

CULCYT

CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA • ISSN 2007-0411



VOLUMEN 18 | NÚMERO 2

MAYO - AGOSTO 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

DIRECTORIO:

Mtro. Juan I. Camargo Nassar
RECTOR

Dr. Daniel Constandse Cortez
SECRETARIO GENERAL

Dr. Juan F. Hernández Paz
DIRECTOR DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Mtro. Jesús Meza Vega
DIRECTOR GENERAL DE COMUNICACIÓN UNIVERSITARIA



CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Revista de investigación en ingeniería e innovación tecnológica | ISSN 2007-0411

COMITÉ EDITORIAL

Dra. Nelly Gordillo Castillo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
Editora en Jefe

Mtro. Raúl Alfredo Meza González
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
Coordinador Editorial

Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Ramón Gerardo Guevara González
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Dra. Klavdia Oleschko Lutkova
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Abdiel Ramírez Reyes
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dra. Santos Adriana Martel Estrada
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dr. David Cortés Sáenz
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dr. David Ortega Gaucin
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

[DOI: 10.20983/culcyt.2021.2](https://doi.org/10.20983/culcyt.2021.2)

Modalidad de publicación continua. Tan pronto como un artículo ha sido preparado, se publica en línea.

Los trabajos a publicar en CULCYT deben ser originales e inéditos. En este momento, la revista no tiene costos de publicación para los autores.

El acceso a la revista es libre, sin requerimientos, bajo lo establecido en la normatividad mexicana de acceso abierto, y se da a través de su sitio

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt>

o mediante el Repositorio Institucional de la UACJ

<http://ri.uacj.mx/vufind/>



Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores.

Se autoriza la reproducción total o parcial, siempre y cuando se cite la fuente.

Información para autores:

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/autores>

Los contenidos e imágenes de la publicación están sujetos a una licencia CC 4.0 internacional BY NC.



CULCYT se fundó en diciembre de 2003 como parte del programa para la formación de investigadores del Instituto de Ingeniería y Tecnología.

Lanzó su primer número en abril de 2004. Fundador: Dr. Victoriano Garza Almanza. A partir de 2019, ha fungido como Editora en Jefe la Dra. Nelly Gordillo Castillo.



CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, vol. 18, núm. 2, mayo-agosto 2021, es una publicación académica, editada de manera cuatrimestral por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, a través del Instituto de Ingeniería y Tecnología. D.R. © UACJ, Avenida del Charro núm. 619 norte, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Teléfono +52 (656) 6884848. Sitio OJS: erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt. Correo electrónico: culcyt@uacj.mx. Editora responsable: Dra. Nelly Gordillo Castillo. Reserva de derecho al uso exclusivo No. 04-2021-060118164700-203, ISSN (electrónico) 2007-0411, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

CONTENIDO

CONTENTS

Artículo de revisión

Comparación de métodos de optimización para un experimento con múltiples variables de respuesta

Optimization methods comparison for an experiment with multiple response variables

4

Artículo de investigación

Uso de PRFC para mejorar las propiedades mecánicas del concreto: una revisión

Knowledge brokering: Building the bridge to close the gap between scientific research and practice

14

DOI: 10.20983/culcyt.2021.2.2.1

Comparación de métodos de optimización para un experimento con múltiples variables de respuesta

Optimization methods comparison for an experiment with multiple response variables

Judith Mendoza-Gallardo¹, Luis Alberto Rodríguez-Picón¹, Luis Carlos Méndez-González¹

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

RESUMEN

Dentro del proceso de experimentación estadística existen ciertas variables que en conjunto determinan las condiciones ideales de múltiples variables de respuesta. Un reto importante dentro de la optimización de modelos creados a partir de experimentos recae precisamente en las situaciones en que la calidad de un producto es función de múltiples variables de respuesta y dadas estas condiciones resulta necesario establecer estrategias precisas que permitan optimizar todas las respuestas a la vez. En este trabajo se experimentó con tres métodos de optimización con el propósito de encontrar el mejor de ellos y la estrategia capaz de optimizar las funciones que consisten en más de una característica crítica. El objetivo del artículo es encontrar la estrategia capaz de arrojar las condiciones óptimas de dos variables de respuesta, condicionadas por restricciones iniciales. Los resultados de optimización obtenidos a través de los métodos considerados fueron similares en cuanto al logro de los objetivos de optimización planteados.

PALABRAS CLAVE: múltiples variables de respuesta; programación no lineal; optimización; experimento.

ABSTRACT

In the process of statistical experimentation there are certain variables that determine the ideal conditions for multiple response variables. An important challenge in the optimization of models created from experimental designs relies precisely in situations where the quality of a product is a function of multiples response variables; under these circumstances it is necessary to establish precise strategies that allow optimizing all the response variables as a whole. Within this article, three optimization methods are experimented with in order to find the best method and strategy able to optimize the functions, which consist of more than one critical characteristic. The objective of the article is to find the optimal strategy capable of delivering the optimal conditions of two response variables, conditioned by initial restrictions. The optimization results obtained through the methods considered were similar in terms of achieving the proposed optimization objectives.

KEYWORDS: multiple response variables; non-linear programming; optimization; experiment.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Luis Alberto Rodríguez Picón
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chih., México
CORREO ELECTRÓNICO: luis.picon@uacj.mx

Fecha de recepción: 22 de octubre de 2021. **Fecha de aceptación:** 10 de junio de 2021. **Fecha de publicación:** 19 de junio de 2021.



I. INTRODUCCIÓN

Desde los años 80 y hasta el día de hoy, el *diseño de experimentos* se ha fijado en un método de confianza, hasta convertirse en una herramienta fundamental para la resolución de problemas en muchos ámbitos de la vida industrial [1].

Es común realizar pruebas en diferentes ámbitos prácticos, ya sea para la resolución de alguna inconformidad o para efectuar una comprobación de hipótesis, por ejemplo, hacer cambios en la composición de cierto producto, realizar modificaciones en la temperatura de cocción para algún platillo, optimizar el funcionamiento de un equipo para la fabricación de algún producto, etc.

Dentro del ramo industrial siempre ha existido la imperante necesidad de analizar en conjunto ciertos factores, contemplando siempre la probabilidad de que el efecto de un componente varíe según el nivel de los restantes, es decir, que exista una correlación. En la actualidad se reconoce al diseño de experimentos (DOE, por sus siglas en inglés), como una excelente herramienta capaz de lograr la optimización de los valores de respuesta mediante la combinación más eficaz de componentes [2].

Se reconoce este método como la manera más eficaz de realizar experimentaciones, pues básicamente identifica las pruebas necesarias para conseguir un resultado óptimo y confiable obtenido mediante un análisis, lo cual permitirá la resolución de ciertos problemas o la consecución de mejoras tangibles. En la práctica se presentan una variedad de situaciones y problemas que afectan el desarrollo de cierta actividad, por lo cual existen muchos diseños experimentales. Por ello, resulta imprescindible elegir el método adecuado para cada condición.

En pocas palabras, el diseño de experimentos consiste en planear y realizar un conjunto de pruebas con el objetivo de generar datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionan evidencias objetivas que permitan responder a las interrogantes planteadas por el experimentador sobre determinada situación [3].

Por lo general, solo se considera una variable de respuesta, lo que da origen a una optimización simple. Sin embargo, en muchos casos, la calidad de los procesos está representada por diversas características de interés.

En estos casos se consideran modelos de optimización para múltiples variables de respuesta y el objetivo es definir un conjunto de factores que proporcionen la mejor mediación simultánea de las múltiples variables de respuesta para alcanzar, de esta forma, la calidad global de un producto [4].

La mayoría de los productos fabricados en la industria cuentan con una o más características de calidad que podrían considerarse de suma importancia para el consumidor. Por ejemplo, una pieza fabricada por el método de inyección de plástico se identifican las dimensiones críticas como características de calidad, en el caso de que se aplique un cambio en algún parámetro, verbigracia, una alteración en la presión de la línea que pudiese ocasionar una variación en el resultado de dichas características en proporciones diferentes.

Por otra parte, mediante la modificación en el diseño de la línea o los componentes es posible reducir la variación de ciertas dimensiones críticas. Por ende, es preferible tratar de generar cambios en el diseño del proceso, ya que, de esta manera, es probable disminuir la variación en una de las variables de respuesta sin afectar de manera negativa el resultado de otra [5].

A menudo, tanto en la industria como en muchas áreas científicas, se obtienen datos sobre múltiples variables de respuesta para un nivel dado de un conjunto de variables controlables. Un experimento en el cual un número de variables respuestas se miden simultáneamente para cada nivel de un conjunto de variables controlables se denomina un experimento de múltiples variables de respuesta [6].

Las variables que puedan afectar las características de calidad individuales no deben experimentarse apartadas de los efectos que puedan tener en otras características de calidad importantes, es decir, deben considerarse conjuntamente los efectos de los cambios en las variables de diseño del proceso en todas las características de calidad importantes. Es necesario, entonces, encontrar métodos y estrategias que permitan optimizar los procesos de fabricación de productos que consisten en más de una característica crítica de calidad y/o por más de un parámetro de proceso crítico [5].

Teóricamente, las técnicas de optimización con múltiples variables de respuesta consisten en seleccionar los niveles óptimos de factores, con el fin de optimizar todas

las respuestas a la vez. Sin embargo, en la práctica esta situación puede resultar compleja, ya que es probable que se presente un conflicto producto de alguna interacción. En la literatura se han presentado aportaciones importantes en el área de optimización de múltiples respuestas. He *et al.* [7] propusieron una estrategia de optimización robusta basada en funciones de deseabilidad, de manera conjunta con el método de búsqueda simplex para encontrar las múltiples respuestas óptimas. Shamsudeen *et al.* [8] y Jambhale *et al.* [9] consideraron diferentes esquemas de experimentación para optimizar múltiples parámetros de un proceso de soldadura por fricción-agitación de punto. Kilic *et al.* [10] asumieron la metodología de superficie de respuesta (MSR) y el análisis envolvente de datos para optimizar el ácido fólico y el volumen de pan simultáneamente. Awad *et al.* [11] tomaron en cuenta la MSR y un enfoque de optimización multiobjetivo para la optimización de mezclas de combustible y aceite de fusel con diferentes contenidos de agua. Mia [12] y Achuthamenon *et al.* [13] presentaron esquemas de optimización multiobjetivo para un proceso de fresado y aunque consideraron diferentes esquemas de experimentación, optimizaron a través de funciones de deseabilidad.

En este artículo se presenta una comparación de tres métodos de optimización encontrados en la literatura que son comúnmente utilizados cuando se estudian procesos con múltiples variables de respuesta. Se considera un modelo ajustado a partir de un experimento factorial, así como un conjunto de restricciones de interés para estudiar los resultados obtenidos del método de programación no lineal, funciones de deseabilidad y la superposición de gráficos de contorno.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección II se presenta y describe el método considerado en el presente artículo; en la sección III se muestra el análisis estadístico del experimento bajo estudio con la finalidad de obtener los modelos ajustados, así como los resultados en cuanto a la comparación de los diferentes métodos analizados y, por último, en la sección IV se exponen las conclusiones.

A. Métodos de optimización para experimentos con múltiples variables de respuesta

Existen diferentes técnicas para la optimización de múltiples variables de respuesta, las cuales se presentan a continuación.

Método gráfico

Dentro de la *programación lineal* se manipulan solo dos factores y, por ende, resulta fácil trazar las superficies de respuesta, aunque este método resulta complejo al operar más de dos factores, puesto que las superficies no se pueden dibujar de una sola vez. En estos casos, resulta posible realizar el análisis tomando dos factores a la vez y fijando a los restantes [14].

El *método gráfico* de optimización simultánea consiste en ajustar los modelos y sobreponer dos curvas de nivel de cada superficie sobre diferentes cortes bidimensionales de un cubo, de tal manera que la ubicación específica de un corte está dictada por el valor obtenido del tercer factor, esto para cada sección [15].

El punto óptimo general se representa como una esfera en algún lugar del cubo y en cada una de las hojas de corte se describe una circunferencia, cuyo centro intercepta a la circunferencia más grande. De esta manera es posible identificar el sitio óptimo [14].

Funciones de deseabilidad

El método consiste en definir una función en el espacio de factores que mide la deseabilidad global (DG) del producto predicha en cada punto, transformando de esta manera el problema de optimización multivariado en univariado, y solo basta maximizar dicha deseabilidad global para obtener el punto óptimo [16]. En general, el método tiene la finalidad de encontrar las condiciones de operación de un conjunto de factores que provean las respuestas más deseables.

Para cada variable de respuesta $y_i(x)$, una función de deseabilidad individual asigna números entre 0 y 1 para los posibles valores de y_i , con $d_i(y_i) = 0$, representando un valor completamente indeseado de y_i y $d_i(y_i) = 1$, valor de la respuesta completamente deseable. Una vez calculadas las k deseabilidades individuales, se obtiene DG como la media geométrica [17]:

$$DG = \{d_1(y_1) \times d_2(y_2) \times \dots \times d_k(y_k)\}^{1/k} \quad (1)$$

en donde $i = 1, 2, \dots, k$ denota el número de variables de respuesta. En aplicaciones prácticas de este método se considera utilizar respuestas ajustadas \hat{y}_i . Las funciones de deseabilidad individual se pueden encontrar en la li-

teratura dependiendo de la necesidad de minimizar o maximizar el conjunto de respuestas [18], [19].

El punto óptimo simultáneo es el punto

$$X_0 = (X_{10}, X_{20}, \dots, X_{p0}) \quad (2)$$

sobre el cual la función DG es máxima [10].

Programación no lineal

Se considera *programación no lineal* al conjunto de métodos utilizados para optimizar una función objetivo, sujeta a una serie de restricciones en las que una o más de las variables incluidas es no lineal. Si la función objetivo o alguna de las restricciones llegan a ser no lineales y las variables solo consiguen tomar valores enteros no negativos, entonces se dice que el modelo matemático pertenecerá al campo de la programación no lineal entera [20].

Los problemas con estas características surgen de forma inevitable en algunas aplicaciones de ingeniería, tales como diseño y control óptimo. Existen muchos tipos de problemas de programación no lineal dependiendo de las características de estas funciones, por lo que se han desarrollado distintos algoritmos para poder así resolver los distintos problemas. Para ciertos casos donde las funciones tienen formas sencillas, los problemas pueden llegar a resolverse de manera relativamente eficiente y en algunos otros, cuando se consideran modelos de mayor orden o con interacciones de un gran nivel, el proceso de optimización resulta complejo.

Cuando un problema de programación no lineal cuenta con solo una o dos variables, puede ser representada en forma gráfica. Si las funciones no son lineales, se trazan algunas curvas en lugar de rectas, por lo que la función objetivo y la región factible dejarán de mostrar el semblante que llevan en la programación lineal [21].

De manera general, este método de optimización tiene el siguiente planteamiento:

$$\begin{aligned} & \text{mín } f(x) \\ & \text{s. a.} \\ & l_h \leq h(x) \leq U_h \\ & l_x \leq x \leq U_x \end{aligned} \quad (3)$$

En donde, $f(x)$ representa la función objetivo, x el conjunto de factores a optimizar y $h(x)$ un modelo formulado a partir de x .

II. METODOLOGÍA

En la **Figura 1** se presenta un diagrama de flujo que refleja el método considerado para el estudio presentado en este artículo. A continuación, se describe de manera general cada paso.

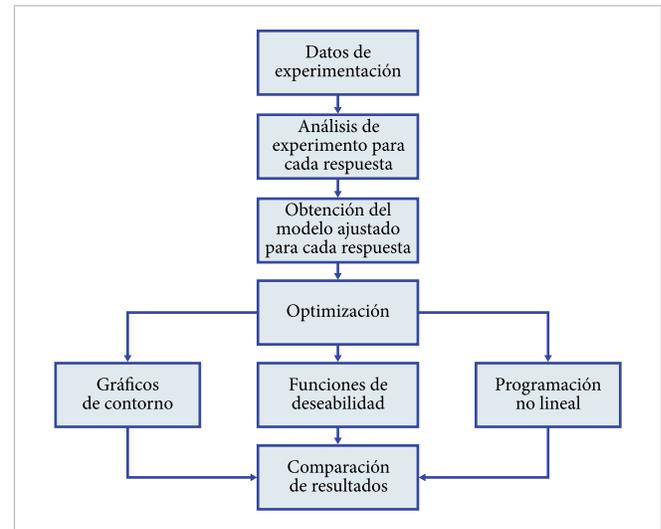


Figura 1. Método considerado en el presente estudio.

Datos de experimentación. De manera general, este paso consiste en llevar a cabo alguna estrategia de experimentación apropiada. La intención es disponer de un conjunto de datos obtenidos bajo condiciones controladas, con la finalidad de establecer un modelo apropiado que describa el proceso de interés. En este artículo se considera un experimento presentado en la literatura que considera múltiples variables de respuesta.

Análisis de experimento para cada respuesta. Este paso de método consiste en llevar a cabo un análisis estadístico del experimento para cada respuesta, que consiste en definir qué términos de este resultan significantes para cada respuesta, así como verificar el comportamiento de residuos con la finalidad de validar los modelos que se pretende ajustar.

Obtención del modelo ajustado para cada respuesta. En este paso se formulan los modelos a partir de los coeficientes de regresión ajustados para cada variable de respuesta.

Optimización. En este paso se llevan a cabo las tres estrategias de optimización presentadas en la sección I. Para los métodos de gráficos de contorno y funciones de deseabilidad se usa el software Minitab®, mientras que para el método de programación no lineal se considera el software estadístico R.

Comparación de resultados. Por último, se realiza una comparación de los resultados obtenidos y de igual manera se discuten los valores óptimos encontrados para cada respuesta.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se considera un experimento que consiste en tres variables controlables y en el que cada una de ellas es observada en dos niveles, los cuales se encuentran codificados de tal manera que -1 supone un nivel bajo mientras que +1 representa un nivel alto. En los niveles codificados, los valores actuales de las variables controlables son equivalentes a cero.

Como se muestra en la **Tabla 1**, para cada combinación propia de las tres variables controlables, son observadas cuatro réplicas de las dos variables de respuesta. Dada esta condición, para llevar a cabo el experimento se empleó un diseño de 2^3 para las variables controlables con cuatro réplicas de la respuesta bivariada presente. Para este ejercicio en particular, el ruido experimental se manifiesta sencillamente por la variabilidad aleatoria, ya que no se cuenta con factores de ruido explícitos.

A. Análisis del experimento para cada respuesta

A continuación, se presenta el análisis de los experimentos para las dos respuestas, para lo cual se consideró Minitab®.

La **Figura 2** presenta el gráfico obtenido al realizar la prueba de normalidad de residuales para la primera respuesta Y_1 , en donde se observa que no existe un comportamiento diferente al normal, puesto que con un nivel de significancia de 0.05, se dictamina que no existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula que asume normalidad.

En la **Figura 3** se muestra a la vez el análisis 4 en 1 para los residuos de la respuesta Y_1 , donde rápidamente es posible detectar la independencia de residuales en el cua-

dro inferior derecho, dado que no hay presencia de tendencias y que los residuales se varían alrededor del cero.

TABLA 1
DATOS DEL EXPERIMENTO [5]

FILA	X_1	X_2	X_3	RÉPLICA	Y_1	Y_2
1	-1	-1	-1	1	109.895	67.6974
2	1	-1	-1	2	100.192	67.0264
3	-1	1	-1	3	106.078	72.9353
4	1	1	-1	4	104.120	72.9878
5	-1	-1	1	5	113.515	68.2934
6	1	-1	1	6	98.735	67.0955
7	-1	1	1	7	103.145	71.6818
8	1	1	1	8	104.454	76.9003
9	-1	-1	-1	1	109.759	67.2374
10	1	-1	-1	2	99.634	66.1779
11	-1	1	-1	3	105.642	72.8508
12	1	1	-1	4	104.802	74.2487
13	-1	-1	1	5	111.121	68.4693
14	1	-1	1	6	99.357	63.6112
15	-1	1	1	7	106.959	76.2657
16	1	1	1	8	105.029	77.0322
17	-1	-1	-1	1	110.704	67.9620
18	1	-1	-1	2	100.269	66.5778
19	-1	1	-1	3	105.670	72.5756
20	1	1	-1	4	104.203	73.9371
21	-1	-1	1	5	112.854	68.9576
22	1	-1	1	6	102.842	68.9470
23	-1	1	1	7	107.620	77.4958
24	1	1	1	8	99.786	67.9890
25	-1	-1	-1	1	109.773	66.9268
26	1	-1	-1	2	100.600	67.9431
27	-1	1	-1	3	105.393	72.3752
28	1	1	-1	4	104.335	73.2824
29	-1	-1	1	5	106.666	64.7051
30	1	-1	1	6	94.235	62.4188
31	-1	1	1	7	103.440	76.3739
32	1	1	1	8	104.923	75.7691

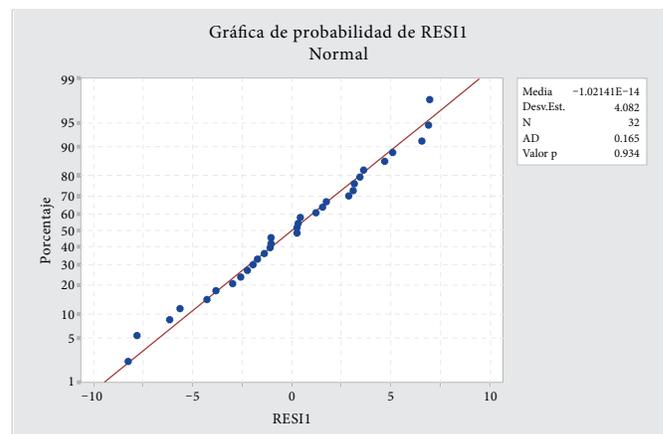


Figura 2. Gráfico de normalidad de residuales Y_1 .

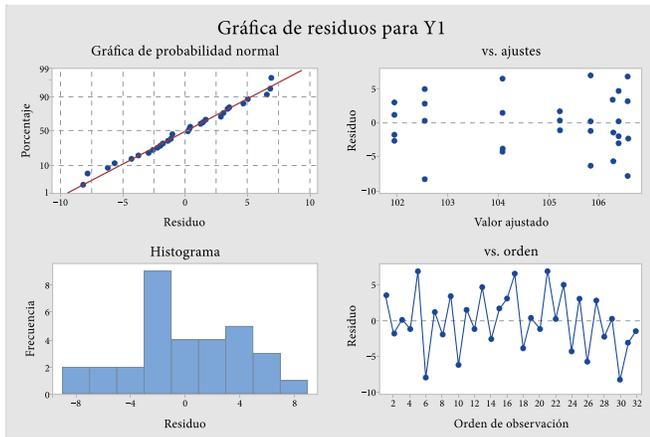


Figura 3. Independencia de residuoses Y_1 .

La **Tabla 2** presenta los resultados del análisis de varianza (ANOVA) donde, dado un nivel de significancia de 0.05, se puede notar que ninguno de los términos analizados es significativo al encontrar que todos los correspondientes valores p son mayores que el nivel de significancia de 0.05.

TABLA 2
ANOVA PARA Y_1

FUENTE	GL	SC AJUST.	MC AJUST.	VALOR F	VALOR p
Modelo	7	92.834	13.2620	0.62	0.737
Lineal	3	79.977	26.6592	1.24	0.317
X_1	1	64.454	64.4538	3.00	0.096
X_2	1	0.367	0.3670	0.02	0.897
X_3	1	15.157	15.1566	0.70	0.410
Interacciones de 2 términos	3	12.822	4.2740	0.20	0.896
$X_1 \times X_2$	1	3.386	3.3859	0.16	0.695
$X_1 \times X_3$	1	9.092	9.0919	0.42	0.522
$X_2 \times X_3$	1	0.344	0.3442	0.02	0.900
Interacciones de 3 términos	1	0.034	0.0344	0.00	0.968
$X_1 \times X_2 \times X_3$	1	0.034	0.0344	0.00	0.968
Error	24	516.423	21.5176		
Total	31	609.256			

La variable de respuesta Y_2 fue sometida al mismo análisis, en primera instancia, a una prueba de normalidad para residuos, donde con un nivel de significancia de 0.05 y dado un valor p de 0.532 no existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, la cual enuncia la normalidad de residuos (**Figura 4**).

Para la prueba de independencia, se interpretó el análisis 4 en 1 (**Figura 5**), donde se puede observar la falta de tendencia y la presencia de movimientos oscilantes alrededor del 0, lo cual es una característica del supuesto de independencia.

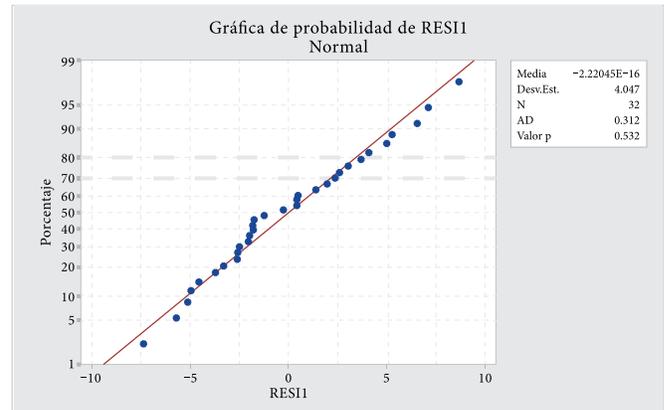


Figura 4. Gráfico de normalidad de residuoses Y_2 .

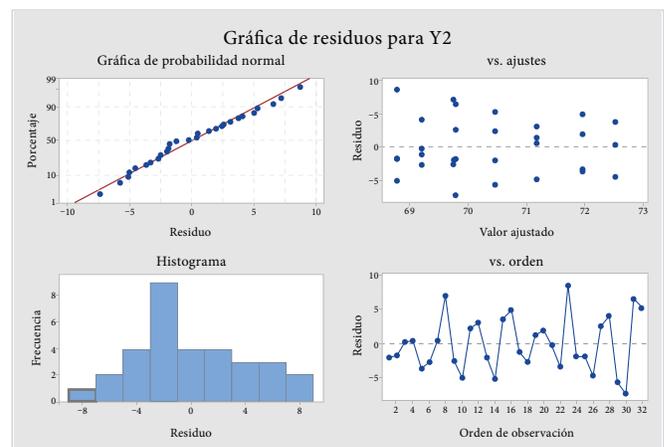


Figura 5. Independencia de residuoses Y_2 .

La **Tabla 3** presenta el resultado del ANOVA. De igual manera, al considerar un nivel de significancia de 0.05 se puede notar que ninguno de los términos es significativo, dado que en todos se tiene un valor p mayor que 0.05.

TABLA 3
ANOVA PARA Y_2

FUENTE	GL	SC AJUST.	MC AJUST.	VALOR F	VALOR p
Modelo	7	50.235	7.1765	0.34	0.928
Lineal	3	22.299	7.4331	0.35	0.788
X_1	1	1.363	1.3629	0.06	0.802
X_2	1	9.915	9.9147	0.47	0.500
X_3	1	11.022	11.0219	0.52	0.477
Interacciones de 2 términos	3	18.808	6.2695	0.30	0.828
$X_1 \times X_2$	1	0.213	0.2133	0.01	0.921
$X_1 \times X_3$	1	4.646	4.6460	0.22	0.644
$X_2 \times X_3$	1	13.949	13.9491	0.66	0.425
Interacciones de 3 términos	1	9.128	9.1277	0.43	0.518
$X_1 \times X_2 \times X_3$	1	9.128	9.1277	0.43	0.518
Error	24	507.691	21.1538		
Total	31	557.926			

Con el objetivo de establecer una relación cuantitativa entre las variables y de esta manera llevar a cabo predicciones ajustadas, a continuación se muestran las ecuaciones de regresión para las variables Y_1 y Y_2 respectivamente, donde se expone como el comportamiento de la variable dependiente es dictado por una o más variables independientes.

$$Y_1 = 104.867 + 1.419X_1 + 0.107X_2 - 0.688X_3 - (0.325X_1 \times X_2) + (0.533X_1 \times X_3) - (0.104X_2 \times X_3) + (0.033X_1 \times X_2 \times X_3) \quad (4)$$

$$Y_2 = 70.451 + 0.206X_1 - 0.557X_2 + 0.587X_3 + (0.082X_1 \times X_2) - (0.381X_1 \times X_3) - (0.660X_2 \times X_3) - (0.534X_1 \times X_2 \times X_3) \quad (5)$$

B. Optimización de múltiples variables de respuesta

A continuación, se muestra el proceso de optimización mediante la optimización restringida. En general, para este tipo de problemas con múltiples variables de respuesta son utilizados algoritmos de programación no lineal, estrategia que radica en definir la función de una respuesta como función objetivo a optimizar y definir valores objetivos o límites para las demás funciones. En este caso se cuenta con el siguiente planteamiento:

$$\begin{aligned} &\text{máx } Y_1 \\ &\text{s. a.} \\ &71 \leq Y_2 \leq 75 \\ &-1 \leq X_1 \leq 1 \\ &-1 \leq X_2 \leq 1 \\ &-1 \leq X_3 \leq 1 \end{aligned} \quad (6)$$

En este problema se encuentra como función objetivo el maximizar la función Y_1 sujeta a Y_2 con límites entre 71 y 75. Para finalizar, se definieron restricciones para X_1 , X_2 y X_3 y como límites los valores mínimos y máximos de experimentación para cada factor que son -1 y 1 .

El problema de optimización puede ser solucionado a través del uso de diversos algoritmos de programación no lineal. Para este caso se recomienda el uso de un software especializado como RStudio, que fue elegido para este caso de estudio.

En primer lugar, se programó un algoritmo para poder encontrar los resultados óptimos (Tabla 4). El paquete seleccionado fue Rsolnp, el cual está basado en el método de multiplicadores de Lagrange aumentado [22].

TABLA 4
ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN R SOLNP

```
Código para optimización restringida de
múltiples variables de respuesta
#Cargar paquete
library(Rsolnp)
##Creación de las funciones de los modelos
cuadráticos para las dos respuestas
y1= function (x) {
return(-1*(104.867+(1.419*x[1])+(0.0107*x[2])-(
0.688*x[3])-(0.325*x[1]*x[2])+
(0.533*x[1]*x[3])-(0.104*x[2]*x[3])+(0.033*x[1]*
x[2]*x[3])) )
}
y2= function (x) {
70.451+(0.206*x[1])-(0.557*x[2])+(0.587*x[3])+(0
.082*x[1]*x[2])-(
0.381*x[1]*x[3])-(0.660*x[2]*x[3])-(
0.534*x[1]*x[2]*x[3]) }
## Definición de restricciones
# Restricciones para las funciones de la
variable de respuesta y2
ineqc= function (x) { c(y2(x)) }
ineqc.ub=c(75)
ineqc.lb=c(71)
# Restricciones para los factores x1 x2 y x3
x.lb= c(-1,-1,-1)
x.ub= c(1,1,1)
## Optimización de función
os= solnp(pars=c(-1,0.2,1.1), fun=y1,
ineqfun=ineqc, ineqLB=ineqc.lb, ineqUB=ineqc.ub,
LB=x.lb, UB=x.ub)
## Obtener resultados
#Niveles de factores
x=os$pars
x
#Respuesta estimada en los niveles óptimos de
los factores
cbind(x,c(-y1(x),y2(x)))
x[1]=-1
x[2]=0.2
x[3]=1.1
y2=70.451+(0.206*x[1])-(
0.557*x[2])+(0.587*x[3])+(0.082*x[1]*x[2])-(
0.381*x[1]*x[3])-(0.660*x[2]*x[3])-(
0.534*x[1]*x[2]*x[3])
```

Como resultado, se obtuvieron los valores siguientes: $X_1 = -1.0$, $X_2 = 0.2$, $X_3 = 1.1$, $Y_1 = 102.14190$ y $Y_2 = 71.15428$, cuya interpretación indica un nivel de optimización aceptable, debido a que los objetivos previamente planteados fueron alcanzados, principalmente con base en la maximización de la función Y_1 . Por otra parte, el valor de la variable Y_2 se encuentra dentro de los límites establecidos.

Una vez resuelta la optimización mediante el software Rstudio, se llevó a cabo el cálculo de las funciones de deseabilidad y gráficos de contorno, los cuales se ejecutaron en el software Minitab®, con los que se alcanzaron los resultados siguientes.

En el gráfico de contornos que se muestra en la Figura 6 fue obtenido mediante el uso de Minitab®, se puede visualizar una región de color blanco, la cual indica una región factible y cumple con todas las restricciones orientadas de manera gráfica, donde cualquier valor para X_1 y X_2 se considera una respuesta óptima.

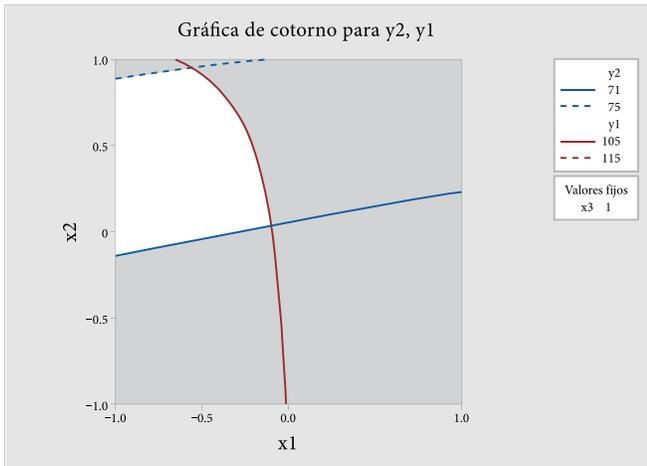


Figura 6. Gráfico de contornos superpuesto.

Las funciones de deseabilidad que se muestra en la Figura 7 fueron obtenidas también mediante el uso de Minitab®. Se puede notar que para las diferentes variables se obtuvo lo siguiente: $X_1 = -1.0$, $X_2 = 0.3737$, $X_3 = 1.0$, $Y_1 = 107.0909$ y $Y_2 = 72.9969$, lo cual indica una conveniente optimización, ya que fue posible alcanzar los objetivos, donde el valor de la función es el máximo posible Y_1 mientras que el valor de la función Y_2 se encuentra dentro de los límites señalados. De igual manera, en las variables se logró un efecto dentro de los límites asignados.

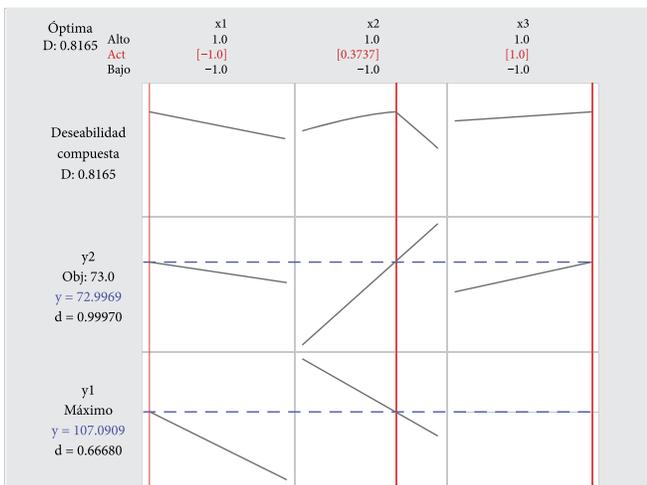


Figura 7. Gráfico de las funciones de deseabilidad.

C. Comparación de resultados

Al considerar los resultados obtenidos, tal como se observan en la Tabla 5, mediante la experimentación de las tres estrategias se puede afirmar que los tres métodos lograron los objetivos y restricciones establecidas. Por tanto, se concluye que cualquiera de los métodos es apto para optimizar ciertas variables.

TABLA 5
COMPARACIÓN DE RESULTADOS

	PROGRAMACIÓN NO LINEAL	FUNCIONES DE DESEABILIDAD	GRÁFICO DE SUPER CONTORNOS
Y_1	102.14190	107.0909	Véase la Figura 6
Y_2	71.15428	72.9969	Véase la Figura 6
X_1	-1.0	-1.0	-1.0
X_2	0.2	0.3737	0.2
X_3	1.1	1.0	1.0

Se puede observar que el método de funciones de deseabilidad proporcionó un valor máximo mayor para Y_1 , estableciéndose así como el preferible para la realización de este tipo de situaciones, ya que también se observa que Y_2 resultó dentro de las restricciones donde debía ser mayor a 71 y menor a 75.

Por supuesto, el método gráfico no tiene la ventaja de proporcionar valores específicos de los factores que optimizan las variables de respuesta, sino que presentan solo una región óptima que el analista podría considerar para elegir un conjunto de puntos óptimos. Por otra parte, los métodos de funciones de deseabilidad y programación no lineal tienen la gran ventaja de presentar valores específicos de los diferentes factores para optimizar las múltiples respuestas. Definitivamente, un siguiente paso consistiría en validar los valores óptimos encontrados con la intención de comprobar el logro de las variables de respuesta óptimas.

IV. CONCLUSIONES

El diseño de experimentos es conocido como una excelente herramienta apta para lograr la optimización de ciertas respuestas mediante la combinación de distintas variables. En este artículo se presentan distintas estrategias que pueden ser aplicadas para lograr este tipo de cuestiones.

Entre ellas se encuentra el método gráfico, que es factible porque se utilizaron dos factores, dejando fijo el tercero. Las funciones de deseabilidad consisten prácticamente

en un método donde es necesario definir una función que mide la deseabilidad con el fin de transformar un problema de optimización con múltiples variables de respuesta a un problema de optimización univariado. Por último, se menciona la programación no lineal, que es el conjunto de métodos utilizados para optimizar una función objetivo, sujeta a ciertas restricciones en las que una o más de las variables es no lineal.

El objetivo de la aplicación de los métodos fue maximizar la función objetivo Y_1 , respetando los límites establecidos para las distintas variables. El primero consiste en la aplicación de un algoritmo por medio del software RStudio, el cual se presenta como un paquete capaz de proveer un entorno donde es fácil de realizar un análisis de los datos obtenidos. La relevancia de la investigación reside en la capacidad para aplicar una estrategia experimental que permite obtener condiciones operativas deseables, frente a variables con cierto grado de correlación. En los tres métodos presentados, los resultados de optimización que se generan son similares.

Definitivamente, la gran mayoría de los productos cuentan con más de una característica crítica, las cuales por lo regular se encuentran correlacionadas, lo que genera que en algunas ocasiones los cambios en los niveles del diseño pueden mejorar una de las características mientras afectan adversamente una o más de las otras.

La situación planteada en el artículo es básicamente teórica, pero los métodos aquí ilustrados pueden ser considerados para la aplicación posterior dentro de la industria, ya que a partir de esta experiencia se pueden llegar a mejorar las condiciones y hacer cambios con el fin de prevenir problemas y reducir la variación. En ese sentido, la planeación experimental es un método importante dentro del repertorio de la ingeniería industrial. Por tal situación, se recomienda que como trabajo futuro se realice cierta comparación de estrategias en una aplicación de la rama industrial.

REFERENCIAS

- [1] G. Ramón, *Diseños experimentales. Apuntes de clase del curso Seminario Investigativo VI*, Antioquía: Universidad de Antioquía, 2015, pp. 1-38.
- [2] H. Gutiérrez-Pulido y R. Vara-Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*, 2.ª ed. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2008.

- [3] M. J. Cervantes y T. F. Engstroöm, "Factorial Design Applied to CFD", *J. Fluids Eng.*, vol. 126, no. 5, sept. 2004, doi: 10.1115/1.1792277.
- [4] L. V. Bacio, "Optimización Multi-Objetivo en el Problema de Metodología de Superficie Multi-Respuesta", tesis de maestría, Centro de Investigación en Matemáticas, A. C., Guanajuato, Gto., México, 2007. [En línea]. Disponible: <https://cimat.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1008/69/2/TE%20221.pdf>
- [5] J. J. Pignatiello Jr., "Strategies for Robust Multiresponse Quality Engineering", *IIE Trans*, vol. 25, no. 3, pp. 5-15, 1993, doi: 10.1080/07408179308964286.
- [6] T. K. Trinh y L. S. Kang, "Response surface methodological approach to optimize the coagulation-flocculation process in drinking water treatment", *Chem Eng Res Des*, vol. 89, no. 7, pp. 1126-1135, 2011, doi: 10.1016/j.cherd.2010.12.004.
- [7] Z. He, J. Wang, J. Oh y S. H. Park, "Robust optimization for multiple responses using response surface methodology", *Appl. Stoch. Models Bus. Ind.*, vol. 26, no. 2, pp. 157-171, mar. 2010, doi: 10.1002/asmb.788.
- [8] S. Shamsudeen y J. E. R. Dhas, "Optimization of Multiple Performance Characteristics of Friction Stir Welded Joint with Grey Relational Analysis", *Mater. Res.*, vol. 21, no. 6, Nov. 2018, doi: 10.1590/1980-5373-mr-2017-1050.
- [9] S. Jambhale, S. Kumar y S. Kumar, "Multi-response optimization of friction stir spot welded joint with grey relational analysis", *Mater. Today: Proc.*, vol. 27, pp. 1900-1908, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.830.
- [10] D. Kilic, M. Ebegil, H. Bayrak, B. Ozkaya y B. Apaydin, "Optimization Of Multi Responses Using Data Envelopment Analysis: The Application in Food Industry", *Gazi Univ. J. Sci.*, vol. 32, no. 3, pp. 1083-1090, sept. 2019, doi: 10.35378/gujs.394984.
- [11] O. I. Awad et al., "Response surface methodology (RSM) based multi-objective optimization of fusel oil -gasoline blends at different water content in SI engine", *Energy Convers. Manag.*, vol. 150, pp. 222-241, oct. 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.07.047.
- [12] M. Mia, "Multi-response optimization of end milling parameters under through-tool cryogenic cooling con-

- dition”, *Measurement*, vol. 111, pp. 134-145, dic. 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2017.07.033.
- [13] P. Achuthamenon Sylajakumari, R. Ramakrishnasamy, G. Palaniappan y R. Murugan, “Multi-response Optimization of End Milling Parameters for Al-Zn-Mg/SiC Co-continuous Composite Using Response Surface Methodology”, *Materials Science*, vol. 25, no. 4, pp. 471-477, jun. 2019, doi: 10.5755/j01.ms.25.4.21000.
- [14] R. De la Vara-Salazar y J. Domínguez-Domínguez, “Métodos de superficie multirespuesta: un estudio comparativo”, *Rev. Mat.*, vol. 9, no. 1, pp. 47-65, 2002, doi: 10.15517/rmta.v9i1.209.
- [15] M. R. Hasniyati, H. Zuhailawati y S. Ramakrishnan, “A statistical prediction of multiple responses using overlaid contour plot on hydroxyapatite coated magnesium via cold spray deposition”, *Procedia Manuf.*, vol. 19, pp. 181-188, 2016, doi: 10.1016/j.proche.2016.03.091.
- [16] S. I. Rudnykh y V. I. López-Ríos, “Elección de la función de deseabilidad para diseños óptimos bajo restricciones”, *Revista EIA*, vol. 15, no. 30, pp. 13-24, 2018, doi: 10.24050/reia.v15i30.903.
- [17] X. Chen y J. Chen, “Optimization of the Impeller Geometry for an Automotive Torque Converter Using Response Surface Methodology and Desirability Function”, *Open J. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 07, 2020, doi: 10.4236/ojapps.2020.107032.
- [18] E. Hazir, E. S. Erdinler y K. H. Koc, “Optimization of CNC cutting parameters using design of experiment (DOE) and desirability function”, *J. For. Res.*, vol. 29, pp. 1423-1434, 2018, doi: 10.1007/s11676-017-0555-8.
- [19] R. Świercz, D. Oniszczyk-Świercz y T. Chmielewski, “Multi-response optimization of electrical discharge machining using the desirability function”, *Micromachines*, vol. 10, no. 1, 2019, doi: 10.3390/mi10010072.
- [20] R. Cantú-Cuéllar, “Programación no lineal”, tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, N. L., México, 1996. [En línea]. Disponible: <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1080072405.pdf>
- [21] E. Del Castillo, *Process Optimization: a Statistical Approach*. Boston, MA: Springer Science+Business Media, LLC, 2007.
- [22] S. Kawakita et al., “Evaluation of non-linear wheat development models and optimization methods for their parameter determination”, *J. Agric. Meteorol.*, vol. 75, no. 2, 2019, doi: 10.2480/agrmet.D-18-00034.

DOI: 10.20983/culcyt.2021.2.3.1

Uso de PRFC para mejorar las propiedades mecánicas del concreto: una revisión

Use of CFRP to improve the mechanical properties of concrete: a review

Sócrates Pedro Muñoz Pérez¹, Diego Mauricio Barboza Chunga¹,
Richard Iván Burga Rafael¹

¹ Universidad Señor de Sipán, Perú

ARTÍCULO DE REVISIÓN

RESUMEN

El polímero reforzado con fibra de carbono (PRFC) hoy en día se ha vuelto una alternativa de material de fortalecimiento para las estructuras en la construcción porque mejora las propiedades mecánicas del concreto y aunque es un proceso de fabricación de costo elevado, origina un gran beneficio para la estructura de concreto armado (CA). El objetivo de este trabajo ha sido revisar la investigación notable publicada en revistas indexadas de los años 2012 a 2021 (41 artículos de Scopus, 7 de EBSCO, 2 de Science Direct y 1 de Redalyc), sobre el uso del polímero reforzado con fibra de carbono en elementos estructurales, como reforzamiento interno o externo, que beneficia a la estructura en su periodo de vida, al impacto ambiental que este produce, al costo del material y al manejo del material in situ.

PALABRAS CLAVE: PRFC; concreto; propiedades mecánicas; impacto ambiental.

ABSTRACT

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) today has become an alternative of strengthening material for structures in construction because it improves the mechanical properties of concrete and although it is a high cost manufacturing process, it originates a great benefit for the reinforced concrete structure (CA). The objective of this work has been to review the remarkable research published in indexed journals from the years 2012 to 2021 (41 articles from Scopus, 7 from EBSCO, 2 from Science Direct and 1 from Redalyc), on the use of fiber reinforced polymer Carbon in structural elements, such as internal or external reinforcement, which benefits the structure in its lifetime, the environmental impact it produces, the cost of the material and the handling of the material in situ.

KEYWORDS: CFRP; concrete; mechanical properties; environmental impact.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Sócrates Pedro Muñoz Pérez
INSTITUCIÓN: Universidad Señor de Sipán
DIRECCIÓN: Km 5 Carretera a Pimentel, C. P. 1400,
Chiclayo - Perú
CORREO ELECTRÓNICO: msocrates@crece.uss.edu.pe

Fecha de recepción: 4 de marzo de 2021. **Fecha de aceptación:** 18 de junio de 2021. **Fecha de publicación:** 29 de junio de 2021.



I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los polímeros reforzados con fibras (PRF) se han usado ampliamente en aplicaciones civiles, especialmente en el campo del mantenimiento y el refuerzo. Se han llevado a cabo un gran número de investigaciones analíticas y experimentales sobre los elementos de concreto armado (CA), a modo de reforzamientos con varillas, tiras o láminas de PRF, para conocer sus comportamientos mecánicos y se han alcanzado logros fructíferos [1].

Estos polímeros se han utilizado en la ingeniería civil para mejorar la capacidad de carga en los muros de corte, pilares y vigas, entre otros elementos estructurales, pues presentan una adecuada relación resistencia-peso, resistencia a la tensión y durabilidad [2], e incluso alta resistencia a la corrosión, por lo cual los materiales PRF se utilizan a menudo para el refuerzo en elementos estructurales de concreto armado que se encuentran expuestos a la humedad [3].

Una parte a considerar en las edificaciones de concreto armado existentes son los diseños con códigos estructurales antiguos, siendo estos vulnerables a eventos extremos, como los terremotos, y por ello se debe considerar la integración de polímeros reforzados con fibra. Debido a sus excelentes propiedades mecánicas, facilidad de aplicación y eficacia, han sido ampliamente contemplados para el reforzamiento en diferentes tipos de edificaciones porque tienen un comportamiento apropiado en las estructuras [2].

Existen diversos tipos de fibras que se pueden agregar al concreto, entre ellos el basalto, el vidrio, la aramida y el carbono. El polímero reforzado con fibra de carbono (PRFC) se caracteriza por un alto módulo de Young equivalente al del acero. Esta propiedad de rigidez favorable hace que el refuerzo de PRFC sea la opción preferida para mantener las deflexiones en las estructuras de los edificios al mínimo, como se requiere en el estado límite de servicio [4].

El peso unitario del PRFC oscila entre 1.5 y 1.7 g/cm³, que es cinco veces más ligero que el del acero convencional y la resistencia a la tensión del PRFC es de 8 a 10 veces mayor que la de este material. Las fibras de PRFC tienen un módulo de elasticidad de 165 GPa y su relación de Poisson es 0.183. Numerosos estudios han descubierto que el concreto reforzado con fibras de carbono tiene

una mayor resistencia a la tensión, una mayor fuerza a las fisuras y una mejor tenacidad en comparación con el concreto con polímeros de otras fibras [5].

Por lo tanto, el uso de polímero reforzado con fibra de carbono posee ventajas como alta resistencia y rigidez, así como plasticidad y durabilidad. Además de las cargas regulares, los fabricantes modernos de PRFC también se preocupan por los fuertes impactos ambientales y accidentales sobre las estructuras de concreto, como terremotos, tornados y explosiones [5].

Las estructuras compuestas reforzadas con fibras se han convertido en materiales de ingeniería muy competitivos en los últimos años y han ido sustituyendo gradualmente a los materiales metálicos convencionales y a otros materiales poliméricos en muchas industrias importantes [6].

II. METODOLOGÍA

En la presente revisión se examinaron bases de datos y en ellas se encontraron los artículos indexados siguientes: 41 en Scopus, 2 en Science Direct, 7 en EBSCO y 1 en Redalyc, de los cuales 14 son de 2021, 28 de 2020, 5 de 2019, 1 de 2018, 1 de 2015, 1 de 2013 y 1 de 2012. Las palabras clave que se han empleado para la búsqueda han sido *polímeros reforzados con fibras de carbono, resina epoxi, polímero reforzado con fibra y sostenibilidad estructural*. A continuación, para un mejor detalle, en la Tabla 1 se presentan los artículos seleccionados, según el año de publicación con respecto a su base de datos.

TABLA 1
ARTÍCULOS REVISADOS, POR BASE DE DATOS

BASE DE DATOS	AÑO							TOTAL
	2012	2013	2015	2018	2019	2020	2021	
Scopus		1		1	5	21	13	41
Science Direct	1					1		2
EBSCO						6	1	7
Redalyc			1					1
Total	1	1	1	1	5	28	14	51

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Origen del polímero reforzado con fibra

La aplicación de elementos compuestos con polímero reforzado con fibra comenzó a finales de la Segun-

da Guerra Mundial en aplicaciones como la aviación, y a finales de los años 80 su uso llegó al sector de la construcción y las infraestructuras. El primer proyecto de investigación sobre la opción de utilizar materiales compuestos de PRF para reforzar estructuras de concreto se remonta al año 1978 en Alemania. Sin embargo, las primeras aplicaciones prácticas tuvieron lugar en Suiza, con el fin de aumentar la capacidad portante a flexión de los puentes de concreto armado [7].

A partir del año 1982 se dieron los primeros estudios en el comportamiento de la columna de concreto confinado con PRF bajo flexión uniaxial [8].

El polímero reforzado con fibra, que se utiliza habitualmente para la rehabilitación, puede aplicarse en el concreto armado tanto en el lado de tensión como en el lado de esfuerzo, con el fin de resistir la corrosión de las barras de acero. En [9], los investigadores abordaron el tema del control de la corrosión de las estructuras de CA y llegaron a la conclusión de que el encamisado favorece la disminución en la tasa de corrosión de estas estructuras.

El sistema de anclaje juega un papel vital en las estructuras reforzadas con PRF y se han desarrollado varios tipos de sistemas de anclaje, por lo cual el refuerzo en una placa de concreto armado es más eficaz debido a su mayor grosor, sin embargo, esto origina que sea difícil de fijarse en la placa de concreto armado [10].

B. Origen de las fibras de carbono

La utilización de polímeros reforzados con fibra de carbono es una tecnología de refuerzo para estructuras de concreto que se ha adoptado en proyectos de rehabilitación y de reforzamiento durante los últimos 25 años [11].

La primera vez que se añadió fibras de carbono de un determinado tamaño y especificación en el concreto, el material se comportó en función de autodetección del esfuerzo interno, la deformación y los daños [12].

Los materiales compuestos de fibra de carbono son materiales ligeros que son adecuados para reducir el peso y tienen gran influencia en las propiedades mecánicas (módulo de Young y tasa de liberación de energía de deformación), por lo tanto, cumple con los requisitos de rendimiento mecánico [13].

Las fibras de carbono se obtienen del tejido de carbono, método que consiste en el entrelazado de filamentos de este material [14].

La forma más empleada para producir fibra de carbono es la siguiente: como primer paso se usa un horno industrial con una temperatura de 300 °C, estirando la materia y originando una formación de las partículas para estabilizar; luego el horno se eleva a una temperatura de 1000 °C, calcinando elementos como el hidrógeno o el nitrógeno y presenta moléculas de carbono orientándose de manera hexagonal a lo extenso de la fibra; y, por último, el horno se eleva a una temperatura de 2000 °C, con la finalidad de aplicar un catalizador que proporciona adherencia a las fibras. El compuesto final son filamentos de carbono con una pureza que van desde del 95% hasta el 99%. Este componente es trefilado a diámetros desde 5-10 µm, siendo cinco veces más delgado que el cabello humano [15]. Por ello, las propiedades de las fibras de carbono no cambian en una atmósfera no oxidante a 2000 °C, a diferencia de la fibra vidrio o fibra de aramida [16].

Las especificaciones técnicas de las fibras de carbono dependen del tipo de precursor y del procedimiento de producción, que son el poliácridonitrilo (PAN) y la carbonización de la fibra de carbono. Se utilizan en diferentes formas de filamentos largos o cortos, picados, molidos, tejidos y esteras no tejidas, para la fabricación de PRFC. Ha dado lugar a muchas aplicaciones para sustituir los materiales como el acero, el aluminio y las aleaciones en diferentes industrias [17].

Los laminados de materiales con fibras de carbono (FC) se encuentran formados por dos componentes destacados: la resina epoxi, que corresponde a la matriz, y los carbonos, que son las fibras. Este compuesto proporciona un apropiado comportamiento hasta en tres direcciones, todo ello en relación a la designación de las fibras [18].

C. Resina epoxi

Las resinas epoxi (RE) son matrices termoendurecibles [19]. En este caso, el material de la matriz del refuerzo de PRFC está compuesto en su totalidad por resina epoxi [4].

Las siguientes propiedades hacen que las resinas epoxicas sean especialmente adecuadas para su uso como sistema de matriz: excelente comportamiento mecánico

y térmico, buena adherencia con la fibra de refuerzo, aceleración del proceso de curado a diferentes temperaturas y baja contracción después de alcanzar el punto de gelificación [6].

Por lo tanto, la resina epóxica se presenta como la matriz de los PRFC porque es una de las matrices de PRF más utilizadas en la ingeniería civil. El PRFC presenta resistencias a la tensión mayores a 350 kg/cm^2 con el concreto [20].

Sin embargo, debido a su propiedad termoestable, los materiales basados en resinas termoestables se destruyen fácilmente por factores mecánicos, químicos, térmicos y de radiación UV, lo que inevitablemente conduce a daños locales y a la generación de microgrietas en el material difíciles de detectar a tiempo [21].

La inserción de una capa intermedia discreta de termoplástico entre las capas adyacentes es una de las estrategias más populares para mejorar la resistencia a la fractura interlaminar del laminado de la fibra de carbono y la resina epoxi (FC/RE). Se han utilizado muchas sustancias para reforzar los laminados, incluidas los nanomateriales de carbono, los termoplásticos y otras. Los materiales para la capa intermedia más frecuentes son los termoplásticos en forma de polvo, película, malla y tela no tejida, que se utilizan para el endurecimiento de esta capa [22].

D. Uso de PRFC

El uso de PRFC se puede dar de dos formas: de refuerzo interno y refuerzo externo.

Los laminados de PRFC en el refuerzo externo se están convirtiendo en los materiales preferidos en las aplicaciones de refuerzo en el concreto armado debido a sus ventajas superiores sobre el revestimiento de acero convencional [23].

La interacción con la superficie del concreto se encuentra compuesto por adhesión, fricción y unión mecánica, y la unión interna se refiere a la transferencia de esfuerzos cortantes desde el interior del elemento estructural, presentando una mayor resistencia [24].

Los tratamientos internos de las varillas de PRFC que se aplican en un refuerzo interno en el CA, muestran una

resistencia mecánica fiable, evitando el deslizamiento interfacial entre el PRFC y el adhesivo epóxico [25].

El encamisado de PRFC, tanto para un refuerzo interno o un refuerzo externo, se utiliza con mayor frecuencia para aumentar las capacidades sísmicas de los pilares y otros elementos estructurales, sin embargo, puede no ser factible debido a problemas de accesibilidad y dar lugar a dimensiones excesivas no deseadas del elemento reforzado [26].

La fibra de carbono no pierde eficacia en sus propiedades ante un ambiente húmedo y caliente, sin embargo, las propiedades de los adhesivos epoxídicos utilizados en los materiales PRF se degradan significativamente en un entorno húmedo y caliente. La resistencia de la unión de los adhesivos disminuye rápidamente cuando se acerca a temperaturas con transiciones vítreas [27].

El proceso del fallo a compresión uniaxial del PRFC se divide en cuatro fases: elástica lineal, de desarrollo estable de grietas, de desarrollo inestable de grietas y descendente, de las cuales las grietas principales cambian de grado de resistencia del concreto y la dosificación de las FC [28].

A continuación, para un mejor detalle, en la Tabla 2 se presenta las propiedades generales de las fibras de acero (FA), fibra de vidrio (FV) y fibra de carbono (FC).

TABLA 2
PROPIEDADES GENERALES DE LAS FIBRAS DE ACERO, DE VIDRIO Y DE CARBONO

FIBRA	RESISTENCIA A LA TENSIÓN (MNPA)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)
Acero	1700	210
Vidrio	2500	72
Carbono	3200	380

E. Ventajas del uso de PRFC

Los PRFC se han utilizado ampliamente en estructuras de ingeniería civil, debido al desgaste de las barras de acero por la corrosión, lo que reduce en gran medida el ciclo de vida de las estructuras de concreto armado. Las ventajas del uso de PRFC para el concreto armado son su resistencia a la corrosión, su peso ligero, su alta resistencia a la tensión y buena durabilidad. Ha atraído una gran atención en el campo de la ingeniería de nuevas construcciones, así como en la rehabilitación de estructuras de ingeniería [29].

F. Aplicación de PRFC en estructuras

Puentes con reforzamiento PRFC

Debido al complejo entorno de la industria del transporte actual, la sobrecarga de grandes camiones se ha convertido en un fenómeno común. Los movimientos de estos grandes vehículos debilitan la seguridad del puente. Por lo tanto, es necesario analizar la respuesta dinámica acoplada vehículo-puente antes y después del reforzamiento con PRFC [30].

Para los puentes de concreto armado o pretensado, existen métodos de reforzamiento establecidos, como el pretensado externo adicional, la inserción de conectores a cortante, concreto adicional en la zona de compresión o aplicación externa de aplicación externa de PRFC en forma de láminas o laminillas. Ello se interpreta en una utilización más eficaz de los requerimientos, presentando un menor peso muerto adicional y una mayor vida útil [31].

Las láminas con polímero reforzado con fibra de carbono se aplican a fin de reforzamiento externo en los componentes débiles, especialmente las vigas de concreto armado que corren un alto riesgo de degradación rápida durante el funcionamiento del puente, debido a los impactos del peso de la superestructura y las cargas del tráfico. Las tensiones normales desarrolladas en una capa de PRFC adherida pueden causar delaminación, como se indica en la norma ACI 440.2R-02 [32].

La aplicación de los cables de PRFC en puentes atirantados se limita principalmente a los puentes de corto alcance y no a los de largo alcance de gran envergadura, debido principalmente al elevado costo de los cables de PRFC, que restringe su aplicación en puentes de gran luz, y a que la rigidez de estos puentes es relativamente baja. Por tanto, la instalación de los cables de PRFC es un reto al aplicarla en el uso constructivo [33].

Pilotes con PRFC

El pilote de concreto armado es una estructura compuesta. El concreto tiene una excelente resistencia a la compresión, pero poca resistencia a la tensión. La resistencia y ductilidad de los pilotes pueden disminuir rápidamente debido a la corrosión del material en ambientes cálidos y húmedos. Los compuestos de PRFC se consideran un nuevo material para superar la debilidad de los pilotes [34].

El reforzamiento que se puede dar a los pilotes es tanto de reforzamiento externo como interno, ofreciendo al elemento estructural un control de reparación o control preventivo. En la Figura 1 se aprecia el reforzamiento externo de PRFC en un pilote rectangular de concreto.



Figura 1. Pilote rectangular de concreto con aplicación de PRFC. Fuente: [35].

Columnas con PRFC

El polímero reforzado con fibra de carbono, como reforzamiento interno o externo, comúnmente se utiliza para envolver columnas de concreto con el fin de mejorar la capacidad de carga de compresión axial. Emplear tiras o encamisados de laminados de PRFC puede ser un método eficaz de rehabilitación y reforzamiento estructural [36]. En la Figura 2 se aprecia el reforzamiento enrollado de PRFC en una columna de concreto armado.



Figura 2. Proceso de reforzamiento de columna con enrollado de PRFC. Fuente: [37].

Vigas con PRFC

El rendimiento de las vigas de concreto armado, en términos de flexión, cortante o ambos, puede mejorar significativamente mediante la fijación de compuestos de polímero reforzado con fibra de carbono en las superficies exteriores para la viga. A pesar de utilizar un adhesivo especial de acuerdo con las recomendaciones del fabricante, es frecuente encontrar problemas de despegue, especialmente en los extremos de los PRFC o cerca de las regiones con grandes tensiones o agrietadas [38].

Las varillas de PRFC en vigas son colocadas de forma vertical u horizontal y presentan un aumento a la resistencia al corte en el rango de 17% a 25% [39]. En la Figura 3 se aprecia el reforzamiento externo en una viga con laminado de PRFC de concreto armado.



Figura 3. Reforzamiento externo a vigas con laminados de PRFC. Fuente: [40].

Losas con PRFC

Trabajos recientes han identificado los paneles de barras de PRF de carbono como un refuerzo unido externamente y una alternativa a los laminados empalmados. Las varillas de PRFC de pequeño diámetro se colocan lado a lado a una distancia discreta para formar un panel. Los paneles vecinos se juntan y se hacen continuos mediante un mecanismo de *finger joint* [41]. En la Figura 4 se aprecia el reforzamiento externo de laminados de PRFC en una losa de concreto armado.



Figura 4. Losa con reforzamiento de laminados con PRFC. Fuente: [42].

El uso de tiras de PRFC con ranuras es muy útil para aumentar la resistencia, la capacidad de servicio y los factores de rendimiento, de rigidez y de tenacidad en la viga de concreto armado en el manejo de tiras con PRFC como refuerzo externo sin ranuras [38].

El pretensado de las varillas de PRFC es una forma eficaz de mejorar el comportamiento estructural de las vigas reforzadas con fibras de carbono de pared delgada. Esto es especialmente evidente en la capacidad de carga de la cortante [43].

El comportamiento de adhesión del PRFC pretensado al concreto conlleva grandes deformaciones, por ende, es importante considerar un mayor avance en la tecnología de fibra de carbono en las estructuras debido a que existen anomalías [44].

También se recomienda que la resina utilizada para los PRFC se acerque más a las propiedades del epoxi, debido a que presenta propiedades más fiables [45].

Además, las fibras de carbono en un ambiente seco a lo largo del concreto muestran una mejor resistencia a la compresión y al fallo por deformación, así como a una mejor conductividad [46].

Por otra parte, las láminas de PRFC tienen un efecto significativo en el comportamiento cíclico de las vigas de CA, mejorando así la resistencia máxima y el desplazamiento último hasta aproximadamente el 66.67% y el 77.14% en vigas [47].

El refuerzo con confinamiento de PRFC es una forma útil de mejorar el comportamiento sísmico de los pilares mal reparados, en términos de resistencia, capacidad de disipación de energía y ductilidad [48].

Asimismo, el PRFC es una alternativa muy prometedora y efectiva para prevenir el fallo abrupto de las columnas con encamisado de baja carga axial concéntrica. Con la aplicación del encamisado de PRFC no uniforme en el refuerzo externo, las columnas de concreto armado mejoran sustancialmente la resistencia, la ductilidad y la absorción de energía [49].

Respecto al impacto ambiental, el sector de los materiales de construcción es el tercer sector industrial que más dióxido de carbono emite en todo el mundo. Se estima que la producción de cemento representa el 7% del total

de las emisiones antropogénicas de CO₂, por lo cual la incorporación de PRFC en estructuras de CA favorece la sostenibilidad y durabilidad en el ciclo de vida de las edificaciones y es, por tanto, un factor que genera una buena gestión de los recursos naturales, reduciendo los niveles actuales de presión antropogénica sobre el ambiente [50].

En el aspecto de la economía, el costo del refuerzo de laminado de PRFC en el año 2020 en la ciudad Hong Kong fue de aproximadamente de 39.68 dólares estadounidenses (USD), mientras que las barras de refuerzo de acero convencional su costo fue de 47.46 USD. Esto implica que el refuerzo de PRFC es un 16.4% más barato que los de acero, según el escenario considerado [51].

IV. CONCLUSIONES

El uso de polímeros reforzados con fibra de carbono en el concreto armado es recomendable porque brinda seguridad, con el propósito de que las estructuras puedan superar diferentes tipos de demandas de esfuerzo excepcionales que puedan provocarse, ofreciendo características excelentes para la asimilación de fuerzas y escasa vulnerabilidad.

Actualmente, el uso de la fibra de carbono en las construcciones es costoso en comparación con otros materiales, pero los beneficios lo hacen competitivo.

Una de las características resaltantes del refuerzo de PRFC es que presenta resistencia a la corrosión, lo que conlleva a que la estructura alargue su ciclo de vida y redunde en menores gastos de mantenimiento en la construcción.

La fibra de carbono es un material que se puede reciclar, lo que lo coloca como un producto de impacto ambiental positivo.

Por ello, la utilización de PRFC en el concreto armado garantiza un rendimiento óptimo de la estructura.

REFERENCIAS

- [1] N. Al-Akhras y M. Al-Mashraqi, "Repair of corroded self-compacted reinforced concrete columns loaded eccentrically using carbon fiber reinforced polymer", *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 14, no. 476, pp. 1-19, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00476.
- [2] J. Yan, Y. Liu, Z. Xu, Z. Li y F. Huang, "Experimental and numerical analysis of CFRP strengthened RC columns subjected to close-in blast loading", *Int J Impact Eng*, vol. 146, no. 103720, pp. 1-21, 2020, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103720.
- [3] L. Jin, H. Chen, Z. Wang y X. Du, "Size effect on axial compressive failure of CFRP-wrapped square concrete: Tests and simulations", *Compos. Struct.*, vol. 254, no. 112843, pp. 1-19, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112843.
- [4] N. Stoiber, M. Hammerl y B. Kromoser, "Cradle-to-gate life cycle assessment of CFRP reinforcement for concrete structures: Calculation basis and exemplary application", *J. Clean. Prod.*, vol. 280, no. 124300, pp. 1-12, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124300.
- [5] G.-J. Liu, E.-L. Bai, J.-Y. Xu, N. Yang y T.-j. Wang, "Dynamic compressive mechanical properties of carbon fiber-reinforced polymer concrete with different polymer-cement ratios at high strain rates", *Constr Build Mater.*, vol. 261, no. 119995, pp. 1-11, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119995.
- [6] L. Knapčíková y A. Behúnová, "Research of Casting Moulding of Epoxy Resin Composites Reinforced with High-Strength Fibres during the Manufacturing Operations", *TEM Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 1488-1494, 2020, doi: 10.18421/TEM94-22.
- [7] D. Brizuela-Valenzuela, M. N. González-García y A. Cobo-Escamilla, "Influence of the Modulus of Elasticity of CFRPs on the Compressive Behavior of Confined Test Pieces and on the Flexural Behavior of Short Concrete Beams", *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 491, pp. 1-17, 2021, doi: 10.3390/app11020491.
- [8] R. Gopal, S. Krishnachandran y B. H. Bharatku-mar, "Monotonic and cyclic response of hybrid fibre reinforced polymer reinforcing system for reinforced concrete columns under eccentric loading", *Adv. Struct. Eng.*, vol. 23, no. 16, pp. 3456-3469, 2020, doi: 10.1177/1369433220939209.
- [9] I. K. Dhindsa, H. S. Rai y H. Singh, "Development of rectangular hybrid-stiffened-plate structural system with fibre-reinforced polymer fabric composite in tension zone", *Adv. Struct. Eng.*, vol. 24, no. 2, pp. 211-226, 2021, doi: 10.1177/1369433220948755.

- [10] G. Wang, C. Yang, C. Meng, Z. Xia, Y. Pan y M. Wang, "Experimental study on the mechanical and self-sensing behaviors of prestressed carbon fiber-reinforced polymer reinforced concrete composite structures", *Adv. Struct. Eng.*, vol. 23, no. 8, pp. 1507-1520, 2020, doi: 10.1177/1369433219895915.
- [11] W. Zhu, M. Li, H. Qin, F. Fu y F. Liu, "Behavior of RC Beams Strengthened Using Steel-Wire-Carbon-Fiber-Reinforced Plates", *Materials*, vol. 13, no. 3996, pp. 1-16, 2020, doi: 10.3390/ma13183996.
- [12] M. A. L. Silva, K. V. Dedigamuwa y J. C. P. H. Gamage, "Performance of severely damaged reinforced concrete flat slab-column connections strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer", *Compos. Struct.*, vol. 255, no. 112963, pp. 1-10, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112963.
- [13] Y. Zhang, C. Yan, X. Huang y Y. Chen, "Structural Design and Mechanical Performance Analysis of Carbon Fiber Closed Fixtures for UHV Transmission Lines", *Math. Probl. Eng.*, vol. 2021, id. 6105360, pp. 1-13, 2021, doi: 10.1155/2021/6105360.
- [14] R. Auriga et al., "Performance properties of plywood composites reinforced with carbon fibers", *Compos. Struct.*, vol. 248, no. 112533, pp. 1-7, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112533.
- [15] M. Moncayo-Theurer, J. Rodriguez, Alcívar, López, Soriano y Villacis, "Las fibras de carbono como una alternativa para reforzamiento de estructuras", *Ingeniería*, vol. 20, no. 1, pp. 57-62, 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750927006.pdf>
- [16] K. Ostrowski, R. Kinasz y P. Dybeł, "The impact of surface preparation for self-compacting, high-performance, fiber-reinforced concrete confined with CFRP using a cement matrix", *Materials*, vol. 13, no. 2830, pp. 1-18, 2020, doi: 10.3390/ma13122830.
- [17] E. Pakdel, S. Kashi, R. Varley y X. Wang, "Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes", *Resour Conserv Recycl*, vol. 166, no. 105340, pp. 1-20, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105340.
- [18] M. Molina, J. J. Cruz, S. Oller, A. H. Barbat y L. Gil, "Estudio numérico-experimental de la interfaz hormigón-epoxi-FRP para una estructura reforzada sometida a doble corte", *Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing.*, vol. 28, no. 2, pp. 65-79, 2012. [En línea]. Disponible: https://www.scipedia.com/public/Molina_et_al_2012a
- [19] G. Miha, C. V. Ungureanu, V. Bria, M. Bunea y R. Chihai, "The Mechanical Properties of Organic Modified Epoxy Resin", *The Annals Of "Dunarea de Jos", University of Galati Fascicle IX. Metallurgy and Materials Science*, vol. 38, no. 3, pp. 10-14, 2020, doi: 10.35219/mms.2020.3.02.
- [20] S. Dong, C. Li y G. Xian, "Environmental impacts of glass-and carbon-fiber-reinforced polymer bar-reinforced seawater and sea sand concrete beams used in marine environments: An LCA case study", *Polymers*, vol. 13, no. 154, pp. 1-16, 2021, doi: 10.3390/polym13010154.
- [21] F. Zhang, L. Zhang, M. Yaseen y K. Huang, "A review on the self-healing ability of epoxy polymers", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 138, no. 50260, pp. 1-14, 2020, doi: 10.1002/app.50260.
- [22] D. Quan, R. Alderliesten, C. Dransfeld, N. Murphy, A. Ivanković y R. Benedictus, "Enhancing the fracture toughness of carbon fibre/epoxy composites by interleaving hybrid meltable/non-meltable thermoplastic veils", *Compos. Struct.*, vol. 252, no. 112699, pp. 1-9, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112699.
- [23] K. Helal, S. Yehia, R. Hawileh y J. Abdalla, "Performance of preloaded CFRP-strengthened fiber reinforced concrete beams", *Compos. Struct.*, vol. 244, no. 112262, pp. 1-12, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112262.
- [24] F. Suppanz y B. Kromoser, "Verbundverhalten subtraktiv bearbeiteter CFK-Stäbe in UHPC", *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 115, no. 8, pp. 1-10, 2020, doi: 10.1002/best.201900088.
- [25] X. Wang y L. Cheng, "Bond characteristics and modeling of near-surface mounted CFRP in concrete", *Compos. Struct.*, vol. 255, no. 113011, pp. 1-13, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113011.
- [26] R. Z. Al-Rousan, M. A. Alhassan y R. J. Al-omary, "Response of interior beam-column connections integrated with various schemes of CFRP composites", *Case Stud.*

- Constr. Mater.*, vol. 14, no. 488, pp. 1-18, 2021, doi: [10.1016/j.cscm.2021.e00488](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00488).
- [27] Z. Chen, P. Huang, G. Yao, X. Guo, Y. Yang, W. Li y B. Wu, “Experimental study on fatigue performance of RC beams strengthened with CFRP under variable amplitude overload and hot-wet environment”, *Compos. Struct.*, vol. 244, no. 112308, pp. 1-11, 2020, doi: [10.1016/j.compstruct.2020.112308](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112308).
- [28] B. Liu, J. Zhou, X. Wen, X. Hu y Z. Deng, “Mechanical properties and constitutive model of carbon fiber reinforced coral concrete under uniaxial compression”, *Constr Build Mater.*, vol. 263, no. 120649, pp. 1-13, 2020, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2020.120649](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120649).
- [29] Q. Cao, X. Lv, C. Zhou y S. Song, “High strength expansive concrete-encased-steel filled carbon fiber reinforced polymer tubes under axial monotonic and cyclic load”, *J Compos Mater*, vol. 54, no. 29, pp. 4557-4573, 2020, doi: [10.1177/0021998320936743](https://doi.org/10.1177/0021998320936743).
- [30] X. Cheng, X. Cai, B. Liu y W. Zhang, “Vehicle-bridge coupling dynamic response of a box bridge after reinforcement with prestressed CFRP”, *J. Vibroengineering*, vol. 22, no. 7, pp. 1715-1730, 2020, doi: [10.21595/jve.2020.21274](https://doi.org/10.21595/jve.2020.21274).
- [31] V. Adam, J. Bielak, C. Dommes, N. Will y J. Hegger, “Flexural and Shear Tests on Reinforced Concrete Bridge Deck Slab Segments with a Textile-Reinforced Concrete Strengthening Layer”, *Materials*, vol. 13, no. 18, pp. 1-25, 2020, doi: [10.3390/ma13184210](https://doi.org/10.3390/ma13184210).
- [32] V. H. Mac, J. Huh, N. S. Doan, G. Shin y B. Y. Lee, “Thermography-Based Deterioration Detection in Concrete Bridge Girders Strengthened with Carbon Fiber-Reinforced Polymer”, *Sensors*, vol. 20, no. 3263, pp. 1-19, 2020, doi: [10.3390/s20113263](https://doi.org/10.3390/s20113263).
- [33] S. Sun, K. Mei, Y. Sun, B. Li y H. Huang, “Structural Performance of Super-Long-Span Cable-Stayed Bridges with Steel and CFRP Hybrid Cables”, *Arab J Sci Eng*, vol. 45, p. 3569-3579, 2019, doi: [10.1007/s13369-019-04166-1](https://doi.org/10.1007/s13369-019-04166-1).
- [34] H. Dong, Y. Zhou y N. Zhuang, “Study on Corrosion Characteristics of Concrete-Filled CFRP-Steel Tube Piles under Hygrothermal Environment”, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, no. 4849038, pp. 1-11, 2020, doi: [10.1155/2020/4849038](https://doi.org/10.1155/2020/4849038).
- [35] J. Zhou, X. Zhang, L. Zhang, F. Dong y E. Oh, “Static load tests of driven concrete piles under CFRP confinement”, *Geomech. Geoengin.*, pp. 1-14, 2019, doi: [10.1080/17486025.2019.1635713](https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1635713).
- [36] A. Totonchi, A. Ansaripour y S. Shivaiei, “Effect of Different Arrangements of CFRP Wraps on the Axial Stress-Strain Behaviour of Confined Concrete Cylinders: Experimental Study and Numerical Modelling”, *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, vol. 44, pp. 1087-1100, 2020, doi: [10.1007/s40996-019-00293-9](https://doi.org/10.1007/s40996-019-00293-9).
- [37] X. Lao, X. Han, J. Ji y B. Chen, “The compression behavior of CFRP-repaired damaged square RC columns”, *Constr Build Mater.*, vol. 223, pp. 1154-1166, 2019, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2019.07.182](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.182).
- [38] R. Z. Al-Rousan, “Impact of elevated temperature and anchored grooves on the shear behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP composites”, *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 14, no. 487, pp. 1-21, 2021, doi: [10.1016/j.cscm.2021.e00487](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00487).
- [39] F. Al-Mahmoud, A. Castel, T. Q. Minh y R. François, “Reinforced Concrete Beams Strengthened with NSM CFRP Rods in Shear”, *J. Sens.*, vol. 18, no. 10, pp. 1563-1574, 2015, doi: [10.1260/1369-4332.18.10.1563](https://doi.org/10.1260/1369-4332.18.10.1563).
- [40] F. Yu, S. Guo, S. Wang y Y. Fang, “Experimental study on high pre-cracked RC beams shear-strengthened with CFRP strips”, *Compos. Struct.*, vol. 225, no. 111163, pp. 1-14, 2019, doi: [10.1016/j.compstruct.2019.111163](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111163).
- [41] A. Jawdhari, A. Peiris y I. Harik, “Experimental study on RC beams strengthened with CFRP rod panels”, *Eng. Struct.*, vol. 173, pp. 693-705, 2018, doi: [10.1016/j.engstruct.2018.06.105](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.105).
- [42] H. Saleh, R. Kalfat, K. Abdouka y R. Al-Mahaidi, “Punching shear strengthening of RC slabs using L-CFRP laminates”, *Eng. Struct.*, vol. 194, pp. 279-289, 2019, doi: [10.1016/j.engstruct.2019.05.050](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.050).
- [43] P. Preinstorfer, P. Huber, T. Huber, B. Kromoser y J. Kolleger, “Experimental investigation and analytical modelling of shear strength of thin walled textile-reinforced UHPC beams”, *Eng. Struct.*, vol. 231, no. 111735, pp. 1-11, 2021, doi: [10.1016/j.engstruct.2020.111735](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111735).

- [44] N. Moshiri, C. Czaderski, D. Mostofinejad y M. Motavalli, “Bond resistance of prestressed CFRP strips attached to concrete by using EBR and EBROG strengthening methods”, *Constr Build Mater.*, vol. 266, no. 121209, pp. 1-14, 2021, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2020.121209](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121209).
- [45] Y. M. Saeed, W. A. Aules, F. N. Rad y A. M. Raad, “Tensile behavior of FRP anchors made from CFRP ropes epoxy-bonded to uncracked concrete for flexural strengthening of RC columns”, *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 13, no. 435, pp. 1-19, 2020, doi: [10.1016/j.cscm.2020.e00435](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00435).
- [46] M. Garg, C. S. Das y R. Gupta, “Use of silica particles to improve dispersion of -COOH CNTs/carbon fibers to produce HyFRCC”, *Constr Build Mater.*, vol. 250, no. 118777, pp. 1-15, 2020, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2020.118777](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118777).
- [47] R. Salih, F. Zhou, N. Abbas y A. K. Mastoi, “Experimental investigation of reinforced concrete beam with openings strengthened using FRP sheets under cyclic load”, *Materials*, vol. 13, no. 3127, pp. 1-25, 2020, doi: [10.3390/ma13143127](https://doi.org/10.3390/ma13143127).
- [48] H. Elci, “Seismic strengthening of improperly repaired reinforced concrete columns using CFRP confinement”, *Structures*, vol. 28, pp. 266-275, 2020, doi: [10.1016/j.istruc.2020.08.072](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.072).
- [49] A. D. Mai, M. N. Sheikh, K. Yamakado y M. N. S. Hadi, “Nonuniform CFRP Wrapping to Prevent Sudden Failure of FRP Confined Square RC Columns”, *J. Compos. Constr.*, vol. 24, no. 6, pp. 1-12, 2020, doi: [10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001077](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001077).
- [50] G. Habert, E. Denarié, A. Šajna y P. Rossi, “Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes”, *Cem Concr Compos*, vol. 38, pp. 1-11, 2013, doi: [10.1016/j.cemconcomp.2012.11.008](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.008).
- [51] A. O. Sojobi y K. M. Liew, “Flexural behaviour and efficiency of CFRP-laminate reinforced recycled concrete beams: Optimization using linear weighted sum method”, *Compos. Struct.*, vol. 260, no. 113259, pp. 1-11, 2020, doi: [10.1016/j.compstruct.2020.113259](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113259).