InGenio Journal
Revista de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo
https://revistas.uteq.edu.ec/index.php/ingenio
e-ISSN: 2697-3642 - CC BY-NC-SA 4.0

Efecto del tratamiento superficial ante la adherencia de la resina epóxica entre el acero estructural y fibra de carbono unidireccional

(Effect of surface treatment on epoxy resin adhesion between structural steel y unidirectional carbon fiber)

Luis Giovanni Tigmasa Paredes, Carlos Daniel Guerra Chiquito, Jordi Javier Escobar Altamirano, Francisco Agustín Peña Jordán
Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.
ltigmasa3242@uta.edu.ec, cguerra7115@uta.edu.ec, jescobar4720@uta.edu.ec, fa.pena@uta.edu.ec

Resumen: En la actualidad, la tecnología ha permitido desarrollar materiales alternativos que reemplazan en ciertas aplicaciones a los materiales convencionales. Uno de estos materiales es la fibra de carbono unidireccional, la cual es utilizada para el reforzamiento de estructuras existentes, ya sean de acero u hormigón, el medio de unión de la fibra de carbono y el acero es la resina epóxica. Específicamente en estructuras de acero se ha detectado problemas de adherencia en la interfaz acero y resina epóxica. Diferentes tipos de tratamientos de limpieza superficial aplicados sobre el acero se utilizan para determinar el grado de adherencia en la interfaz entre la resina epóxica y el acero estructural, mediante ensayos de tensión a juntas traslapadas simples. Se logro identificar que la rugosidad es una variable importante en la resistencia de la junta. Para modificar la rugosidad se aplicó diferentes métodos de limpieza superficial, obteniendo distintas rugosidades. Los mejores resultados para la resistencia a la adherencia fueron los tratamientos de limpieza: disco de cerdas de acero y granallado. Por medio de esta investigación determinó la resistencia a la adherencia para aplicaciones prácticas para el reforzamiento de estructuras de acero.

Palabras clave: Desplazamiento, reforzamiento, rugosidad, adherencia, falla del adhesivo.

Abstract: Currently, technology has enabled the development of alternative materials that, in certain applications, replace conventional materials. One of these materials is unidirectional carbon fiber, which is used to reinforce existing structures, whether made of steel or concrete. The bonding medium between carbon fiber and steel is epoxy resin. Specifically, in steel structures, adhesion issues have been detected at the steel-epoxy resin interface. Different types of surface cleaning treatments applied to the steel are used to determine the degree of adhesion at the interface between the epoxy resin and structural steel through tensile tests on simple lap joints. It was identified that roughness is a key variable in joint strength. To modify roughness, different surface cleaning methods were applied, resulting in various roughness levels. The best results for adhesion strength were obtained with the cleaning treatments using a steel-bristle disc and shot blasting. Through this research, the adhesion strength for practical applications in steel structure reinforcement was determined.

Keywords: Displacement, reinforcement, roughness, adhesion, adhesive failure.

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades físicas y mecánicas que presentan los materiales compuestos, se han constituido como ventajas ante los materiales convencionales, ante lo cual se usan ampliamente para aplicaciones en el campo de la ingeniería civil, mecánica, aeroespacial y biomédicas [1].

DOI: https://doi.org/10.18779/ingenio.v8i2.942
Recibido (Received): 2024/07/29
Aceptado (Accepted): 2025/04/15

Estas ventajas han permitido fomentar el uso para la fabricación de implementos deportivos y el reemplazo de partes de maquinaria que usualmente se fabricaban de materiales metálicos [2]. Los compuestos poliméricos reforzados con fibra de carbono superan el rendimiento, comparado con otros materiales, son usados en aplicaciones de alta tecnología nanoelectrónicas, estructurales y médicas [3]. Específicamente, en el campo de la ingeniería civil, la fibra de carbono se utiliza para reforzar vigas metálicas de puentes peatonales reforzadas con fibra de carbono. Los resultados mostraron un incremento del 46 % de la resistencia a flexión [4]; también se estudió el efecto que produce el reforzar las vigas de hormigón con fibra de carbono, cuyo incremento de resistencia fue de 108,8 % [5]. El reforzamiento consiste en el incremento parcial o total de la resistencia mecánica de una estructura [6], mediante la aplicación de láminas de unidireccionales, previamente fabricadas las cuales se apilan y se unen por medio de una matriz epóxica, hasta formar platinas de determinado espesor [7].

Aunque el material compuesto con fibra de carbono mejora la resistencia a flexión, el incremento de la deformación elástica puede provocar la separación en la intercara acero fibra, en su mayoría ocurre en los extremos de la fibra de carbono, debido a la concentración de esfuerzos o también debido al control de curado del adhesivo epóxico [4], [8], [9]. La rugosidad de la superficie donde se aplicara el reforzamiento con fibra de carbono tiene relación directa con la calidad de las propiedades adhesivas en la intercara acero fibra [10], [11]. La rugosidad del sustrato depende del tratamiento superficial, la cual es una variable dominante en la adhesión inicial entre el adhesivo y los sustratos de acero [12].

Una manera de unir la fibra de carbono al acero, es mediante una resina epóxica la cual creara una unión adhesiva con el sustrato [13]. Las uniones adhesivas presentan muchas ventajas en comparación con otras uniones tradicionales como las uniones soldadas, debido a que ofrecen una unión continua con distribución homogénea de tensiones, además son capaces de unir materiales metálicos y materiales compuestos [14]. La unión adhesiva entre la fibra de carbono y el material a reforzar, consiste en aplicar resina epóxica entre los materiales a unir [15]. Existen varios tipos de uniones adhesivas, entre las cuales se destacan la unión adhesiva estructural, las cuales soportan esfuerzos significativos, razón por la que son útiles para reforzamiento estructurales [16]. Para representar la unión entre el acero y la fibra de carbono unidireccional, se usó la junta traslapada simple, debido a que es la que con mayor precisión reproduce las condiciones de trabajo, la cual describe una falla por esfuerzo cortante de la unión adhesiva, a través del desprendimiento de la interfaz [14], [17]. Las fallas en las uniones adhesivas pueden ser: adhesivas, la cual consiste en la falla de la interfaz del sustrato y adhesivo; cohesivas, la cual consiste en la fractura del adhesivo al romper las fuerzas de cohesión [18].

En la presente investigación se ensayan juntas traslapadas simples entre el acero estructural y fibra de carbono unidireccional, unido mediante adhesivo epóxico; cada grupo de probetas se aplicarán diferentes tratamientos de limpieza en el acero, con el objetivo de determinar las rugosidades que otorguen el mayor grado resistencia, por lo tanto, verificar la mejor adherencia de la junta epóxica.

2. METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Los ensayos de tensión se ejecutaron con acero estructural ASTM A36, fibra de carbono unidireccional y resina epóxica; las propiedades se encuentran desde la Tabla 1 a la Tabla 3, respectivamente.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero ASTM A36.

Material	Densidad [kg/m^3]	Módulo de elasticidad [MPa]	Coeficiente de Poisson	Limite a la cedencia [MPa]	Límite de tracción [MPa]	Ductilidad
A36	7.890	200.000	0,3	250	400	0,283

Tabla 2. Propiedades mecánicas de la fibra de carbono unidireccional.

Material	Módulo de elasticidad [GPa]	Relación de Poisson	Módulo de corte [GPa]
E 230	230	0,23	9

Tabla 3. Propiedades mecánicas de la resina epóxica.

Módulo de elasticidad [GPa]	Relación de Poisson	Módulo de corte [GPa]
3,78	0,35	1,4

2.2. Equipos

2.2.1. Ensayo de tracción

La máquina para ejecutar los ensayos de tracción es Metrotest STH-2.000/, la capacidad de carga es de 400 kN a 2.000 kN. Precisión en la medición de la carga: ± 0,5 %.

2.2.2 Medición de rugosidad

Rugosímetro Mitutoyo SJ-210, precisión de 0,2 um a 1,6 µm.

2.2.3 Equipos para el tratamiento de limpieza de superficies

- Equipo de granallado.
- Amoladora angular.
- Equipo de accionamiento eléctrico para el proceso de chorro de cerdas

2.2.4. Medición de peso de la resina epóxica

Balanza digital con precisión de 0,05lb/0,02kg.

2.2.5. Consumibles

- Disco abrasivo
- Disco de cerdas de acero
- Disco de lija #100

2.3. Métodos

2.3.1. Probetas

Las probetas están formadas por una parte de acero y otra parte de fibra de carbono unidireccional. Los distintos tratamientos de limpieza para obtener una de las superficies rugosas, se identifican como: SDC, limpieza con disco de lija; GDC, limpieza con disco de desbaste; MC, limpieza manual; BC, limpieza con granalla; BB, limpieza con disco de cerdas de acero inoxidable.

Las dimensiones de solapamiento se estimaron según la norma ASTM D1002, Ecuación 1.

$$L = Fy * \frac{t}{\tau} \quad (1)$$

Donde:

L: longitud de solapamiento [in]
Fy: Limite de cedencia del material mas débil [psi]
t: Espesor del acero [in]
τ: Resistencia media al cizallamiento estimada de la union adhesiva [psi], corresponde al 150% de la fuerza cortante del adhesivo epoxico.

Las dimensiones calculadas para todas las probetas se muestran en la Figura 1.

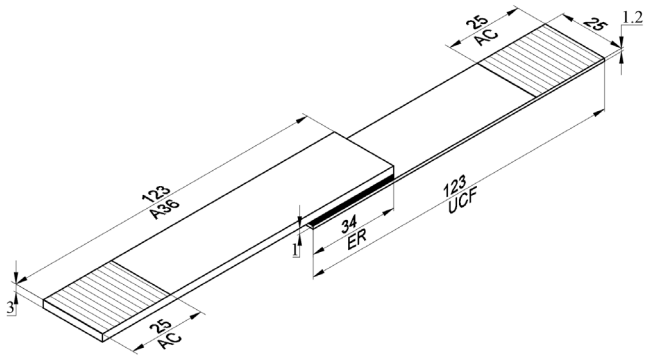

Figura 1. Dimensiones de las probetas. AC: área para sujetar en las mordazas de la máquina de ensayos; ER: resina epóxica; UCF: fibra de carbono unidireccional; A36: acero ASTM A36.

2.3.2. Preparación de las superficies y juntas simples

Las superficies de contacto en el acero de las probetas se prepararon con distintos métodos de limpieza para obtener las distintas rugosidades en la superficie del acero. Las superficies con distintos tipos de limpieza se identifican en la Tabla 4. Para cada tratamiento de limpieza superficial se prepararon 5 probetas. Se aplicó una presión de curado de la resina de 42 kPa, con un tiempo de reposo de 72 horas. La mezcla de la resina epóxica se preparó con una relación de 3 a 1 en peso, medido en una balanza digital.

Tabla 4. Tratamiento limpieza aplicado a la superficie de contacto en el acero.

Tratamiento	Limpieza	Aplicación	Parámetros
SDC	Disco de lija # 100	Amoladora angular	12.000 RPM
GDC	Disco de desbaste	Amoladora angular	12.000 RPM
MC	Manual	Cepillo de alambre	Hasta eliminar impurezas
BC	Granalla	Equipo de granallado	820 Pa, granalla metálica: S780 – 2mm
BB	Disco de cerdas de acero	Equipo de accionamiento eléctrico	2.300 RPM

2.3.3. Aplicación de los ensayos

Posterior a la limpieza superficial, se midieron las rugosidades en el acero de cada una de las probetas. Se obtuvieron los resultados correspondientes a cada probeta, según el tratamiento de limpieza superficial aplicado. Luego de aplicar la resina epóxica para unir el acero con la fibra de carbono, y tras el tiempo de curado manteniendo la presión en cada una de las juntas, se realizó el ensayo de tracción. La velocidad de aplicación de la carga axial fue de 1,3 mm/min.

3. RESULTADOS

Los resultados de rugosidad de cada tratamiento superficial se presentan en la Figura 2. Se observa que existe una gran diferencia en el tratamiento de granallado y la limpieza con disco de cerdas, en comparación a los demás tratamientos superficiales.

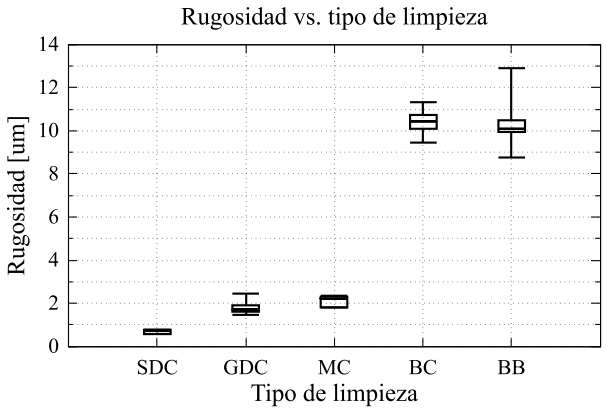

Figura 2. Resultados de rugosidad según el tipo de limpieza de superficie aplicado.

En las Figuras 3, 4, 5, 6 y 7 se muestran los resultados del ensayo de tensión para cada una de las limpiezas superficiales, donde se puede verificar que las mayores resistencias se presentan en las probetas tratadas con granallado y con disco de cerdas. En cada una de estas Figuras se observa el desplazamiento registrado ante la fuerza aplicada. Se evidencia que la limpieza con granallado y disco de cerdas metálicas poseen mayor resistencia en comparación a los demás métodos, según las Figuras 6 y 7.

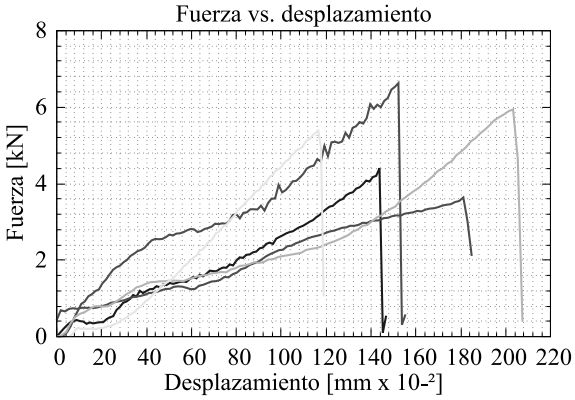

Figura 3. Resultados del ensayo de tracción de las probetas limpiadas con disco de lija.

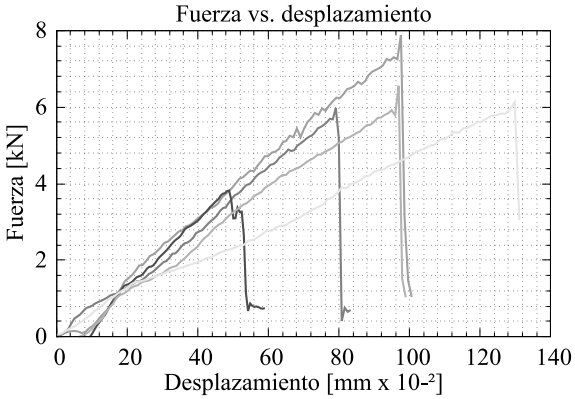

Figura 4. Resultados del ensayo de tracción de probetas con limpieza de disco abrasivo.

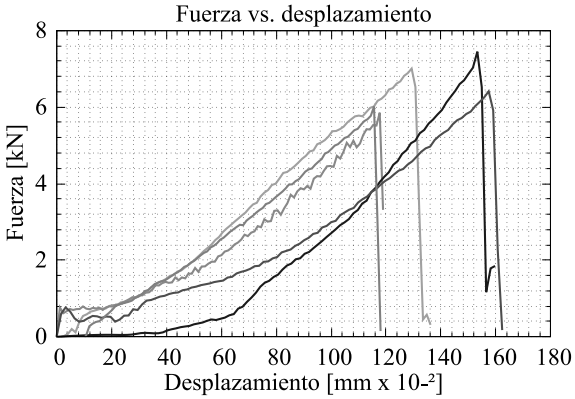

Figura 5. Resultados del ensayo de tracción para probetas con limpieza manual.

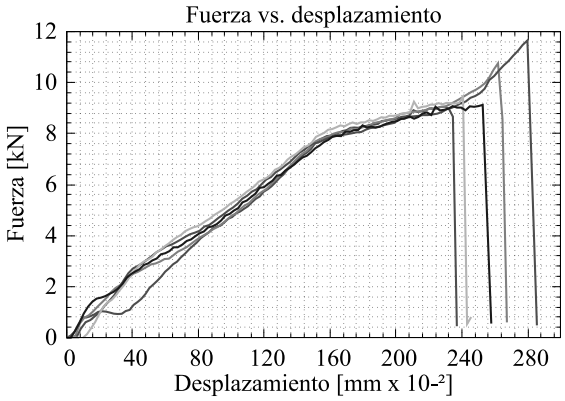

Figura 6. Resultados del ensayo de tracción de las probetas con limpieza por granallado.

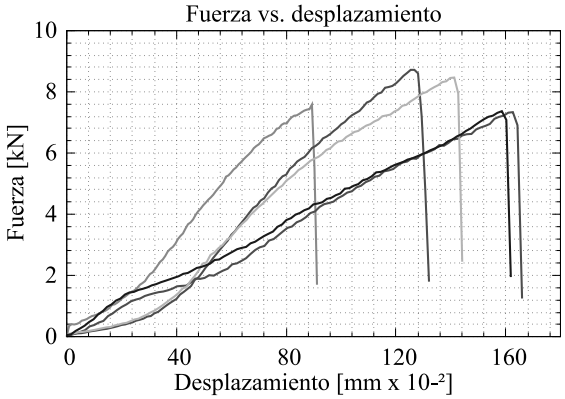

Figura 7. Resultados del ensayo de tracción de probetas con limpieza por disco de cerdas de acero.

Los resultados de esfuerzo cortante se presentan en la Figura 8. Las mayores resistencias ante esfuerzos cortantes se en las probetas con limpieza superficial mediante granallado.

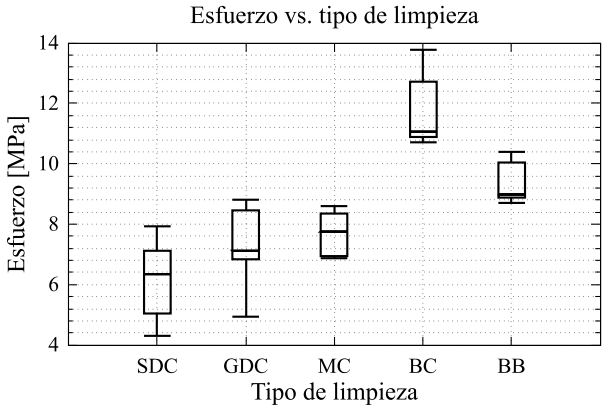

Figura 8. Resultados de esfuerzos cortantes en función del tipo de limpieza aplicada en las superficies.

El tipo de falla adhesiva se presentó en las probetas con limpieza superficial: manual, con disco abrasivo, con disco de lija y con disco de cerdas, mientras que la combinación de fallas adhesiva y cohesiva se presentó en las probetas con limpieza mediante granallado. En las Figuras 9, 10 y 11 se identifican, respectivamente, las fallas descritas.

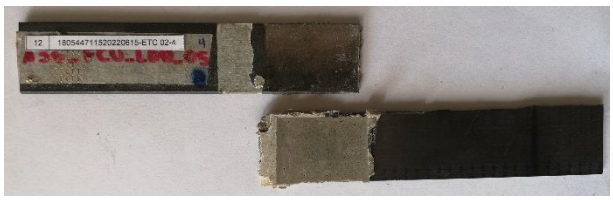

Figura 9. Fallas de adherencia, se produjeron en probetas con limpieza superficial: manual, disco abrasivo, disco de lija.

Figura 10. Falla adherencia/cohesión, se produjeron en las muestras con limpieza superficial por granallado.

Figura 11. Fallas adhesivas, se produjo en muestras con limpieza superficial por disco de cerdas.

4. DISCUSIÓN

En la investigación "Propiedades mecánicas de una selección de adhesivos epoxi y Uniones Adhesivas de Chapas de Acero" [19]. La investigación indica que existe una rugosidad máxima aproximada de 12 um, dio un valor de esfuerzo de entre 6 a 14 MPa; sin embargo, no especifica el tipo de tratamiento de limpieza aplicado a la superficie.

Mientras que en la investigación "Influencia de la rugosidad de la superficie y del espesor de la línea de unión en el rendimiento de adhesión de juntas adhesivas epóxicas sobre sustratos de acero al carbono" [20], aborda los tratamientos superficiales utilizados mediante lijas y granallado con óxidos de aluminio, muestran rugosidades promedio va desde 0,2 a 8,52 um. El esfuerzo máximo obtenido es para el tratamiento con el óxido de aluminio 20, dyo un resultado de esfuerzo de la junta entre 9 y 12 MPa. Las fallas predominantes en las juntas son fallas adhesivas y cohesivas. Estas fallas se presentan de manera similar comparado con el método de granallado y disco de cerdas analizado en la presente investigación.

Los resultados obtenidos muestran una tendencia similar comparado con otras investigaciones, sin embargo, es importante conocer la rugosidad superficial según el tipo de limpieza, debido a que el propósito es tener una base practica para posteriores investigaciones enfocadas al refuerzo de estructuras de acero utilizando fibra de carbono y resina epóxica.

5. CONCLUSIONES

Para los tratamientos de limpieza superficial propuestos en esta investigación, se evidencia proporcionalidad entre la rugosidad y la resistencia de la junta; es decir, entre mayor es la rugosidad, mayor es la resistencia.

En las Figuras 3, 4, 5 y 7, se observa que los tratamientos de limpieza superficial SDC, GDC, MC y BB no poseen una tendencia aproximada en las curvas que se forman con los datos de fuerzas y desplazamientos. Sin embargo, en la junta con limpieza superficial BC (Figura 6), la tendencia de los resultados es aproximada; esto se debe a que los tratamientos de limpieza superficial son ejecutados directa o indirectamente de manera manual, a excepción del tratamiento de limpieza superficial BC.

En la Figura 2, donde se presentan los resultados de rugosidad según el tipo de limpieza de superficie aplicado, se observa que se presentan dos grupos cuyos resultados son aproximados.

El primer grupo son los tratamientos superficiales SDC, GDC y MC, los cuales son menores en comparación al grupo con tratamiento de limpieza superficial BC y BB.

La combinación de falla adhesiva/cohesiva se presenta en las probetas con superficies granalladas (BC), lo cual evidencia que este tratamiento de limpieza superficial produce mejores resultados. Presenta una falla cohesiva, es decir, la falla de la junta es en la resina epóxica y no de la interfaz del sustrato resina, evidenció que la rugosidad del tratamiento de limpieza con granallado (BC) tiene la mayor resistencia en comparación a los demás métodos utilizados.

En aplicaciones prácticas para reforzamientos estructurales, el tratamiento de limpieza con granallado (BC), es complicado debido a que requiere de equipamiento adecuado, tanto para el proceso como para la seguridad de quien opera el equipo de granallado. Razón por la cual es evidente la ventaja del tratamiento superficial mediante disco de cerdas (BB), puesto que se usa equipos manuales, lo que facilita los trabajos de limpieza de forma práctica. Mediante esta diferencia se recomienda investigar más acerca de las adherencias que se pueden obtener con el tratamiento de limpieza usando disco de cerdas (BB).

REFERENCIAS

[1] E. Monaldo, F. Nerilli, and G. Vairo, "Basalt-based fiber-reinforced materials y structural applications in civil engineering", *Composite Structures,* vol. 214, pp. 246–263, apr. 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.002

[2] V. H. Martínez-Lyeros, S. Y. Vargas-Islas, C. E. Cruz-González, S. Barrera, K. Mourtazov, and R. Ramírez-Bon, "Studies on the influence of surface treatment type, in the effectiveness of structural adhesive bonding, for carbon fiber reinforced composites", *Journal of Manufacturing Processes,* vol. 39, pp. 160–166, mar. 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.02.014

[3] K. Shirvanimoghaddam *et al.,* "Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes y properties", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,* vol. 92, pp. 70-96, jan. 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.032

[4] S. Selvaraj, and M. Madhavan, "Retrofitting of steel beams using low-modulus carbon fiber reinforced polymer laminates", *Journal of Constructional Steel Research,* vol. 167, apr. 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105825

[5] A. Sakbana, and M. Masreib, "Finite element analysis of CFRP–reinforced concrete beams", *Revista ingeniería de construcción,* vol. 35, no. 2, pp. 148–169, aug. 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.4067/S0718-50732020000200148

[6] M. M. Theurer, and J. Rodriguez, "Las fibras de carbono como una alternativa para reforzamiento de estructuras", *Ingeniería*, vol. 20, no. 1, pp. 57–62, 2016. [Online]. Available: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46750927006

[7] Y. S. Mohamed, and A. Abdelbary, "Theoretical y experimental study on the influence of fiber orientation on the tensile properties of unidirectional carbon fiber/epoxy composite", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 67, pp. 693–705, mar. 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.12.058

[8] A. Al-Ridha, A. Atshan, K. Mahmoud, and Q. Hameed, 2019, "Effect of strengthening of steel beams with variable length by using carbon fiber", *Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 1, aug. 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1155/2019/1631692

[9] A. Paz Carvajal, L. M. Rios Gamboa, F. Casanova García, A. Leyton Virgen y J. J. García Alvarez, "Fabricación y caracterización mecánica de un laminado de fibra de carbono en matriz de resina epoxi", *Scientia et Technica*, vol. 22, no. 3, 2017, pp. 262-

267, sep. 2017. [En línea]. Disponible en: https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/15081

[10] J. Shi, B. Jia, Y. Ren, X. Zhang, and J. Luo, "Study on the interface constitutive relation between carbon fiber fabric y steel", Materials, vol. 13, no. 15, jul. 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/ma13153263

[11] A. Guzanová, J. Brezinová, D. Draganovská, and F. Jaš, "A study of the effect of surface pre-treatment on the adhesion of coatings", *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 28, no. 17, pp. 1754–1771, sep. 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/01694243.2014.920762

[12] J. P. B. van Dam, S. T. Abrahami, A. Yilmaz, Y. Gonzalez-Garcia, H. Terryn, and J. M. C. Mol, "Effect of surface roughness y chemistry on the adhesion y durability of a steel-epoxy adhesive interface", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 96, jan. 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102450

[13] A. Al-Saidy, F. W. Klaiber, A. H. Al-Saidy, F W Klaiber, and T. J. Wipf, "Repair of Steel Composite Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates", *Journal of Composites for Construction*, vol. 8, no. 2, pp. 163–172, mar. 2004. [Online]. Available: https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:2(163)

[14] P. Galvez, A. Quesada, M. A. Martinez, J. Abenojar, M. J. L. Boada, and V. Diaz, "Study of the behaviour of adhesive joints of steel with CFRP for its application in bus structures", *Composites Part B: Engineering*, vol. 129, pp. 41–46, nov. 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.018

[15] A. Uthaman, G. Xian, S. Thomas, Y. Wang, Q. Zheng, Aand X. Liu, "Durability of an epoxy resin y its carbon fiber-reinforced polymer composite upon immersion in water, acidic, y alkaline solutions", *Polymers*, vol. 12, no. 3, mar. 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/polym12030614

[16] R. G. Budynas, and J. K. Nisbett, *Shigley's mechanical engineering design*, 9na edición, McGraw-Hill New York, 2012, pp. 476-480

[17] M. U. Sahin, and M. Dawood, "Experimental Investigation of Bond between High-Modulus CFRP y Steel at Moderately Elevated Temperatures", *Journal of Composites for Construction*, vol. 20, no. 6, dec. 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000702

[18] C. J. Higginson, K. G. Malollari, Y. Xu, A. V. Kelleghan, N. G. Ricapito, and P. B. Messersmith, "Bioinspired Design Provides High-Strength Benzoxazine Structural Adhesives", *Angewandte Chemie,* vol. 131, no. 35, pp. 12399–12407, jul. 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/ange.201906008

[19] A. Rudawska, "Mechanical Properties of Selected Epoxy Adhesive y Adhesive Joints of Steel Sheets", *Applied Mechanics*, vol. 2, no. 1, pp. 108–126, mar. 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/applmech2010007

[20] D. Zhang, and Y. Huang, "Influence of surface roughness y bondline thickness on the bonding performance of epoxy adhesive joints on mild steel substrates", *Progress in Organic Coatings*, vol. 153, apr. 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106135

Copyright (2025) © Luis Tigmasa Paredes, Carlos Guerra Chiquito, Jordi Escobar Altamirano y Francisco Peña Jordán. Este texto está protegido bajo una licencia internacional Creative Commons 4.0. Usted es libre para compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato. También podrá adaptar: remezclar, transformar y construir sobre el material. Ver resumen de la licencia.