agua de mar natural a una temperatura cercana a 25 °C. Los recipientes permanecieron cubiertos para minimizar la evaporación y las variaciones en la composición del medio. En la resina epóxica, los líquidos de inmersión se renovaron mensualmente, mientras que en el laminado la renovación del agua de mar se realizó cada tres días.

Monitoreo gravimétrico de la absorción de agua

La absorción de agua se determinó mediante seguimiento gravimétrico periódico de la ganancia en masa. Para ello, las probetas fueron retiradas del medio de inmersión en intervalos definidos, secadas superficialmente, pesadas en una balanza analítica y reintroducidas inmediatamente en el medio correspondiente. El contenido de agua absorbida se calculó a partir de la diferencia entre la masa en el tiempo y la masa seca inicial, expresada como porcentaje respecto a esta última. En el laminado, el monitoreo se extendió durante 170 días.

Ajuste al modelo de difusión de Fick

Para el material compuesto de fibra de carbón y resina epóxica, los datos experimentales de absorción de agua se analizaron en función de la raíz cuadrada del tiempo y se ajustaron al modelo de difusión de Fick mediante la ecuación 1. A partir de este ajuste se estimaron los parámetros de

Efecto de la difusión y degradación mecánica de resina epóxica y un material compuesto de fibra de carbón/resina epóxica bajo exposición hídrica

transporte, incluyendo el coeficiente de difusión y la absorción de equilibrio, con el fin de comparar el comportamiento del material en agua destilada y agua de mar.

$$M_t = M_\infty \frac{4}{h} \left(\frac{Dt}{\pi} \right)^{1/2} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde M_t denota la absorción de agua en el tiempo t , M_∞ denota la absorción de equilibrio, h denota el espesor de la probeta, D denota el coeficiente de difusión.

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas se evaluaron mediante ensayos de tensión en una máquina universal Shimadzu AG-I. Para la resina epóxica se empleó una celda de carga de 5 kN y una velocidad de desplazamiento de 5 mm/min. Para el material compuesto, los ensayos se realizaron a una velocidad de 2 mm/min. En ambos casos, las probetas fueron extraídas del medio de inmersión, secadas superficialmente, pesadas y ensayadas de manera inmediata para evitar pérdidas de humedad antes de la prueba. Las dimensiones transversales de cada espécimen se determinaron a partir del promedio de tres mediciones previas al ensayo.

La resistencia a la tensión y el módulo elástico se determinaron para diferentes niveles de absorción de agua, tanto en la resina epóxica como en el laminado. Los resultados se analizaron en función del contenido de humedad absorbida, con el propósito de establecer la relación entre el transporte de agua, la plastificación de la matriz polimérica y la degradación mecánica del sistema.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Cinética de absorción en agua destilada y agua de mar

En la Figura 1a y 1b se muestran los resultados de la cinética de absorción en agua destilada y agua de mar en resina epóxica y en materiales compuestos laminados de fibra de carbón y resina epóxica. En ambos casos se comparó el comportamiento en agua destilada y agua de mar a temperatura ambiente. Estos resultados mostraron tasas de absorción altas en los primeros días de inmersión y posteriormente disminuyó hasta tender a la estabilización. En la resina epóxica, la ganancia de masa es claramente mayor en agua destilada que en agua de mar, mientras que en los materiales compuestos de fibra de carbón y resina epóxica las diferencias entre ambos medios fueron menores. Asimismo, se observó que el comportamiento correspondiente al agua destilada estuvo ligeramente por arriba de la del agua de mar en períodos de exposición más prolongados. La resina epóxica presentó un incremento de peso más pronunciado en agua destilada que en agua de mar. Asimismo, el material compuesto mostró diferencias muy pequeñas entre ambos medios, con una elevada velocidad de absorción al inicio de las etapas de exposición.

En la Figura 1a, se aprecia una absorción inicial pronunciada en ambos medios, atribuible a la rápida difusión de moléculas de agua hacia el volumen libre del polímero y a la ocupación progresiva de sitios polares de la red de la resina termofija. La curva en agua destilada alcanza valores cercanos al 3%, mientras que la curva en agua de mar se estabiliza alrededor de 2.4-2.5%. Este comportamiento observado indica que la salinidad reduce la cantidad total de agua absorbida. Asimismo, la resina epóxica presentó un comportamiento semejante en ambos ambientes, pero con mayor absorción en agua destilada. Además, se identificaron tres regiones en las cinéticas de absorción con diferentes tasas de variación del contenido de agua. La mayor absorción en agua destilada puede explicarse por el mayor gradiente de potencial químico entre el líquido externo y la matriz polimérica, así como por la ausencia de iones disueltos que, en medios salinos, reducen la

Efecto de la difusión y degradación mecánica de resina epóxica y un material compuesto de fibra de carbón/resina epóxica bajo exposición hídrica

actividad del agua y tienden a limitar la difusión efectiva hacia el interior del polímero. En sistemas epóxicos, esta absorción induce plastificación, disminución de la temperatura de transición vítrea y aumento de la movilidad de los segmentos de cadena, fenómenos que suelen preceder al deterioro mecánico.

En la Figura 1b, se muestra una rápida absorción en la etapa inicial seguida por una disminución progresiva. Sin embargo, la magnitud total absorbida es mucho menor que en la resina, con valores inferiores a 0.8%. Esta diferencia confirma que la absorción está dominada por la matriz epóxica y por la interfaz fibra-matriz, mientras que la contribución de la fibra de carbono es esencialmente despreciable por su carácter hidrofóbico. Además, la menor absorción del laminado respecto de la resina epóxica sugiere que la presencia del refuerzo reduce la fracción volumétrica disponible para el transporte de agua. Las muestras expuestas en agua de mar y agua destilada presentaron altas velocidades de absorción en los primeros días y las diferencias entre ambos medios no fueron significativas. Este comportamiento puede explicarse a que, en el material compuesto laminado, el transporte de agua no sólo depende del carácter higroscópico de la matriz, sino también de la geometría de difusión, de la restricción impuesta por las fibras y de la existencia de microvacíos o microfibras generadas durante el procesamiento.

Los resultados muestran una relación jerárquica clara; la resina epóxica absorbe más agua y presenta una sensibilidad más marcada de acuerdo con el medio ambiente de exposición, mientras que en el material compuesto se exhibe una absorción total menor y una respuesta más amortiguada por efecto del refuerzo. Esta diferencia sugiere que el comportamiento higroscópico del material compuesto no puede extrapolarse directamente a partir de la matriz, aunque está gobernado por ella. Es decir, la fibra de carbono no elimina el problema de absorción de humedad, pero sí limita su magnitud y modifica la cinética del proceso.

Ghabezi y Harrison (2022) mostraron que en materiales compuestos de fibra de carbón y resina epóxica envejecidos en ambientes marinos, la absorción de humedad estuvo directamente ligada a cambios fisicoquímicos y a la degradación mecánica, con una participación determinante de la matriz y de la interfaz fibra-matriz. Aithal et al. (2023) estudiaron materiales compuestos cuasi-isótropos de fibra de carbón y resina epóxica y concluyeron que la humedad absorbida modifica progresivamente las propiedades mecánicas, especialmente cuando el envejecimiento se prolonga o se combina con condiciones ambientales más agresivas. Estas observaciones son similares con el comportamiento encontrado en esta investigación. Aun cuando en el material compuesto se absorbe menos agua que en la resina epóxica, la penetración de humedad es suficiente para activar mecanismos de degradación en la matriz y en la zona interfacial. Por otra parte, varios estudios recientes respaldan la mayor absorción observada en agua destilada frente al agua salina. Chakkour et al. (2024), al comparar envejecimiento higroscópico en agua destilada y agua de mar en materiales compuestos epóxicos reforzados, encontraron diferencias sistemáticas asociadas a la actividad del agua y a la influencia de las sales sobre la difusión. Xiong et al. (2024) también reportaron que la composición química del medio marino modifica la degradación de las resinas epóxicas, y que la concentración salina influye tanto en la absorción como en la evolución microestructural del polímero. Torabizadeh y Maleki (2024) observaron que la absorción de agua en resinas epóxicas produce cambios mecánicos medibles y que el medio de exposición controla la severidad de dichos cambios. Por ello, el hecho de que la resina epóxica muestre mayor absorción en agua destilada no contradice la idea de que el agua de mar pueda ser igualmente dañina. Un medio salino puede generar menor absorción total, pero inducir daño químico e interfacial más complejo debido a la presencia de iones y a sus interacciones con defectos preexistentes. Osa-uwagboe et al. (2024) subrayan que el desempeño de materiales poliméricos fibro-reforzados con fibras en ambiente marino depende del contenido de humedad, de la temperatura, la salinidad, el tiempo de exposición y la arquitectura del

Efecto de la difusión y degradación mecánica de resina epóxica y un material compuesto de fibra de carbón/resina epóxica bajo exposición hídrica

refuerzo. Choudhari et al. (2024) destacaron que la absorción de agua en materiales compuestos fibro-reforzados conlleva a plastificación de la matriz, reducción de la rigidez interfacial y disminución de las propiedades mecánicas, aunque la intensidad del daño depende de la naturaleza del sistema y de las condiciones ambientales de servicio. Asimismo, Idrisi et al. (2021) demostraron que el envejecimiento prolongado en agua de mar modifica de forma significativa el comportamiento mecánico del material compuesto polimérico reforzado, particularmente, cuando se incrementa la temperatura de exposición. La absorción inicial está regida por difusión hacia regiones accesibles del polímero; posteriormente, la desaceleración cinética muestra una aproximación al equilibrio; y, de manera simultánea, se desarrollan procesos de plastificación, hinchamiento, degradación interfacial y posible nucleación de microgrietas.

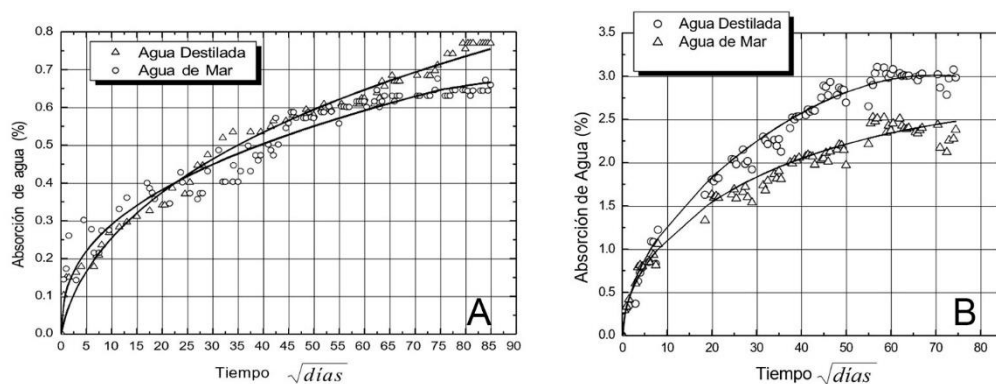


Figura 1. Variación de la ganancia de peso en función del tiempo para (A) la resina epóxica y (B) el material compuesto laminado de fibra de carbón/resina epóxica, en agua destilada y agua de mar.

Modelo de difusión de Fick

En la Figura 2a y en la Figura 2b se muestran los resultados del ajuste del proceso de absorción de agua del material compuesto de fibras de carbón y resina epóxica al modelo de difusión de Fick en agua destilada y agua de mar, respectivamente. Estos resultados exhiben una rápida absorción en las etapas iniciales, seguida por una disminución progresiva hasta alcanzar una región cercana al equilibrio. Asimismo, se observó que la absorción de equilibrio es ligeramente mayor en agua destilada que en agua de mar, y que la ley de Fick se ajusta adecuadamente a la tendencia de los datos experimentales.

En la Figura 2a, se observó un rápido incremento del contenido de agua durante las primeras etapas, que indica una elevada velocidad inicial de difusión. Posteriormente, la pendiente disminuyó y la absorción tendió a estabilizarse alrededor de un valor cercano a 0.29-0.30%. La aproximación entre los puntos experimentales y la curva ajustada indica que, en este medio, el comportamiento del material compuesto puede describirse mediante la segunda ley de Fick.

En la Figura 2b, se observó una etapa inicial de absorción acelerada y una fase posterior de desaceleración hasta alcanzar una etapa de estabilización. Sin embargo, la absorción de equilibrio es menor que en agua destilada, alrededor de un valor de 0.26-0.27%. La curva ajustada del modelo de Fick es adecuada a los datos experimentales. Este comportamiento probablemente se deba a la presencia de las sales en el medio que modifica la intensidad del transporte de agua hacia el interior



Efecto de la difusión y degradación mecánica de resina epóxica y un material compuesto de fibra de carbón/resina epóxica bajo exposición hídrica

del material compuesto, que disminuye la cantidad total absorbida en relación con el agua destilada. Esto sugiere un gradiente efectivo de actividad del agua menor en el medio salino y, por ende, una fuerza impulsora más baja para la penetración de las moléculas de agua. El análisis de ambas figuras permite concluir que el material presenta un comportamiento predominantemente que sigue la ley de Fick en los dos ambientes estudiados. La similitud entre la forma de las curvas experimentales y los ajustes teóricos sugiere que, dentro del intervalo de exposición considerado, no dominan procesos anómalos de transporte como relajación estructural intensa, degradación química acelerada o mecanismos duales de desorción. Sin embargo, se observó que el tipo de medio influye en la magnitud de la absorción y en los parámetros de transporte. El mayor nivel de absorción en agua destilada indica que el material compuesto presenta mayor afinidad efectiva por este medio que por el agua de mar. Este resultado es coherente con la naturaleza del sistema material compuesto de fibra de carbón y resina epóxica. La fibra de carbón no absorbe agua, de modo que el proceso está controlado por la resina epóxica y, en menor medida, por la región interfacial fibra-matriz y por defectos microscópicos como vacíos o microcanales de difusión.

La respuesta observada en esta investigación puede explicarse por la estructura polar de la resina epóxica. Las moléculas de agua penetran primero en el volumen libre de la red del polímero y posteriormente interactúan con grupos funcionales polares, generando plastificación local y una reducción de la rigidez molecular. En la etapa inicial, el gradiente de concentración entre el medio externo y el interior del material es máximo, razón por la cual la absorción ocurre con mayor rapidez. En la medida que aumenta el contenido de agua interna, dicho gradiente disminuye y el proceso disminuye hasta alcanzar el equilibrio. El hecho de que el agua de mar produzca una absorción ligeramente menor sugiere que la salinidad reduce la actividad del agua disponible para difundirse en la matriz polimérica. Este comportamiento es similar a los resultados recientes reportados para materiales compuestos de fibra de carbón y resina epóxica y para otros sistemas reforzados con fibras. Bone et al. (2022) reportaron que, en los materiales compuestos de fibra de carbono y matriz epóxica, la absorción de humedad tiende a estar directamente asociada con modificaciones en las propiedades mecánicas. También destacaron que, en muchos casos, el comportamiento cinético de dicha absorción puede modelarse de manera satisfactoria mediante las leyes de Fick durante las primeras y medianas etapas del envejecimiento. Wong et al. (2020) reportaron que la absorción de humedad en materiales compuestos de fibras de carbón y resina epóxica se ajusta bien a la ley de Fick y que la presencia de agua afecta significativamente la respuesta a la delaminación, aun con valores de humedad muy bajos.

Bel Haj Frej et al. (2021) compararon mecanismos de difusión y efectos del envejecimiento en materiales compuestos para aplicaciones marinas y observaron que, dependiendo del sistema polimérico y de la arquitectura del material, el agua destilada puede inducir cambios más notorios que el agua salina en términos de absorción total y variación de propiedades mecánicas. Asimismo, Hong (2021) estudió materiales compuestos de fibra de carbón y resina epóxica sometidos a envejecimiento higrotérmico por inmersión. En este trabajo se reportó que tanto el contenido absorbido como el coeficiente de difusión dependen del tipo de medio y de la temperatura, aunque la ley de Fick sigue siendo válida y describe de una manera aproximada el comportamiento de material compuesto. Massou et al. (2023) reportaron que la inmersión en agua de mar afecta el comportamiento mecánico y viscoelástico de laminados de fibra de carbón y resina epóxica, en valores bajos de humedad. La diferencia entre 0.29 % y 0.26 % puede parecer pequeña, pero incluso variaciones moderadas en el contenido de humedad pueden traducirse en cambios relevantes en plastificación de la matriz, resistencia interfacial y propiedades mecánicas a largo plazo. Bone et al. (2022) reportaron que la variación de propiedades mecánicas no depende únicamente de la cantidad absorbida, sino de cómo esa humedad se distribuye en la matriz y de la sensibilidad del sistema a la plastificación y al daño interfacial. Otro aspecto importante es la estabilidad observada. Ambas



Efecto de la difusión y degradación mecánica de resina epóxica y un material compuesto de fibra de carbón/resina epóxica bajo exposición hídrica

figuras muestran una etapa de estabilización relativamente bien definida. Esto sugiere que, para el intervalo evaluado, no hubo una degradación progresiva severa que generara una nueva capacidad de absorción a través de microdaño creciente. En sistemas donde aparecen microgrietas, lixiviación o relajaciones intensas, la curva de absorción suele desviarse de la forma clásica de Fick y presentar comportamientos bifásicos o no Fickianos. El hecho de que esto no se observe de manera marcada en las gráficas indica que el material compuesto laminado conserva una estructura suficientemente estable durante el ensayo. Sin embargo, esa estabilidad en la difusión no implica ausencia de deterioro mecánico. Zhang et al. (2025) mostraron que los materiales compuestos fibro-reforzados sometidos a condiciones higro-térmicas-salinas pueden mantener una cinética de absorción que se ajuste a la ley de Fick y, simultáneamente, experimentar degradación estructural significativa en el tiempo.

El material compuesto de fibra de carbón y resina epóxica presenta una absorción de agua compatible con la difusión Fick tanto en agua destilada como en agua de mar. La absorción inicial rápida en etapas iniciales y la posterior aproximación al equilibrio muestran un transporte controlado por la matriz epóxica. La diferencia entre ambos medios indica que la salinidad reduce ligeramente la cantidad total de agua absorbida y, probablemente, el coeficiente efectivo de difusión. La similitud entre los datos experimentales y el modelo teórico apoya el uso de la ley de Fick para la determinación de los parámetros de transporte en este sistema. También se confirma mediante comparación con la literatura científica que este comportamiento es similar al observado en otros materiales compuestos elaborados de fibra de carbón y resina epóxica sometidos a ambientes con agua destilada y marinos.

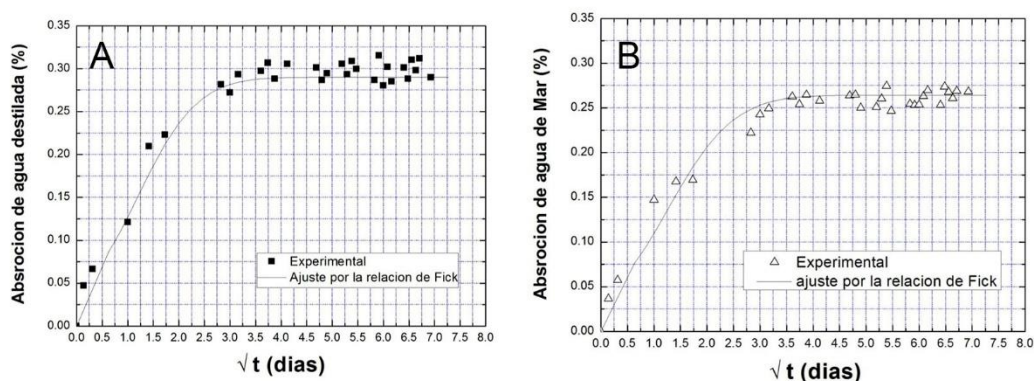


Figura 2. Ajuste del proceso de absorción de agua del laminado fibra de carbono/resina epóxica mediante el modelo de difusión de Fick en función de \sqrt{t} . (A) agua destilada y (B) agua de mar.

Propiedades Mecánicas

En la Figura 3a y en la Figura 3b se muestran los resultados de las propiedades mecánicas de la resina epóxica en función del contenido de agua absorbida, después de la inmersión en agua destilada y agua de mar. La Figura 3a presenta el comportamiento de la resistencia a la tensión, mientras que la Figura 3b muestra el comportamiento del módulo elástico. Estos resultados muestran que la absorción de agua produce una disminución progresiva del comportamiento mecánico de la resina epoxica, que se manifiesta por una disminución de la resistencia y de la rigidez. La tendencia



Efecto de la difusión y degradación mecánica de resina epóxica y un material compuesto de fibra de carbón/resina epóxica bajo exposición hídrica

observada es similar en ambos medios; la velocidad de degradación y en la magnitud de la pérdida en propiedades mecánicas son muy similares.

En la Figura 3a, la resistencia a la tensión parte de un valor cercano a 50 MPa y disminuye conforme aumenta la absorción de agua. Para las muestras expuestas en agua destilada, la disminución de la de resistencia presenta una caída abrupta en la región inicial, entre 0 y aproximadamente 0.4 % de absorción, seguida de una disminución más gradual entre 0.4 y 1.5%, y finalmente una nueva reducción acelerada a contenidos de humedad más altos, cercanos a 1.7-1.8%. Las muestras inmersas en agua de mar siguen una tendencia semejante. En valores de agua cercanos a 2 %, la resistencia desciende hasta valores alrededor de 27-31 MPa, lo que representa una reducción mecánica muy significativa respecto al valor inicial.

En la Figura 3b, el módulo elástico muestra una disminución menos abrupta que la resistencia a la tensión. El valor inicial del módulo de elasticidad tuvo un valor cercano a los 2600 MPa. Este valor disminuyó gradualmente alrededor de 2525-2545 MPa a contenidos de agua mayores. En ambos medios se observó un comportamiento similar. La pérdida de rigidez es menos abrupta que la pérdida de resistencia, lo que sugiere que la absorción de agua afecta primero la capacidad resistente del material antes que su respuesta elástica. Este comportamiento puede deberse a que el agua que se absorbe entra en la red polimérica a través del espacio libre y se une a grupos polares de la estructura epóxica. Este proceso favorece una mayor movilidad de las cadenas, reduce la temperatura de transición vítrea y debilita las interacciones intermoleculares responsables del comportamiento mecánico del material. Como resultado, la resistencia a la tensión presenta una disminución más significativa, debido a que la fractura depende del entrecruzamiento de la red del polímero. En contraste, el módulo elástico, vinculado a la rigidez inicial de la estructura, suele mostrar una degradación menos severa en las primeras fases del envejecimiento. Rudawska (2020) investigó el efecto del envejecimiento en agua desionizada, agua salina y agua de mar en adhesivos de resina epoxica. Encontró que la resistencia mecánica disminuyó debido a la absorción de humedad, mientras que los cambios en el módulo fueron menores. Idrisi et al. (2021) señalaron que la exposición prolongada en agua de mar en materiales compuestos epóxicos produce una pérdida de la resistencia a la tensión, de la deformación y del módulo de elasticidad, debido al hinchamiento de la resina epóxica y a la degradación de la red polimérica.

En ambos medios estudiados se observaron una degradación mecánica del mismo orden, aunque el agua de mar tiende a mostrar valores ligeramente menores. Esto puede deberse a que el agua destilada posee una mayor actividad química y, por ello, frecuentemente favorece una absorción ligeramente mayor; sin embargo, el agua de mar tiene sales e iones que pueden generar efectos adicionales sobre la microestructura y sobre la estabilidad del polímero. Esta dualidad ha sido reportada por Oğuz y Erkliğ (2022). Ellos compararon el envejecimiento en agua destilada y agua de mar materiales poliméricos de resina epóxica y concluyeron que ambos medios degradan las propiedades de sistemas epóxicos, aunque la intensidad de la degradación depende del equilibrio entre absorción total, plastificación y efectos químicos del entorno. Asimismo, Nan et al. (2023), reportó el envejecimiento de materiales compuestos reforzados expuestos a ambientes de agua de mar. Reportaron que la humedad absorbida plastifica la matriz, genera concentración de esfuerzos por hinchamiento y degradación de la estructura de la red polimérica y por ende disminución de la resistencia y rigidez. También, destacaron que no solamente se debe considerar el medio, sino que se debe tomar en cuenta la cantidad total de agua absorbida y la duración del tiempo de la exposición.

En estos resultados también se observaron tres regiones con diferentes tasas de variación cada una. En la primera región, la pérdida rápida de resistencia puede atribuirse a la ocupación del volumen

Efecto de la difusión y degradación mecánica de resina epóxica y un material compuesto de fibra de carbón/resina epóxica bajo exposición hídrica

libre y a la plastificación inicial de la resina. En la segunda, la disminución más lenta puede deberse a que parte de la red reticulada aún conserva su capacidad de transferencia de carga. Finalmente, la tercera región podría asociarse a una degradación más severa del entrecruzamiento, a microcavitación o a daño localizado en la estructura del polímero.

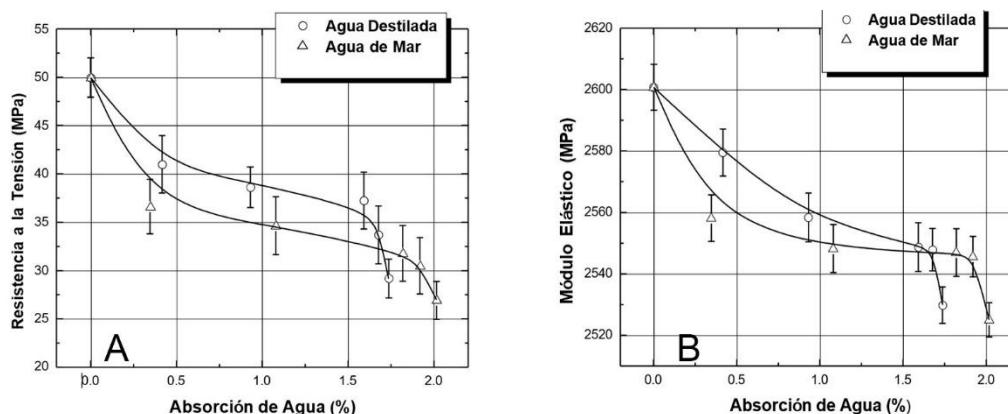


Figura 3. Efecto del contenido de agua absorbida sobre las propiedades mecánicas de la resina epóxica expuesta a dos ambientes higrotérmicos: (A) resistencia a la tensión y (B) módulo elástico.

En la Figura 4a se observa que la resistencia a la tensión del material compuesto disminuye de manera sistemática a medida que aumenta el contenido de agua absorbida. Sin embargo, la cinética de degradación no es igual en ambos medios. En las muestras inmersas en agua destilada, la pérdida de resistencia ocurre con una pendiente más pronunciada, especialmente a valores intermedios de humedad, hasta alcanzar una reducción total cercana al 74%. En contraste, las probetas expuestas a agua de mar muestran una degradación más gradual, con una pérdida final del orden del 47%. Este comportamiento sugiere que, aunque ambos ambientes inducen daño mecánico, el agua destilada ejerce un efecto más severo sobre la resistencia del laminado. Esto puede atribuirse a la mayor actividad del agua en el medio destilado, que favorece la difusión hacia el interior del material, así como su interacción con los grupos polares de la matriz epóxica. La penetración del agua promueve fenómenos de plastificación, hinchamiento y debilitamiento de la red polimérica, que con lleva a una disminución de la transferencia de carga entre matriz y refuerzo. Adicionalmente, el agua puede ocupar los espacios vacíos, defectos y microgrietas originados durante el procesamiento; esto genera concentraciones de esfuerzo que aceleran la iniciación y propagación del daño.

En agua de mar, la absorción también disminuye la resistencia, pero a una velocidad menor. Esto puede explicarse porque la presencia de sales reduce la actividad química del agua y, por tanto, limita parcialmente la cantidad de agua libre que difunde en la matriz. Sin embargo, ello no implica ausencia de daño. Los iones disueltos, principalmente Na^+ y Cl^- , pueden acompañar el proceso de ingreso y contribuir al deterioro de la interfase fibra-matriz. En consecuencia, el medio salino parece generar un efecto dual; por un lado, atenúa la absorción total respecto al agua destilada; por otro, mantiene un proceso continuo de degradación interfacial y microestructural. Por ello, la disminución observada en la resistencia a la tensión indica que la integridad estructural del material compuesto se compromete de manera progresiva conforme aumenta el contenido de humedad, independientemente del medio de exposición.

Efecto de la difusión y degradación mecánica de resina epóxica y un material compuesto de fibra de carbón/resina epóxica bajo exposición hídrica

La Figura 4b muestra que el módulo elástico también disminuye en función del agua absorbida. Las muestras expuestas en agua destilada presentan una disminución abrupta, mientras que las sometidas a agua de mar exhiben una reducción más lenta. Este comportamiento indica que el ingreso de humedad afecta la capacidad de soportar carga y la respuesta elástica inicial del material. La reducción del módulo puede interpretarse como consecuencia de la degradación de la matriz epóxica y de la adhesión interfacial fibra-matriz. Durante la inmersión, moléculas como H₂O, O₂ y CO₂, así como especies iónicas presentes en el agua de mar, pueden penetrar a través de microgrietas, poros y discontinuidades internas, modificando la estructura del polímero y promoviendo la propagación de nuevas microgrietas. Este fenómeno reduce la restricción mecánica que la matriz ejerce sobre las fibras y disminuye la eficiencia del conjunto para resistir deformaciones bajo carga.

Estos resultados muestran que la absorción de agua conduce a una degradación progresiva del comportamiento mecánico del material compuesto laminado de fibra de carbón y resina epóxica, asociada a la plastificación de la matriz polimérica, a la degradación de la interfase fibra-matriz y a la propagación de las microgrietas que conducen a la ruptura final del material.

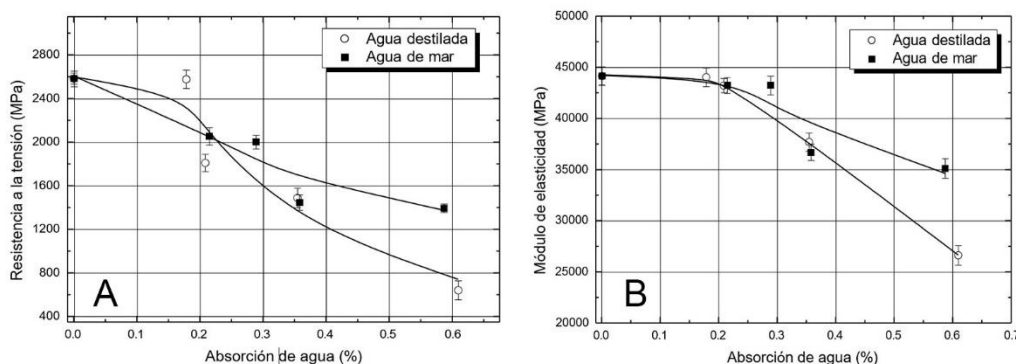


Figura 4. Variación de las propiedades mecánicas del laminado de fibra de carbono/resina epóxica en función del contenido de agua absorbida en agua destilada y agua de mar: (A) resistencia a la tensión y (B) módulo de elasticidad.

CONCLUSIÓN

En esta investigación se evaluó el efecto de la absorción de agua destilada y de mar sobre la cinética de absorción, el ajuste al modelo de Fick y las propiedades mecánicas de ambos materiales. Los resultados mostraron que la degradación hidromecánica depende principalmente de la matriz epóxica y de la calidad de la unión entre la fibra y la matriz. Los resultados obtenidos muestran que la absorción de agua afecta de manera diferente pero consistente al comportamiento higroscópico y mecánico de la resina epóxica y del material compuesto de fibra de carbón y resina epóxica. La resina epóxica presentó una mayor capacidad de absorción que el material compuesto, con mejores resultados en agua destilada que en agua de mar. Esto confirma que la matriz polimérica controla el proceso de difusión del sistema. En el material compuesto se tuvo una menor absorción y el ajuste experimental mostró un adecuado ajuste con el modelo de difusión de Fick en ambos medios. También, se observó en la resina y en el material compuesto una disminución progresiva de la



Efecto de la difusión y degradación mecánica de resina epóxica y un material compuesto de fibra de carbón/resina epóxica bajo exposición hídrica

resistencia a la tensión y del módulo de elasticidad al aumentar el contenido de agua absorbida. La pérdida de propiedades más severa fue en agua destilada para el material compuesto mientras que se tuvo un comportamiento muy similar en ambos medios para la resina. El estudio muestra que pequeñas diferencias en la cantidad de agua absorbida pueden llevar a reducciones mecánicas importantes.

REFERENCIAS

- Aithal, S., Hossagadde, P. N., Kini, M. V., & Pai, D. (2023). Durability study of quasi-isotropic carbon/epoxy composites under various environmental conditions. *Iranian Polymer Journal*, 32(7), 873-885. <https://doi.org/10.1007/s13726-023-01172-x>
- Bel Haj Frej, H., Léger, R., Perrin, D., & Lenny, P. (2021). A Novel Thermoplastic Composite for Marine Applications: Comparison of the Effects of Aging on Mechanical Properties and Diffusion Mechanisms. *Applied Composite Materials*, 28(4), 899-922. <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09903-0>
- Bone, J. E., Sims, G. D., Maxwell, A. S., Frenz, S., Ogin, S. L., Foreman, C., & Dorey, R. A. (2022). On the relationship between moisture uptake and mechanical property changes in a carbon fibre/epoxy composite. *Journal of Composite Materials*, 56(14), 2189-2199. <https://doi.org/10.1177/00219983221091465>
- Chakkour, M., Moussa, M. O., Khay, I., Balli, M., & Ben Zineb, T. (2024). Hygroscopic aging cycles of bamboo fiber/epoxy composites: Comparative study between distilled water and sea water. *Industrial Crops and Products*, 209, 117957. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117957>
- Choudhari, P., Kulkarni, V., & Khandal, S. (2024). Review on Efforts to Improve the Mechanical Performance of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites Under the Marine Environment. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 105(1), 241-269. <https://doi.org/10.1007/s40032-023-01009-9>
- Ghabezi, P., & Harrison, N. M. (2022). Hygrothermal deterioration in carbon/epoxy and glass/epoxy composite laminates aged in marine-based environment (degradation mechanism, mechanical and physicochemical properties). *Journal of Materials Science*, 57(6), 4239-4254. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-06917-2>
- Hong, S. K. (2021). The Effect of Long Term Hygrothermal Aging by Immersion on Carbon/Epoxy Composites Exposed to the Heat Sources for Naval and Marine Applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1117(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1117/1/012018>
- Idrisi, A. H., Mourad, A.-H. I., Abdel-Magid, B. M., & Shivamurty, B. (2021). Investigation on the Durability of E-Glass/Epoxy Composite Exposed to Seawater at Elevated Temperature. *Polymers*, 13(13), 2182. <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/13/2182>
- Massou, M., Babu, N., & Xian, G. (2023). Experimental study on the mechanical properties of CFRP/epoxy composite plates under seawater immersion. *Structures*, 54, 48-57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.042>



Efecto de la difusión y degradación mecánica de resina epóxica y un material compuesto de fibra de carbón/resina epóxica bajo exposición hídrica

- Nan, J., Zhi, C., Meng, J., Miao, M., & Yu, L. (2023). Seawater aging effect on fiber-reinforced polymer composites: Mechanical properties, aging mechanism, and life prediction. *Textile Research Journal*, 93(13-14), 3393-3413. <https://doi.org/10.1177/00405175231152666>
- Oğuz, Z. A., & Erklığ, A. (2022). Hydrothermal aging effect on the tensile properties of hybrid aramid/glass/epoxy composites: Comparison of distilled water and seawater. *Journal of Composite Materials*, 56(24), 3695-3714. <https://doi.org/10.1177/00219983221121850>
- Osa-uwagboe, N., Silberschmidt, V. V., & Demirci, E. (2024). Review on Mechanical Performance of Fibre-Reinforced Plastics in Marine Environments. *Applied Composite Materials*, 31(6), 1991-2018. <https://doi.org/10.1007/s10443-024-10247-8>
- Rudawska, A. (2020). The Effect of the Salt Water Aging on the Mechanical Properties of Epoxy Adhesives Compounds. *Polymers*, 12(4), 843. <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/4/843>
- Torabizadeh, M. A., & Maleki, S. (2024). Mechanical behavior of epoxy resin with graphite additive subjected to water absorption. *Materials Testing*, 66(6), 856-866. <https://doi.org/doi:10.1515/mt-2023-0414>
- Wang, H., Lin, J., Yu, Y., Zuo, X., Liu, Y., Ding, H.,...Bi, Y. (2025). Moisture Absorption Characterization and Mechanical Properties of CFRP Under the Combined Effects of Seawater and Continuous Bending Stress. *Applied Composite Materials*, 32(5), 2013-2033. <https://doi.org/10.1007/s10443-024-10254-9>
- Wong, K. J., Johar, M., Kolor, S. S. R., Petrů, M., & Tamin, M. N. (2020). Moisture Absorption Effects on Mode II Delamination of Carbon/Epoxy Composites. *Polymers*, 12(9), 2162. <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/9/2162>
- Xiong, C., Huang, Y., Jin, Z., Wang, P., & Hu, Y. (2024). Influence of salt concentration and pH value on the degradation of epoxy resin used in FRP bars under simulated marine conditions. *Journal of Building Engineering*, 98, 111405. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111405>
- Zhang, W., Kazemi, E., Arab, B., & Zhang, W. (2025). Ageing of carbon fibre-reinforced polymers (CFRPs) under hygro-thermal-salt conditions. *Journal of Composite Materials*, 59(30), 3367-3379. <https://doi.org/10.1177/00219983251349898>

