

Enfoques de aprendizaje automático para estimar la resistencia del hormigón agregado de hormigón reciclado en sistemas de pavimentación rígida.

N. Kumar Gautam^{1*}, A. Kumar² 

*Autor de Contacto: navinphd2026@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i3.1025>

Recibido: 20/02/2026 | Correcciones recibidas: 22/08/2026 | Aceptado: 31/08/2026 | Publicado: 01/09/2026

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo desarrollar un método para predecir la resistencia a la compresión de 28 días del hormigón mezclado con árido de hormigón reciclado (RAC) para aplicaciones en pavimentos rígidos. Se utilizó un conjunto de datos híbrido de 385 observaciones, combinando resultados de laboratorio y datos seleccionados de la literatura, para desarrollar y comparar modelos de aprendizaje automático. Los modelos se evaluaron mediante validación cruzada de cinco pases, medidas de error, análisis de sesgos, evaluación multicolineal e interpretación SHAP. La regresión en bucle ofreció el mejor rendimiento, con $R^2 = 0,7713$, MAE = 3,51 MPa y RMSE = 4,47 MPa. El estudio está limitado a cinco validaciones cruzadas sin validación externa independiente. Su originalidad radica en la evaluación de un conjunto de datos híbrido RAC orientado al pavimento, utilizando análisis predictivos e interpretativos. Los resultados muestran que los modelos regularizados pueden apoyar la evaluación preliminar de la mezcla RAC y la evaluación de materiales.

Palabras clave: hormigón con agregado reciclado; pavimento rígido; predicción de resistencia a la compresión; aprendizaje automático; regresión de bucles; materiales sostenibles para pavimentos.

Citar como: Kumar Gautam, N., Kumar, A. (2026), “Enfoques de aprendizaje automático para estimar la resistencia del hormigón agregado de hormigón reciclado en sistemas de pavimentación rígida.”, Revista ALCONPAT, 16 (3), pp. 493 – 520, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i3.1025>

¹ Research Scholar, Department of Civil Engineering, Sandip University, Sijoul, Madhubani-847235, Bihar, India.

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sandip University, Sijoul, Madhubani-847235, Bihar, India.

Contribución de cada autor

En este trabajo, Navin Kumar Gautam contribuyó con la conceptualización, investigación experimental, desarrollo de conjuntos de datos, modelado por aprendizaje automático, análisis formal, visualización, preparación y revisión de manuscritos (contribución del 75%). El Dr. Amrendra Kumar contribuyó a la supervisión, revisión metodológica, validación, interpretación de resultados, revisión crítica y edición de manuscritos (contribución del 25%). Todos los autores han leído y aprobado la versión final del manuscrito y acuerdan ser responsables de todos los aspectos del trabajo.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2027 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2027.

Machine learning approaches for estimating the strength performance of recycled aggregate concrete in rigid pavement systems.

ABSTRACT

This study aims to develop a method for predicting the 28-day compressive strength of recycled aggregate concrete (RAC) for rigid pavement applications. A hybrid dataset of 385 observations, combining laboratory results and selected literature data, was used to develop and compare machine learning models. The models were assessed using five-fold cross-validation, error measures, bias analysis, multicollinearity assessment, and SHAP interpretation. Lasso Regression provided the best performance, with $R^2 = 0.7713$, MAE = 3.51 MPa, and RMSE = 4.47 MPa. The study is limited to five-fold cross-validation without independent external validation. Its originality lies in evaluating a pavement-oriented hybrid RAC dataset using predictive and interpretive analyses. The results show that regularized models can support preliminary RAC mix evaluation and material assessment.

Keywords: recycled aggregate concrete; rigid pavement; compressive strength prediction; machine learning; lasso regression; sustainable pavement materials.

Abordagens de aprendizado de máquina para estimar a resistência do concreto de agregado reciclado de concreto em sistemas de pavimentação rígida.

RESUMO

Este estudo tem como objetivo desenvolver um método para prever a resistência à compressão de 28 dias do concreto misturado com agregado reciclado de concreto (RAC) para aplicações em pavimentos rígidos. Um conjunto de dados híbrido de 385 observações, combinando resultados laboratoriais e dados selecionados da literatura, foi utilizado para desenvolver e comparar modelos de aprendizado de máquina. Os modelos foram avaliados usando validação cruzada de cinco vezes, medidas de erro, análise de viés, avaliação multi-colinear e interpretação SHAP. A Regressão de Laço forneceu o melhor desempenho, com $R^2 = 0,7713$, MAE = 3,51 MPa e RMSE = 4,47 MPa. O estudo é limitado a validação cruzada de cinco vezes sem validação externa independente. Sua originalidade está na avaliação de um conjunto de dados híbrido RAC orientado para pavimento, utilizando análises preditivas e interpretativas. Os resultados mostram que modelos regularizados podem suportar a avaliação preliminar da mistura RAC e avaliação de materiais.

Palavras-chave: concreto com agregado reciclado; pavimento rígido; previsão de resistência à compressão; aprendizado de máquina; regressão de laço; materiais sustentáveis para pavimento.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos rígidos se utilizan ampliamente en infraestructuras viarias y aeroportuarias debido a su alta capacidad de carga, rigidez estructural y larga vida útil bajo la acción de cargas repetidas de tráfico. El rendimiento estructural y la durabilidad de los pavimentos rígidos están determinados en gran medida por las propiedades mecánicas de las losas de hormigón, entre las cuales la resistencia a la compresión es un parámetro fundamental utilizado en el dimensionamiento del grosor del pavimento, la evaluación de fatiga y el control de calidad de la construcción (Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales, 1993; Brandes et al., 2018; Huang, 2004). Por lo tanto, una estimación fiable de la resistencia a la compresión es esencial para garantizar la seguridad, la disponibilidad y la rentabilidad de los sistemas de pavimento rígido.

En los últimos años, el creciente énfasis en el desarrollo sostenible de infraestructuras y el agotamiento de los recursos de agregados naturales han fomentado el uso de hormigón con agregados de hormigón reciclado (RAC) en la construcción de pavimentos. Los agregados reciclados obtenidos de residuos de construcción y demolición ofrecen beneficios ambientales significativos al reducir la eliminación de residuos en vertederos y preservar los recursos naturales (Behera et al., 2014; Silva et al., 2014; Tam et al., 2018). Varios estudios han informado que el RAC puede usarse eficazmente en aplicaciones de pavimento rígido, como capas bases, arcecos e incluso placas estructurales de hormigón, siempre que se adopten procedimientos adecuados de dosificación y medidas de control de calidad (Ismail et al., 2022; Xiao et al., 2018).

A pesar de estas ventajas, el rendimiento mecánico del CRA es generalmente más variable que el del hormigón convencional. Los áridos reciclados suelen tener mortero antiguo adherido, microgrietas internas y mayor porosidad, características que aumentan la heterogeneidad del material y resultan en una mayor dispersión de los resultados de resistencia a la compresión (Etxeberria et al., 2007; Limbachiya et al., 2000; Thomas et al., 2013). La resistencia a la compresión del CRA está influida por una compleja interacción de factores, incluyendo la tasa de sustitución de los áridos, la relación agua/cemento, la calidad del agregado y las condiciones de curado (Butler et al., 2016; Pedro et al., 2017). Estos efectos no lineales e interdependientes limitan la aplicabilidad de modelos tradicionales de predicción empírica o basados en regresión, especialmente cuando los datos provienen de múltiples fuentes (Asteris et al., 2020).

Las pruebas convencionales de laboratorio siguen siendo el enfoque más fiable para determinar la resistencia a la compresión; sin embargo, los extensos programas experimentales requieren mucho tiempo, mano de obra y coste. Este desafío es especialmente evidente en diseños de pavimento rígido, donde puede ser necesario evaluar diversas resistencias del hormigón en plazos limitados durante la selección del material y las fases preliminares de diseño (Chou et al., 2014; Neville, 2011). En consecuencia, existe un interés creciente en métodos predictivos complementarios capaces de reducir el esfuerzo experimental manteniendo niveles aceptables de precisión.

Las técnicas de aprendizaje automático (ML) han surgido como herramientas efectivas para modelar el comportamiento complejo de los materiales, debido a su capacidad para representar relaciones e interacciones no lineales entre múltiples variables de entrada sin necesidad de formas funcionales previamente definidas. En ingeniería del hormigón, los métodos de aprendizaje automático se han aplicado con éxito para predecir la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y las propiedades relacionadas con la durabilidad, utilizando algoritmos como redes neuronales artificiales, máquinas de vectores de soporte y técnicas *de aprendizaje en conjunto* (Asteris et al., 2019; Chou y Pham, 2013; Duan et al., 2021; Yeh, 1998). Estudios recientes indican que los modelos de aprendizaje automático pueden superar los enfoques estadísticos convencionales cuando se aplican a materiales heterogéneos, como el RAC (Nguyen et al., 2021; Zhang et al., 2020).

Aunque el aprendizaje automático se ha aplicado cada vez más a la predicción de las propiedades del RAC, su eficacia depende en gran medida de la calidad, diversidad y consistencia de los datos

utilizados en el desarrollo de los modelos. Gran parte de la investigación existente se basa en conjuntos de datos obtenidos de un único programa experimental o de fuentes bibliográficas con un alcance limitado. Estos conjuntos de datos son útiles para establecer relaciones entre los parámetros de las mezclas y la resistencia del hormigón, pero pueden no representar adecuadamente la variabilidad asociada a las diferentes fuentes de agregados reciclados, las características del hormigón fuente, las proporciones de las mezclas y las condiciones de curado encontradas en aplicaciones prácticas. Esta cuestión es especialmente relevante para el hormigón destinado a pavimentos rígidos, en los que las variaciones en las propiedades de los materiales pueden influir en el diseño basado en la resistencia y la evaluación de calidad.

El presente estudio aborda esta limitación desarrollando un conjunto de datos híbrido, que combina observaciones experimentales controladas con datos literarios seleccionados sistemáticamente para hormigón con agregados reciclados. El objetivo de esta integración no es simplemente aumentar el número de observaciones, sino ampliar la variedad de condiciones de materiales y mezclas representadas en el conjunto de datos utilizado para modelar, manteniendo la información basada en experimentos. El conjunto de datos resultante incorpora variaciones en el contenido de cemento, la proporción agua/cemento, composición de agregados, características de los agregados reciclados, resistencia del hormigón fuente, dosificación aditiva, trabajabilidad y condiciones de curado. Esto proporciona una base más completa para evaluar la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón de agregados reciclados utilizado en aplicaciones de pavimento rígido. La principal contribución de este estudio radica en el desarrollo y evaluación sistemática de un conjunto de datos híbrido experimental-bibliográfico, dirigido a aplicaciones en pavimentos, para la predicción de la resistencia de los RAC, y no en el uso de un algoritmo específico de aprendizaje automático. Los métodos de regresión consolidados, los métodos basados en núcleos y los métodos de aprendizaje en conjunto se comparan bajo un marco común de validación, y su rendimiento se examina posteriormente mediante métricas de error, análisis de sesgos, evaluación de multicolinealidad e interpretación de la importancia de las variables. El objetivo es determinar qué enfoque de modelado proporciona predicciones estables de utilidad práctica para el heterogéneo conjunto de datos de RAC considerado en este estudio. Los resultados pretenden apoyar la evaluación preliminar de materiales, el análisis de dosis y las decisiones de control de calidad en aplicaciones sostenibles de pavimentos rígidos, reconociendo, sin embargo, que la verificación en laboratorio sigue siendo necesaria para las decisiones finales de ingeniería.

2 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

El objetivo principal de este estudio es desarrollar una metodología fiable y práctica para la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón con agregados reciclados (RAC) destinado a aplicaciones en pavimentos rígidos, mediante la integración entre la investigación experimental y técnicas de aprendizaje automático.

Para lograr este objetivo general, los objetivos específicos del estudio son los siguientes:

1. Evaluar experimentalmente la resistencia a la compresión a 28 días de hormigón con agregados reciclados, producidos con proporciones de mezcla relevantes para la ejecución de pavimentos rígidos.
2. Desarrollar un conjunto de datos híbrido, combinando datos generados experimentalmente con datos de resistencia a la compresión cuidadosamente seleccionados de la literatura revisada, asegurando una representación más amplia de la variabilidad material.
3. Aplicar y comparar diferentes modelos de aprendizaje automático, incluyendo modelos lineales regularizados, métodos de aprendizaje en conjunto y enfoques basados en núcleos, para la predicción de la resistencia a compresión del RAC.
4. Evalúa el rendimiento predictivo de los modelos desarrollados utilizando múltiples indicadores estadísticos, incluyendo métricas basadas en errores, análisis de sesgos y pruebas

de hipótesis, para garantizar la robustez y fiabilidad de los resultados.

- 5 Identificar enfoques adecuados de aprendizaje automático que puedan ayudar en el diseño a nivel de material, la evaluación de calidad y la toma de decisiones para el uso sostenible de hormigón con áridos reciclados en la ingeniería de pavimentos rígidos.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Materiales.

El programa experimental se desarrolló para investigar el comportamiento de resistencia a la compresión del hormigón con agregados reciclados (RAC) destinados a aplicaciones en pavimentos rígidos. Se utilizó cemento Portland común, en cumplimiento de los requisitos regulatorios, como aglutinante principal. Los agregados naturales y los agregados de hormigón reciclado (RCA) se usaron como componentes del agregado grueso, mientras que la arena natural de río se utilizó como agregado fino. El uso del RCA representa escenarios prácticos de construcción de pavimentos en los que se incorporan materiales reciclados con el objetivo de aumentar la sostenibilidad (Silva et al., 2014; Tam et al., 2018).

Los áridos de hormigón reciclado se obtuvieron de la trituración de hormigón original con diferentes niveles de resistencia, representando condiciones prácticas de residuos de demolición. La resistencia del hormigón original se consideró un parámetro importante debido a su influencia en la calidad y el rendimiento mecánico de RCA (Katz, 2003; Pedro et al., 2017; Xiao et al., 2018). La dimensión nominal máxima de RCA oscilaba entre 10 mm y 20 mm, lo cual es compatible con las granulometrías de agregados comúnmente adoptadas en hormigón para pavimentos rígidos (Huang, 2004). La capacidad de absorción de agua de RCA, que oscila aproximadamente entre el 3,5% y el 8,5%, se registró como una consideración de la mayor porosidad y mayor demanda de agua asociadas a los agregados reciclados (Butler et al., 2016; Etxeberria et al., 2007). Se utilizó un superplastificante a base de policarboxilato para proporcionar la trabajabilidad deseada en las diferentes composiciones de las mezclas. En algunas mezclas, se incorporó una pequeña proporción de fibras o añadidos minerales, con el objetivo de representar variaciones comúnmente reportadas en estudios de hormigón destinado a pavimentos (Li et al., 2022).

La Tabla 1 presenta el conjunto completo de datos experimentales desarrollados en este estudio para hormigón con agregados reciclados. La tabla resume las proporciones de las mezclas, las propiedades de los agregados de hormigón reciclados, las condiciones de curado y los resultados respectivos de resistencia a la compresión a 28 días. El contenido de cemento y la proporción agua/cemento variaron en un amplio rango, para abarcar las diferencias en el consumo de aglutinante y en la trabajabilidad de las mezclas. La sustitución de los áridos gruesos naturales por áridos de hormigón reciclados se consideró sistemáticamente, con un rango que iba de 0 a 100%, lo que permitió evaluar la influencia de la incorporación de áridos reciclados en el rendimiento en términos de resistencia.

Tabla 1. Resumen del conjunto de datos experimentales, incluyendo la composición de las mezclas, las propiedades de los áridos de hormigón reciclados, el régimen de curado y los resultados de resistencia a la compresión a los 28 días.

Parámetro	Pista / Niveles
Consumo de cemento (kg/m ³)	350 - 420
Relación agua/cemento (a/c)	0.40, 0.45, 0.50, 0.55
Sustitución por Agregados Naturales (NA) (%)	100, 75, 50, 25, 0
Contenido de agregados gruesos reciclados (RCA) (%)	0, 25, 50, 75, 100
Agregado fino (kg/m ³)	650 - 780
Resistencia del hormigón fuente (MPa)	25 - 45
Absorción de agua RCA (%)	3.5 - 8.5

Dimensión máxima RCA (mm)	10, 12.5, 20
Dosis del superplastificante (%)	0.40 - 1.20
Caída (mm)	60 - 140
Método de curación	Agua, humedad, ambiente
Temperatura de curado (°C)	26 - 34
Fibra/mineral añadido (%)	0 - 1.50
Resistencia a la compresión a 28 días (MPa)	11.29 - 35.26

Tabla 2. Clasificación de mezclas experimentales de hormigón según el nivel de sustitución por árido de hormigón reciclado (RCA).

Grupo	Rango de identificación de mezclas	Agregado natural (%)	Nivel de sustitución RCA (%)
Grupo I	M1–M16	100	0
Grupo II	M17–M32	75	25
Grupo III	M33–M48	50	50
Grupo IV	M49–M64	25	75
Grupo V	M65–M80	0	100

Nota: RCA = árido de hormigón reciclado; NA = agregado grueso natural. Cada grupo incluye múltiples mezclas preparadas con diferentes proporciones agua/cemento, contenido de cemento, regímenes de curado y dosis aditivas para representar un amplio dominio experimental.

La Tabla 2 presenta la clasificación de las mezclas experimentales de hormigón en función del porcentaje de sustitución del agregado grueso natural por el agregado de hormigón reciclado (RCA). Las mezclas se organizaron en cinco grupos, que iban desde hormigón convencional, sin agregado reciclado, hasta hormigón con reemplazo total por agregado reciclado. Esta forma de agrupación permite una comparación sistemática de la influencia del contenido de RCA en las propiedades del hormigón en los estados fresco y endurecido, manteniendo la consistencia de los demás parámetros de dosificación.

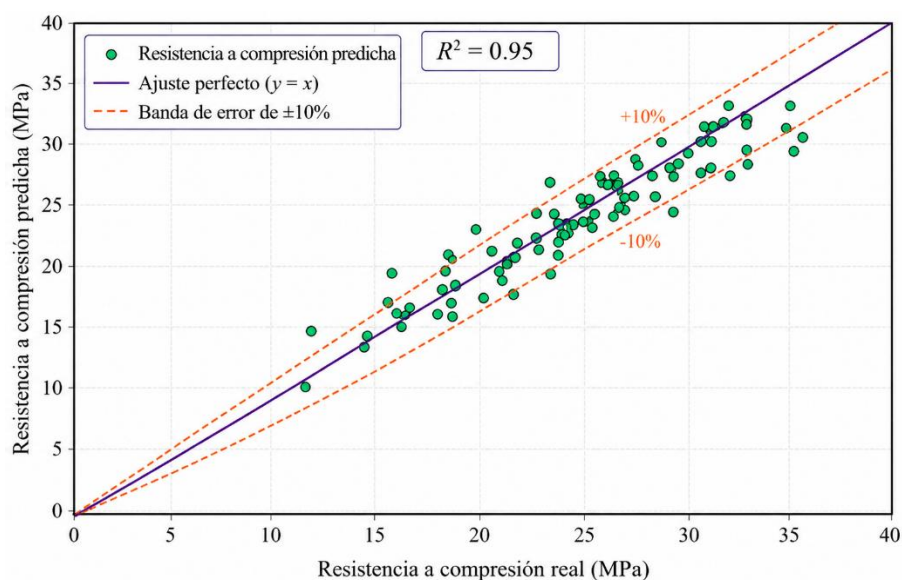


Figura 1. Resistencia a la compresión en 28 días: valores reales frente a valores calculados, obtenidos utilizando los parámetros de entrada combinados del conjunto de datos experimental de hormigón con agregados reciclados.

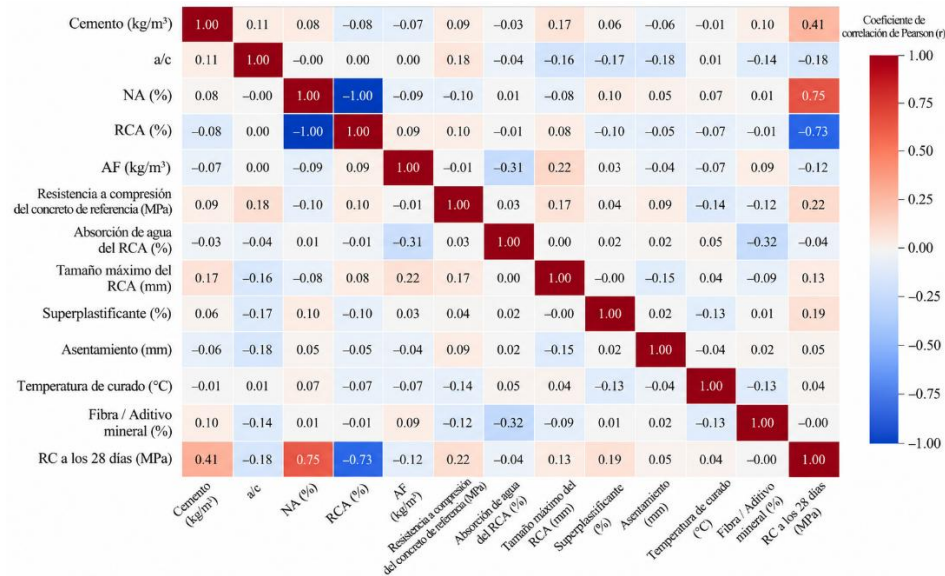


Figura 2. Mapa de calor de correlación que muestra las relaciones lineales entre los parámetros de entrada seleccionados y la resistencia a la compresión a 28 días del hormigón con agregados reciclados.

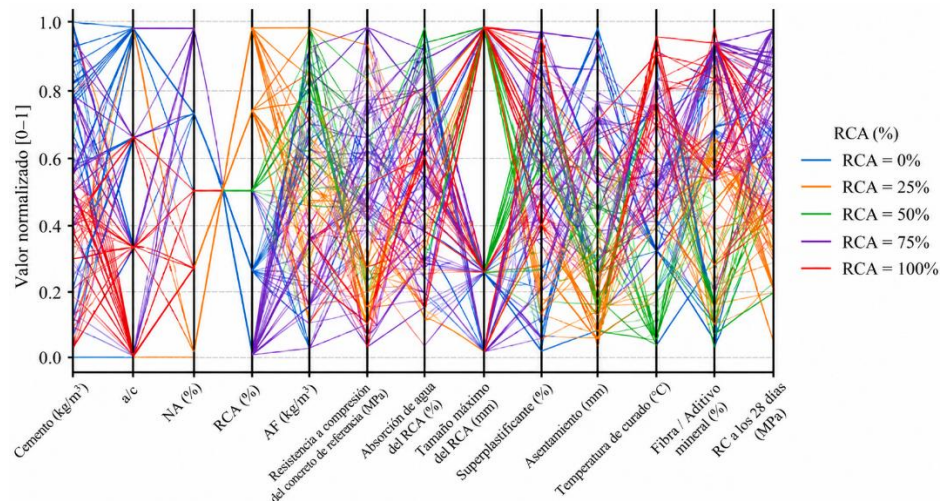


Figura 3. Gráfico de coordenadas paralelo que muestra la distribución normalizada de los parámetros experimentales de entrada de las mezclas de hormigón con agregados reciclados para diferentes niveles de sustitución por agregado grueso reciclado (RCA).

Las figuras 1–3 presentan perspectivas complementarias del conjunto de datos experimental y sus principales relaciones con la resistencia a la compresión a los 28 días. La Figura 1 muestra la concordancia entre los valores de resistencia medidos y estimados, con los datos distribuidos cerca de la línea de referencia y dentro de los límites de desviación del $\pm 10\%$, indicando una relación global fuerte ($R^2 = 0,95$). La Figura 2 presenta la correlación entre las variables de entrada seleccionadas y la resistencia a la compresión, mientras que la Figura 3 ilustra la distribución multidimensional de las mezclas experimentales para diferentes niveles de sustitución por RCA. En conjunto, estas figuras demuestran la variabilidad del conjunto de datos experimental y la influencia combinada de la composición de las mezclas y las características de los agregados reciclados en el desarrollo de la resistencia.

El valor de $R^2 = 0,95$, presentado en la Figura 1, debe interpretarse como una relación descriptiva dentro del conjunto de datos experimental, y no como una medida de la precisión predictiva de un

modelo individual de aprendizaje automático. Los modelos de aprendizaje automático se evaluaron por separado mediante *una validación cruzada de cinco partes*, y los resultados correspondientes de la validación se presentan en la Sección 5. Por lo tanto, las métricas de rendimiento obtenidas mediante la validación cruzada, presentadas posteriormente en el manuscrito, constituyen la base adecuada para comparar la capacidad predictiva de los modelos desarrollados.

3.2 Proporciones de mezclas y variables experimentales.

Se preparó una amplia variedad de mezclas de hormigón, variando sistemáticamente los principales parámetros de dosificación relevantes para el rendimiento de pavimentos rígidos. El contenido de cemento oscilaba aproximadamente entre 350 y 420 kg/m³, mientras que la proporción agua/cemento oscilaba entre 0,40 y 0,55. Estas tiras son típicas de los pavimentos de hormigón diseñados para proporcionar un equilibrio entre resistencia, durabilidad y laborabilidad (Asociación Americana de Carreteras y Funcionarios Estatales, 1993; Neville, 2011).

La tasa de reemplazo de áridos gruesos naturales por áridos de hormigón reciclado osciló entre 0% y 100%, correspondiente a contenidos naturales de agregados de 100%, 75%, 50%, 25% y 0%. Este amplio rango permitió evaluar toda la transición entre hormigón convencional y hormigón producido íntegramente con árido grueso reciclado, un aspecto fundamental para evaluar la viabilidad de la CRA en aplicaciones de pavimento rígido (Fanijo, 2023; Xiao et al., 2018).

El contenido de agregado fino se ajustó para mantener un tamaño de partículas adecuado y una trabajabilidad satisfactoria en todas las mezclas. Los valores de *caída* generalmente oscilaban entre aproximadamente 60 mm y 140 mm, asegurando mezclas con una trabajabilidad adecuada para operaciones de vertido y densificación de hormigón para pavimentación (Huang, 2004). La dosis del superplastificante se ajustó según cada composición, para compensar el aumento de la demanda de agua asociado al mayor contenido de RCA.

3.3 Preparación de muestras y condiciones de curado.

La mezcla del hormigón se realizó siguiendo procedimientos estandarizados de laboratorio para garantizar uniformidad y repetibilidad. Se prestó especial atención al acondicionamiento de la humedad del RCA antes de mezclar, con el objetivo de minimizar la absorción incontrolada de agua durante la dosificación, como se recomendó en estudios previos sobre hormigón con agregados reciclados (Etxeberria et al., 2007; Pedro et al., 2017).

El hormigón fresco se moldeó en formas cúbicas o cilíndricas estandarizadas para realizar las pruebas de resistencia a la compresión. Tras la colada, las muestras se densificaron adecuadamente para eliminar el aire atrapado y asegurar la correcta compactación del hormigón. Se adoptaron diferentes regímenes de curado, incluyendo curado con agua, curado húmedo y curado ambiental, para representar la variedad de condiciones de curado comúnmente encontradas en la práctica de ejecución de pavimento (Neville, 2011; Tam et al., 2005). Las temperaturas de curado oscilaron aproximadamente entre 26 °C y 34 °C, de acuerdo con las condiciones de campo típicas de los proyectos de pavimentación.

3.4 Prueba de resistencia a la compresión.

Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron a 28 días, la edad de referencia estándar utilizada en el diseño y control de calidad del hormigón destinado a pavimentos. Las pruebas se realizaron según los estándares establecidos y se registró la resistencia media a la compresión para cada mezcla (Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales, 1993; Neville, 2011).

Los valores de resistencia a la compresión a 28 días, determinados experimentalmente, mostraron una amplia variación debido a diferencias en el contenido de cemento, la relación agua/cemento, el nivel de sustitución por RCA, la resistencia del hormigón fuente y las condiciones de curado. Esta variabilidad refleja el comportamiento realista del hormigón agregado reciclado (RAC)

utilizado en aplicaciones de pavimento rígido y proporciona una base sólida para un modelado basado en datos adicionales (Li et al., 2022; Pedro et al., 2017).

4. PREPARACIÓN DE CONJUNTOS DE DATOS Y METODOLOGÍA DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

4.1 Formación de conjuntos de datos híbridos para modelado orientado a pavimentos.

El conjunto de datos utilizado en aprendizaje automático se desarrolló mediante un enfoque híbrido, que integra datos generados experimentalmente con datos recogidos de la literatura científica revisada por pares. Los resultados experimentales obtenidos en el presente estudio constituyen el núcleo del conjunto de datos y proporcionan una base de referencia fiable, ya que se produjeron bajo condiciones de laboratorio controladas, con proporciones de mezcla relevantes para hormigones destinados a pavimentos rígidos. Para ampliar la representatividad del conjunto de datos y contemplar la variabilidad encontrada en la ejecución práctica de pavimentos, los datos experimentales se complementaron con datos literarios cuidadosamente seleccionados.

Solo se consideraron estudios que presentaron información completa sobre la composición de las mezclas, características de los agregados reciclados, trabajabilidad, condiciones de curado y resistencia a la compresión a los 28 días. Se priorizaron investigaciones experimentales realizadas en contextos indios e internacionales, ya que reflejan fuentes de materiales, ambientes de curado y prácticas constructivas similares a las que se encuentran en diseños de pavimentos rígidos (Ojha et al., 2024; Patil, 2025; Tank et al., 2014). Se incluyeron estudios fundamentales que abordaron la influencia de la resistencia del hormigón fuente, la calidad del agregado reciclado y la tasa de reemplazo para asegurar una cobertura adecuada de los diferentes niveles de rendimiento (Limbachiya et al., 2000; Padmini et al., 2009).

Se obtuvieron datos adicionales de estudios que examinaron métodos de tratamiento de agregados reciclados, características de absorción de agua y comportamiento en zonas de transición interfaciales, factores que se sabe que pueden afectar significativamente el desarrollo de resistencia del hormigón con agregados reciclados (Chauhan & Singh, 2023; Ismail et al., 2022; Tam et al., 2005). Estudios experimentales y de revisión recientes también han considerado que apoyan la inclusión de adiciones minerales y contenido de fibras como variables secundarias que influyen en el rendimiento del hormigón para pavimentación (Jagadesh et al., 2024).

El conjunto de datos híbrido final estaba compuesto por 385 muestras y representa una amplia variedad de composiciones de mezcla, niveles de sustitución de agregados reciclados (0–100%), regímenes de curado y resultados de resistencia. Esta estructura de conjunto de datos es especialmente adecuada para modelar materiales destinados a pavimentos rígidos, donde la variabilidad de las propiedades del material debe considerarse explícitamente durante el diseño y la evaluación de calidad.

4.2 Selección de variables de entrada y relevancia para pavimentos.

Las variables de entrada seleccionadas para el modelado por aprendizaje automático se definieron en función de su relación directa con el desarrollo de la resistencia a la compresión y el rendimiento de pavimentos rígidos. Estas variables incluyen el contenido de cemento, la proporción agua/cemento, el contenido de agregados naturales, la tasa de sustitución de agregados reciclados, el contenido de agregados finos, la resistencia del hormigón fuente, la absorción de agua del agregado reciclado, el tamaño máximo del árido, la dosis del superplastificante, el hundimiento, el método de curado, la temperatura de curado y la presencia de fibras o añadidos minerales.

Varias de estas variables son especialmente importantes en aplicaciones de pavimentación. La resistencia del hormigón fuente y la absorción de agua del agregado reciclado ejercen una fuerte influencia en la calidad del agregado reciclado y en la variabilidad de su resistencia, afectando

directamente a la rigidez de la placa y a su capacidad de carga (Ismail et al., 2022; Padmini et al., 2009). Parámetros relacionados con la laborabilidad, como el hundimiento y la dosificación aditiva, afectan indirectamente a la calidad de compactación y a la estructura del vacío de aire, aspectos clave para la durabilidad y el rendimiento a largo plazo de los pavimentos (Brandes et al., 2018). El método de curado y la temperatura se han incluido para representar las condiciones de curado en campo comúnmente observadas en la ejecución de pavimentos, especialmente en climas cálidos (Chakradhara Rao et al., 2007; Patil, 2025).

La variable objetivo adoptada para todos los modelos fue la resistencia a la compresión a 28 días, que sigue siendo el principal parámetro mecánico utilizado en el dimensionamiento del grosor de pavimentos rígidos, en la evaluación de la fatiga y en el control de calidad.

Tabla 3. Rango estadístico de las variables de entrada utilizadas para el desarrollo del modelo.

Parámetro de entrada	Min	Max	Promedio	Desviación estándar	Varianza
Cemento (kg/m ³)	300.2	469.1	386.28	44.31	1963.56
Relación agua/cemento (a/c)	0.35	0.65	0.49	0.08	0.0063
Contenido agregado natural (%)	0	100	52.12	28.45	809.61
Árido de hormigón reciclado (RCA) (%)	0	100	47.88	28.37	804.95
Agregado fino (kg/m ³)	550	819.6	696.9	66.59	4434.75
Resistencia del hormigón fuente (MPa)	18.3	54.7	36.15	9.37	87.72
Absorción de agua RCA (%)	1.24	11.99	6.64	2.79	7.76
Dimensión máxima RCA (mm)	10	20	15.29	4.02	16.13
Superplastificante (%)	0	1.79	0.9	0.47	0.22
Caída (mm)	35	169	98.91	34.44	1186.36
Temperatura de curado (°C)	20	39.9	29.91	5.13	26.31
Adición de fibra/minerales (%)	0	2	0.49	0.55	0.31
Indicador de fuente de datos	0	1	0.21	0.41	0.17

Nota: a/c = relación agua/cemento; NA = agregado grueso natural; RCA = agregado de hormigón reciclado. Los valores de mínimo, máximo, media, desviación estándar y varianza presentados se calcularon a partir del conjunto de datos híbrido combinado, compuesto tanto por datos generados experimentalmente como por valores recogidos de la literatura publicada. El indicador de fuente de datos distingue los registros experimentales de los de la literatura. Todos los parámetros presentados en la tabla se consideraron como variables de entrada durante el desarrollo del modelo.

Las características estadísticas de las variables de entrada utilizadas para el desarrollo del modelo se resumen en la Tabla 3. La tabla presenta el rango de variación y distribución de los principales parámetros de dosificación de las mezclas, las propiedades de los agregados reciclados y las variables relacionadas con el curado, extraídos del conjunto de datos combinados, compuesto por datos experimentales y datos de la literatura. La amplia variación observada en el contenido de cemento, la proporción agua/cemento, la composición de agregados y las características de los agregados reciclados garantiza una cobertura adecuada de las dosis de hormigón utilizadas en la práctica. Estos descriptores estadísticos proporcionan información sobre la diversidad del conjunto de datos y contribuyen a la robustez de los pasos posteriores de modelado y análisis.

4.3 Ingeniería de atributos para el comportamiento específico de los pavimentos.

Para mejorar la interpretabilidad física y la capacidad predictiva de los modelos, se introdujeron atributos derivados adicionales para representar el comportamiento de los materiales relevantes para el pavimento. Se calculó una relación agua/cemento efectiva incorporando la influencia de la absorción de agua del agregado reciclado, reflejando la demanda adicional de agua asociada a los agregados porosos reciclados. Este ajuste es especialmente importante para hormigones destinados a pavimentos, en los que la variabilidad de la humedad puede influir significativamente en el desarrollo de resistencia en las primeras edades (Ismail et al., 2022; Tam et al., 2005).

Se introdujo un parámetro de intensidad de aglutinante para representar el efecto combinado del

contenido de cemento y la relación agua/cemento sobre el desarrollo de resistencia, en línea con los conceptos de dosificación de hormigón de pavimento basados en resistencia. Además, se formuló un índice de severidad de agregados reciclados, combinando la tasa de reemplazo por agregados reciclados y su absorción de agua, con el objetivo de representar el efecto conjunto de la cantidad y calidad de los áridos reciclados sobre la resistencia a la compresión. Indicadores combinados similares se han recomendado en estudios previos sobre hormigones con agregados reciclados, para representar mejor la heterogeneidad del material (Ojha et al., 2024; Padmini et al., 2009).

4.4 Preprocesamiento de datos.

Antes del desarrollo de los modelos, el conjunto de datos híbrido se sometía a preprocesamiento para garantizar la consistencia y la estabilidad numérica. Los valores ausentes se trataban mediante imputación mediante la mediana, con el objetivo de preservar la integridad del conjunto de datos y, al mismo tiempo, minimizar las distorsiones causadas por *valores atípicos*. Las variables continuas se estandarizaron para eliminar los efectos resultantes de las diferencias de escala, un procedimiento esencial para modelos lineales regularizados y algoritmos *basados en núcleo*. Las variables categóricas, como el método de curación, fueron codificadas numéricamente para permitir su inclusión en los modelos de aprendizaje automático. La estrategia de preprocesamiento se desarrolló de tal manera que equilibraba la normalización de los datos con la preservación de su significado físico, lo cual es especialmente importante en aplicaciones de ingeniería, donde la interpretabilidad de los resultados es crítica (Jagadesh et al., 2024).

4.5 Modelos de aprendizaje automático y estrategia de validación.

La predicción de la resistencia a la compresión a 28 días de hormigón con agregados reciclados se formuló como un problema de regresión supervisada, cuyo objetivo es establecer una relación funcional entre múltiples parámetros de dosificación de mezcla y una variable de salida continua. Considerando la naturaleza heterogénea del hormigón con agregados reciclados y su relevancia para el diseño de pavimentos rígidos, se empleó un conjunto diverso de modelos de aprendizaje automático, que representan diferentes enfoques de modelado.

La Figura 4 ilustra el flujo de trabajo de aprendizaje automático adoptado en este estudio para predecir la resistencia a la compresión a 28 días de hormigón con agregados reciclados utilizados en aplicaciones de pavimento rígido. Los datos experimentales y los datos de la literatura se combinaron para formar un conjunto de datos híbrido, que fue sometido a preprocesamiento e ingeniería de atributos relevantes para pavimentos antes del desarrollo de los modelos. Se entrenaron y evaluaron diferentes modelos *basados en regresión*, conjunto y *núcleo* mediante validación cruzada de cinco veces, seguida de una evaluación estadística del rendimiento, sesgo y multicolinealidad. El flujo de trabajo se completa con la interpretación de los modelos y la selección del modelo de predicción más fiable para aplicaciones de ingeniería.

Los algoritmos de aprendizaje automático considerados en este estudio fueron seleccionados en función de su aplicabilidad consolidada en la modelización de materiales de ingeniería civil y su capacidad para proporcionar predicciones fiables utilizando conjuntos de datos de tamaño moderado.

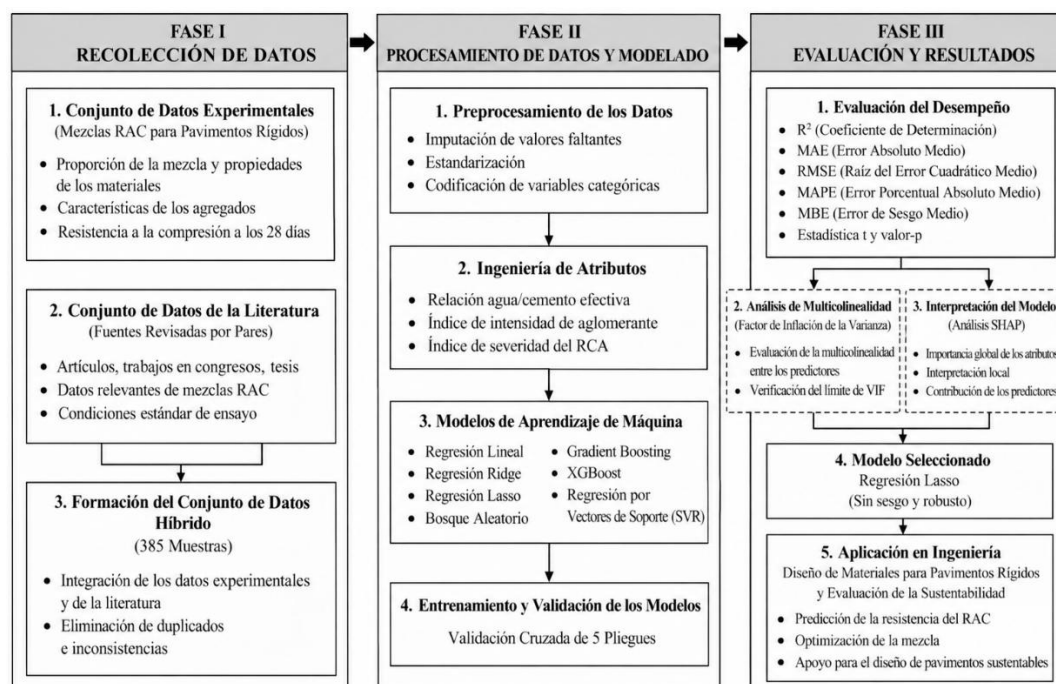


Figura 4: Flujo de trabajo de aprendizaje automático adoptado para la predicción de la resistencia a la compresión a 28 días de hormigón con agregados reciclados para aplicaciones de pavimento rígido.

Los modelos seleccionados representan tres categorías principales de técnicas de aprendizaje supervisado: modelos de regresión regularizada, métodos de aprendizaje basados en núcleos y enfoques de aprendizaje en conjunto. Los modelos de redes neuronales artificiales no se incluyeron en la presente investigación, ya que el objetivo principal era comparar técnicas de aprendizaje automático interpretables capaces de proporcionar tanto precisión predictiva como información relevante para la interpretación del comportamiento de los materiales desde una perspectiva de ingeniería. Este enfoque también favorece la transparencia de los modelos y su implementación práctica en aplicaciones que involucran hormigón con agregados reciclados, en las que la comprensión de la influencia de variables individuales suele ser tan importante como el propio rendimiento predictivo. Se adoptó la *validación cruzada* de cinco órdenes para proporcionar una evaluación robusta del rendimiento de los modelos y, simultáneamente, maximizar el uso del conjunto de datos híbrido disponible. Esta estrategia de validación reduce la influencia de una única división entre datos de entrenamiento y prueba y permite evaluar el rendimiento en múltiples subconjuntos de datos. Aunque una validación externa utilizando un conjunto de datos independiente podría aportar evidencia adicional sobre la generalizabilidad de los modelos, no estaban disponibles conjuntos de datos con variables consistentes específicamente orientadas al hormigón con áridos reciclados para pavimentación. Por ello, la validación cruzada se consideró la estrategia de validación más adecuada para la presente investigación.

4.5.1 Entrenamiento del modelo y optimización de hiperparámetros.

Antes del desarrollo de los modelos, el conjunto de datos híbrido se sometió a pasos de preprocesamiento y verificación de calidad, para asegurar la coherencia entre los registros experimentales y los de la literatura. Posteriormente, los modelos de aprendizaje automático fueron entrenados y evaluados mediante un procedimiento de *validación cruzada de cinco partes*, en el que el conjunto de datos se dividió en cinco subconjuntos, utilizándose cada subconjunto una vez como conjunto de validación, mientras que los demás se emplearon en el entrenamiento del modelo. Las métricas finales de rendimiento presentadas en este estudio corresponden al

rendimiento medio obtenido en todos los pliegues de validación.

Para aumentar la fiabilidad y el rendimiento predictivo de los modelos, se optimizaron los hiperparámetros de todos los algoritmos de aprendizaje automático antes de la evaluación final. Para las regresiones Ridge y Lazo, se ajustó la intensidad de la regularización para obtener un equilibrio adecuado entre la complejidad del modelo y la precisión de las predicciones. Para la Regresión de Vectores de Soporte (SVR), se optimizaron los parámetros relacionados con el núcleo de la función base radial (RBF), con el objetivo de mejorar la capacidad predictiva de las relaciones no lineales. Los modelos de aprendizaje en conjunto, incluyendo Random Forest, Gradient Boosting y XGBoost, se ajustaron optimizando la complejidad de los modelos y los parámetros asociados al aprendizaje de árboles, con el fin de mejorar su capacidad de generalización.

La configuración final de cada modelo se seleccionó en función del rendimiento obtenido durante la validación cruzada, asegurando una comparación equitativa entre los diferentes algoritmos. Este procedimiento redujo la probabilidad de *sobreajuste* y permitió una evaluación más robusta de la idoneidad de los distintos enfoques de aprendizaje automático para predecir la resistencia a la compresión del hormigón con áridos reciclados destinados a aplicaciones de pavimento rígido

4.5.2 Modelos de regresión lineales y regularizadas.

Se adoptó la regresión lineal como modelo *base* para evaluar la relación lineal entre las variables de entrada y la resistencia a la compresión. La forma general del modelo de regresión lineal se expresa como:

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (1)$$

donde representa la resistencia a la compresión predicha, corresponde a las variables de entrada, representa los coeficientes de regresión y representa el error aleatorio. Aunque la regresión lineal ofrece transparencia e interpretabilidad, su rendimiento puede reducirse en presencia de multicolinealidad e interacciones no lineales, características comunes en conjuntos de datos concretos con agregados reciclados. $y_i x_{ij} \beta_i \varepsilon$

Para superar estas limitaciones, se utilizaron la Regresión de Cresta y la Regresión de Lazo. La Regresión de Crestas introduce un término de regularización L2, que penaliza los coeficientes de alta magnitud y reduce la sensibilidad del modelo a la multicolinealidad:

$$\min(\sum (y_i - y_i^0)^2 + \lambda \sum \beta_j^2) \quad (2)$$

La regresión de lazo aplica la regularización L1, que puede reducir algunos coeficientes a cero, realizando así eficazmente la selección de variables:

$$\min(\sum (y_i - y_i^0)^2 + \lambda \sum |\beta_j|) \quad (3)$$

Los modelos de regresión regularizada son especialmente adecuados para conjuntos de datos híbridos que combinan datos experimentales y datos de la literatura, ya que proporcionan mayor estabilidad y generalizabilidad en presencia de variables de entrada correlacionadas y variabilidad en las mediciones (Asteris et al., 2021; Kumar et al., 2024). En aplicaciones de pavimento rígido, donde se desean predicciones conservadoras y fiables de las propiedades del material, esta estabilidad es esencial.

4.5.3 Regresión por vectores de soporte.

Se empleó la regresión vectorial de soporte (SVR) para representar las relaciones no lineales entre los parámetros de dosificación de la mezcla y la fuerza de compresión. La SVR construye una función de regresión minimizando el error de predicción dentro de un rango de tolerancias

insensibles a ε , mientras controla la complejidad del modelo:

$$\min \left(\frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum (\xi_i + \xi_i^*) \right) \quad (4)$$

La regresión de vectores de soporte (SVR) es eficaz para modelar el comportamiento no lineal de materiales y se ha utilizado ampliamente en estudios de predicción de resistencia del hormigón. Sin embargo, su rendimiento es sensible a la selección de granos y la elección de parámetros, y puede tener limitaciones cuando la variabilidad del conjunto de datos es alta, como suele ocurrir en conjuntos de datos híbridos de hormigón destinados al pavimento (Jagadesh et al., 2024; Nguyen et al., 2021). Se adoptó un núcleo de función base radial (RBF) debido a su amplio uso para predecir la resistencia del hormigón.

4.5.4 Modelos de aprendizaje en conjunto

Se emplearon modelos de aprendizaje *en conjunto* para representar interacciones complejas y no lineales entre los parámetros de dosificación de las mezclas. Random Forest es un método *de ensamble basado en bolsas* que construye múltiples árboles de decisión usando muestras *bootstrap* y promedia sus predicciones:

$$\hat{y} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T f_t(x) \quad (5)$$

donde representa la predicción del árbol de decisión t -ésimo. Los modelos de Bosque Aleatorio son robustos al ruido y capaces de manejar datos de alta dimensión, lo que los hace adecuados para predecir la resistencia del hormigón. $f_t(x)$

El aumento de gradiente y el aumento extremo de gradiente (XGBoost) son métodos de aprendizaje en conjunto basados en impulsos, que construyen modelos secuencialmente con el objetivo de minimizar el error de predicción. Estos métodos son especialmente efectivos para representar dependencias no lineales y los efectos de interacción entre variables:

$$y_i^0 = \sum_{k=1}^K f_k(x_i) \quad (6)$$

Los métodos de aprendizaje *en conjunto* han demostrado un alto rendimiento predictivo en estudios de ingeniería del hormigón; sin embargo, también están sujetos a sobreajuste cuando el tamaño del conjunto de datos es limitado o cuando su variabilidad es alta (Ojha et al., 2024; Zhang et al., 2020). La inclusión de estos métodos en este estudio permite una comparación exhaustiva entre enfoques de modelado simples y complejos para predecir las propiedades de los materiales utilizados en pavimentos rígidos

4.5.5 Estrategia de validación.

Para asegurar una evaluación robusta de la generalizabilidad de los modelos, se adoptó una estrategia de validación cruzada de cinco órdenes. El conjunto de datos se dividió aleatoriamente en cinco subconjuntos de tamaño igual; en cada iteración, se usaron cuatro subconjuntos para el entrenamiento y uno para la validación. Este proceso se repitió hasta que cada subconjunto se usó una vez como conjunto de validación, y los resultados de las predicciones se agregaron posteriormente.

La validación cruzada es especialmente importante para conjuntos de datos híbridos, en los que los datos provienen de diferentes fuentes experimentales y estudios de literatura. Este enfoque minimiza el sesgo asociado a una división *entre tren y prueba* y proporciona una estimación fiable del rendimiento de los modelos frente a datos no utilizados durante el entrenamiento, un aspecto clave para las predicciones de las propiedades materiales empleadas en el diseño de pavimentos rígidos (Kumar et al., 2024; Patil, 2025).

4.6 Criterios de evaluación del desempeño.

El rendimiento predictivo de los modelos de aprendizaje automático se evaluó utilizando múltiples indicadores estadísticos, con el objetivo de analizar tanto la precisión como la fiabilidad de las predicciones. Estos indicadores proporcionan perspectivas complementarias sobre el comportamiento de los modelos y son especialmente relevantes para la toma de decisiones de ingeniería en el diseño de pavimentos rígidos.

El coeficiente de determinación (R^2) se utilizó para evaluar la calidad del ajuste entre los valores predichos y observados de resistencia a la compresión:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - y_i^0)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

El Error Cuadrático Medio (MSE) y el Error Cuadrático Medio Raíz (RMSE) cuantifican la dispersión de los errores de pronóstico y penalizan las desviaciones de mayor magnitud:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum (y_i - y_i^0)^2 \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (y_i - y_i^0)^2} \quad (9)$$

El Error Absoluto Medio (MAE) mide la magnitud media de los errores de pronóstico, sin dar mayor peso a los valores extremos:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |y_i - y_i^0| \quad (10)$$

El Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) proporciona una medida relativa de la precisión de las predicciones, expresada en porcentaje, facilitando la comparación entre diferentes rangos de resistencia:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{y_i - y_i^0}{y_i} \right| \times 100 \quad (11)$$

Para evaluar el sesgo sistemático de las predicciones, se calculó el Error de Sesgo Medio (EBM):

$$MBE = \frac{1}{N} \sum (y_i - y_i^0) \quad (12)$$

Un valor MBE positivo indica sobreestimación, mientras que un valor negativo indica subestimación. La evaluación de sesgo es especialmente importante en aplicaciones de pavimento rígido, donde la sobreestimación sistemática o la subestimación de la resistencia a la compresión pueden afectar directamente al dimensionamiento del grosor de la losa y a los márgenes de seguridad (Brandes et al., 2018; Patil, 2025).

Finalmente, se calcularon t-estadísticas para muestras emparejadas con el fin de evaluar la significación estadística de las diferencias entre los valores predichos y observados:

$$t = \sqrt{\frac{(N-1) \cdot MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (13)$$

Los valores p correspondientes se utilizaron para evaluar si los errores de predicción eran estadísticamente significativos. La inclusión de métricas de prueba de hipótesis garantiza que los modelos seleccionados no solo sean precisos, sino también estadísticamente consistentes y adecuados para aplicaciones de ingeniería que involucren pavimentos rígidos.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Comparación general del rendimiento del modelo

El rendimiento predictivo de los modelos de aprendizaje automático desarrollados se evaluó mediante múltiples indicadores estadísticos, incluyendo métricas relacionadas con la precisión y el sesgo, para asegurar su idoneidad para la evaluación de materiales destinados a pavimentos rígidos. La Tabla 4 resume el rendimiento de todos los modelos considerados en este estudio.

La Figura 5 resume el rendimiento predictivo de seis modelos de aprendizaje automático desarrollados para estimar la resistencia a compresión de hormigón a 28 días con agregados reciclados. Los gráficos de valores reales frente a predichos muestran el nivel de concordancia entre los valores experimentales y los estimados por los modelos, mientras que las distribuciones residuales proporcionan información sobre la dispersión y consistencia de los errores de predicción. El rendimiento predictivo presentado en esta sección no debe compararse directamente con el análisis de correlación presentado en la Figura 1. Aunque la Figura 1 ilustra la asociación general entre la resistencia a la compresión y el conjunto de parámetros de entrada en el conjunto de datos experimental, los resultados de los modelos de aprendizaje automático se derivan de la validación cruzada y, por tanto, representan el rendimiento de los modelos bajo condiciones de validación independientes. La diferencia entre estos valores refleja la distinción entre correlación descriptiva y generalizabilidad predictiva, un aspecto comúnmente observado en aplicaciones de aprendizaje automático que involucran conjuntos de datos de ingeniería heterogéneos. Los indicadores de rendimiento presentados corresponden a las versiones optimizadas de cada modelo de aprendizaje automático, obtenidas mediante el procedimiento de ajuste y validación cruzada de hiperparámetros descrito en la Sección 4.5.1, proporcionando así una base consistente para la comparación de los modelos.

Entre los modelos evaluados, la Regresión de Lazo mostró la mayor precisión predictiva, alcanzando un valor de R^2 de 0,7713, junto con los valores más bajos de MAE (3,51 MPa), RMSE (4,47 MPa) y MAPE (16,44%). La Regresión de Cresta mostró un rendimiento muy ajustado, con un valor de R^2 de 0,7695 y niveles de error similares. En contraste, los modelos *de aprendizaje en conjunto*, como Gradient Boosting, XGBoost y Random Forest, mostraron valores de R^2 comparativamente más bajos y errores de predicción más altos, mientras que la Regresión de Vectores de Soporte (SVR) mostró el rendimiento más débil entre todos los modelos evaluados. Estos resultados indican que los modelos de regresión regularizada más simples superan a los modelos no lineales más complejos cuando se aplican al conjunto de datos híbrido utilizado en el presente estudio (Zhuang et al., 2021). Este resultado es coherente con hallazgos recientes que indican que los conjuntos de datos híbridos, combinando datos experimentales y literarios, suelen tener alta variabilidad y multicolinealidad, condiciones en las que los modelos lineales regularizados tienden a proporcionar predicciones más estables y fiables (Asteris et al., 2021; Kumar et al., 2024).

El rendimiento superior de la Regresión Lasso se debe a las características del conjunto de datos híbrido utilizado en este estudio. El conjunto combina observaciones experimentales y datos de la literatura y, por tanto, presenta una variabilidad considerable, variables predictoras correlacionadas y posibles inconsistencias en la medición. Bajo estas condiciones, la Regresión Lazos se beneficia de la regularización L1, que reduce la influencia de variables redundantes y disminuye la complejidad del modelo, mejorando así su capacidad de generalización. La Regresión Ridge también tuvo buen desempeño, ya que su mecanismo de regularización estabiliza la estimación de los coeficientes en presencia de multicolinealidad. Sin embargo, a diferencia de la Regresión Lazo, no elimina las variables predictoras menos informativas, lo que podría explicar su rendimiento ligeramente inferior.

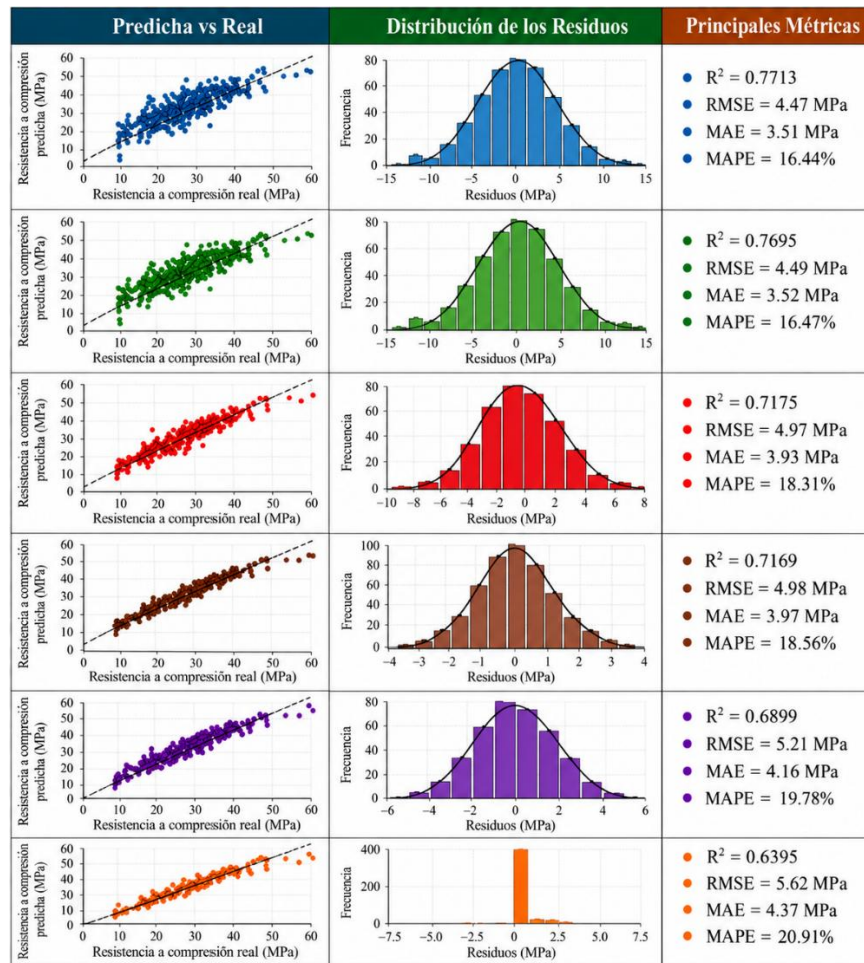


Figura 5. Comparación del rendimiento de seis modelos de aprendizaje automático para predecir la resistencia a la compresión a 28 días de hormigón con agregados reciclados. Para cada modelo, se presentan los valores reales frente a los predichos de la resistencia a la compresión y la correspondiente distribución de los residuos.

En contraste, modelos de *aprendizaje en conjunto* como Random Forest, Gradient Boosting y XGBoost se desarrollan para representar interacciones no lineales complejas. Aunque estos métodos suelen funcionar excepcionalmente bien en conjuntos de datos grandes y altamente estructurados, su ventaja puede disminuir cuando los datos disponibles presentan una variabilidad considerable y un tamaño de muestra moderado. Bajo estas condiciones, los modelos pueden aprender parcialmente patrones específicos de conjuntos que no se generalizan de forma consistente entre diferentes pliegues de validación. De manera similar, la Regresión de Vectores de Soporte (SVR) mostró menor capacidad predictiva, lo que puede atribuirse a la dificultad de representar el comportamiento heterogéneo del hormigón con agregados reciclados mediante una única función *de decisión basada en el núcleo*. Estas observaciones indican que las relaciones predominantes que rigen la resistencia a la compresión en el conjunto de datos analizado están suficientemente representadas por enfoques de modelado lineal regularizado.

Tabla 4. Comparación del rendimiento de los modelos de aprendizaje automático y regresión para predecir la resistencia a la compresión a 28 días.

Modelo	R ²	MADRE	MSE	RMSE	MAPA	MBE	Estadísticas t	Valor p
Regresión del lazo	0.7713	3.51	20.01	4.47	16.44	−0,03	0.139	0.89
Regresión de la	0.7695	3.52	20.16	4.49	16.47	−0,04	0.163	0.871

dorsal								
Aumento de gradiente	0.7175	3.93	24.71	4.97	18.31	0.2	-0,774	0.439
XGBoost	0.7169	3.97	24.77	4.98	18.56	0.27	-1.048	0.295
Bosque Aleatorio	0.6899	4.16	27.13	5.21	19.78	0.2	-0,751	0.453
Regresión de vectores de soporte (SVR)	0.6395	4.37	31.54	5.62	20.91	0.06	-0,200	0.842

Nota: R^2 = coeficiente de determinación; MAE = error absoluto medio (MPa); MSE = error cuadrático medio (MPa²); RMSE = error cuadrático medio raíz (MPa); MAPE = porcentaje absoluto medio (%); MBE = error medio de sesgo (MPa). La estadística t y el valor p correspondiente se utilizaron para evaluar la significación estadística del sesgo de predicción de los modelos. Todos los indicadores de rendimiento se evaluaron utilizando una estrategia idéntica de partición y validación de datos, para asegurar una comparación equitativa entre los modelos.

5.2 Interpretación desde la perspectiva de suelos rígidos.

En el diseño de pavimentos rígidos, la resistencia a la compresión es un parámetro de entrada crítico, que influye en el grosor de las losas, la eficiencia de la transferencia de carga y el rendimiento de fatiga. Desde una perspectiva ingenierina, la fiabilidad de las predicciones y el control del sesgo son tan importantes como la obtención de una alta precisión numérica. El rendimiento superior de los modelos de Regresión de Lazo y Cresta sugiere que la relación entre la resistencia a la compresión y los parámetros de dosificación del hormigón con los agregados reciclados destinados a pavimentos está predominantemente gobernada por tendencias lineales, a pesar de la presencia de algunas interacciones no lineales.

El hormigón con agregados reciclados usados en pavimentos generalmente presenta mayor heterogeneidad material, debido a variaciones en la resistencia del hormigón fuente, en la absorción de agua de los agregados reciclados y en las condiciones de curado. En estos casos, modelos de conjunto más complejos pueden sobreajustar patrones localizados presentes en los datos de entrenamiento, especialmente cuando el conjunto de datos incorpora información de múltiples fuentes experimentales (Ojha et al., 2024; Patil, 2025). Los modelos de regresión regularizada mitigan este problema limitando la magnitud de los coeficientes, mejorando así su capacidad para generalizar bajo condiciones variables.

El rendimiento relativamente inferior de los modelos basados en Bosque Aleatorio y boosting, observado en este estudio, está en línea con resultados similares reportados para hormigones con agregados reciclados, en los que los modelos de conjunto no superaron consistentemente a los enfoques más simples cuando la variabilidad de los datos era alta y el tamaño de muestra moderado (Jagadesh et al., 2024; Zhang et al., 2020).

5.3 Métricas de error y relevancia para la ingeniería.

Desde la perspectiva de la ingeniería de pavimentos, las mediciones de error absoluto, como la MAE y la RMSE, son especialmente importantes, ya que reflejan la desviación esperada entre los valores predichos y reales de resistencia a la compresión. Los valores de MAE obtenidos para los modelos de Regresión de Lazo y Cresta (aproximadamente 3,5 MPa) están dentro de un rango aceptable para aplicaciones preliminares de diseño y control de calidad de materiales de pavimentación.

Los valores de MAPE de los modelos con mejor rendimiento se mantuvieron por debajo del 17%, indicando una consistencia razonable de predicciones en un amplio rango de resistencia. Este nivel de precisión es comparable o superior al reportado en estudios previos que utilizaron aprendizaje automático para predecir la resistencia del hormigón con agregados reciclados (Jagadesh et al., 2024; Nguyen et al., 2021). La regresión de vectores de soporte (SVR) mostró los valores más altos de MAE, RMSE y MAPE, lo que sugiere una robustez limitada para conjuntos de datos

híbridos de hormigón destinados a pavimentación.

Los valores RMSE más altos observados en modelos basados en conjunto y núcleo indican una mayor sensibilidad a errores extremos de predicción. En el diseño de pavimentos rígidos, esta variabilidad puede dar lugar a estimaciones inseguras o excesivamente conservadoras del grosor de placas, especialmente cuando se utilizan predicciones de resistencia a la compresión directamente en métodos de diseño mecanicista-empírico (Brandes et al., 2018).

5.4 Análisis de sesgo y consistencia estadística.

La evaluación de sesgo desempeña un papel clave en el análisis de la idoneidad de los modelos predictivos para aplicaciones de ingeniería. Los valores de Error de Sesgo Medio (EBM) para los modelos de Regresión de Lazo y Cresta estaban cerca de cero ($-0,0317$ MPa y $-0,0373$ MPa, respectivamente), lo que indica una sobreestimación o subestimación sistemática insignificante. Además, las estadísticas *t* asociadas mostraron valores bajos, y los valores *p* fueron significativamente superiores a 0,05, lo que indica que las diferencias entre los valores predichos y observados no son estadísticamente significativas.

En contraste, los modelos *de conjunto*, como Gradient Boosting, XGBoost y Random Forest, mostraron valores positivos EBM más altos, lo que indica una tendencia a sobreestimar la resistencia a la compresión. Aunque estos sesgos no fueron estadísticamente significativos para un nivel de confianza del 95%, su magnitud es indeseable desde la perspectiva del diseño de pavimentos, ya que la sobreestimación sistemática puede resultar en diseños estructurales inseguros y en una vida útil reducida (Patil, 2025).

La regresión de vectores de soporte (SVR) mostró relativamente poco sesgo; sin embargo, su mayor dispersión de errores, indicada por los valores RMSE y MAP, reduce su aplicabilidad práctica para predecir las propiedades de materiales destinados a pavimentos rígidos. Estos resultados refuerzan la importancia de combinar métricas relacionadas con sesgos con medidas convencionales de precisión en la evaluación de modelos de aprendizaje automático para aplicaciones de ingeniería de pavimentos (Brandes et al., 2018).

5.5 Comparación con estudios previos.

Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con la literatura reciente, que indica que los modelos de regresión regularizada suelen rendir de forma competitiva o mejor que los complejos algoritmos de aprendizaje automático en la predicción de la resistencia del hormigón utilizando conjuntos de datos heterogéneos (Asteris et al., 2021; Kumar et al., 2024). Los estudios centrados en hormigón con agregados reciclados también han puesto de manifiesto los desafíos asociados a modelar la variabilidad de la resistencia derivada de la calidad de los áridos reciclados y las características del hormigón fuente (Ojha et al., 2024; Padmini et al., 2009).

Aunque los modelos de conjunto han demostrado alto rendimiento en algunas aplicaciones que involucran hormigón, su efectividad parece depender del contexto y estar influida por el tamaño del conjunto de datos, su variabilidad y la consistencia de las fuentes de datos (Zhang et al., 2020). Para aplicaciones en pavimentos rígidos, en los que la estabilidad de las predicciones y el control del sesgo son aspectos críticos, los resultados del presente estudio sugieren que modelos más simples y adecuadamente regularizados pueden representar una alternativa más fiable. El rendimiento predictivo logrado en el presente estudio debe interpretarse en el contexto de una evaluación basada en la validación cruzada. Aunque la validación cruzada es ampliamente aceptada para la evaluación de modelos de aprendizaje automático en aplicaciones de ingeniería, la validación externa mediante conjuntos de datos completamente independientes sigue siendo un paso importante para confirmar la transferibilidad de los modelos frente a diferentes fuentes de materiales, prácticas constructivas y condiciones ambientales. En consecuencia, las métricas de rendimiento presentadas deben considerarse indicadores de la capacidad interna de generalización de los modelos, y no de su capacidad predictiva universal.

Diferencias similares entre análisis basados en correlación y el rendimiento predictivo obtenido por la validación cruzada se han reportado en estudios previos de aprendizaje automático que involucraron hormigón con áridos reciclados y otros materiales de construcción. Los análisis de correlación son útiles para identificar tendencias y relaciones predominantes entre variables, mientras que la validación cruzada proporciona una estimación más conservadora y realista del rendimiento de los modelos cuando se aplica a nuevos conjuntos de datos. Por lo tanto, los resultados predictivos presentados en este estudio deben interpretarse principalmente en base a métricas de validación cruzada, y no solo en medidas simples de correlación.

5.6 Implicaciones para el diseño y la práctica de pavimentos rígidos.

Los resultados de este estudio tienen implicaciones prácticas para el uso de hormigón con agregados reciclados en la ejecución de pavimentos rígidos. La fiabilidad demostrada por los modelos de Regresión Lasso y Ridge indica que el aprendizaje automático puede utilizarse eficazmente como herramienta para apoyar la evaluación preliminar de materiales, la optimización de mezclas y el control de calidad, especialmente cuando los recursos disponibles para pruebas experimentales son limitados.

Es importante destacar que la capacidad de los modelos regularizados para proporcionar predicciones sin sesgos significativos y estadísticamente consistentes aumenta la fiabilidad de su aplicación en el dimensionamiento del grosor del pavimento y en la evaluación de su rendimiento. Al integrar datos obtenidos experimentalmente con información de la literatura, la estructura de modelado híbrido propuesta proporciona una representación realista de las condiciones del campo, contribuyendo al uso sostenible del hormigón con áridos reciclados en sistemas de pavimento rígidos.

Para aplicaciones prácticas, la metodología propuesta puede emplearse durante las fases de dosificación preliminar de mezclas, selección de materiales y evaluación de calidad en diseños de pavimentos rígidos. Los ingenieros pueden utilizar el modelo de aprendizaje automático desarrollado para obtener estimaciones rápidas de la resistencia a la compresión basadas en parámetros de dosificación fácilmente disponibles, reduciendo así la dependencia de un gran número de mezclas experimentales durante las fases iniciales de planificación del proyecto. La metodología es especialmente útil en la evaluación de diferentes fuentes de agregados reciclados, distintos niveles de sustitución o distintas composiciones de materiales cementicios.

Los resultados también indican que debe prestarse especial atención a la intensidad del aglutinante, el contenido de cemento, la resistencia del hormigón original y la dosificación del superplastificante, ya que estas variables ejercen mayor influencia en el desarrollo de la resistencia a la compresión. En consecuencia, la optimización de estos parámetros debe priorizarse durante la dosificación del hormigón destinado al pavimento. Por otro lado, la tasa de sustitución por agregados reciclados, cuando se considera de forma aislada, no debe adoptarse como el principal indicador del rendimiento esperado en términos de resistencia, ya que la calidad del agregado y las características de su origen juegan un papel más significativo.

Para aplicaciones de ingeniería, los modelos desarrollados deben considerarse herramientas para apoyar la toma de decisiones, y no sustituir las pruebas estandarizadas de laboratorio. La aprobación final de la mezcla de hormigón destinada al pavimento debe seguir basándose en la verificación experimental, de acuerdo con las especificaciones de diseño y los procedimientos de control de calidad aplicables. Aun así, la metodología propuesta puede reducir sustancialmente el número de mezclas experimentales requeridas durante las etapas de selección de materiales y diseño preliminar de pavimentos.

5.7 Identificación del modelo más adecuado.

La selección del modelo predictivo más adecuado para aplicaciones de pavimento rígido debe basarse no solo en la precisión numérica, sino también en la robustez frente a la multicolinealidad,

el comportamiento de sesgo y la fiabilidad para aplicaciones de ingeniería. En la práctica del diseño de pavimentos rígidos, son esenciales predicciones conservadoras y estadísticamente consistentes de la resistencia a la compresión, ya que este parámetro influye directamente en la determinación del grosor de la placa, el rendimiento a la fatiga y la seguridad estructural a largo plazo. Así, la selección del modelo en este estudio se llevó a cabo mediante un marco de evaluación integrado, combinando métricas predictivas de precisión, análisis de sesgos, evaluación multicolineal utilizando el Factor de Inflación de Varianza (VIF) y análisis de la contribución de variables mediante explicaciones aditivas SHapley (SHAP).

Según la evaluación comparativa presentada en la Tabla 4, la Regresión de Lazo destacó como el modelo más adecuado para predecir la resistencia a la compresión a 28 días de hormigón con agregados reciclados destinados a aplicaciones en pavimentos rígidos. La Regresión de Lazo presentó el coeficiente de determinación más alto ($R^2 = 0,7713$), indicando la mayor concordancia entre los valores predichos y medidos de la resistencia a la compresión entre todos los modelos evaluados. También presentó los valores más bajos de MAE (3,51 MPa), RMSE (4,47 MPa) y MAPE (16,44%), demostrando mayor precisión y consistencia en todo el rango de resistencia analizado. Desde la perspectiva de la ingeniería de pavimentos, el comportamiento del sesgo es particularmente crítico. El Error de Sesgo Medio (MBE) obtenido para el modelo de Lazo fue de $-0,0317$ MPa, un valor prácticamente insignificante, indicando la ausencia de sobreestimación o subestimación sistemática. La estadística t asociada mostró un valor muy bajo, y el valor p (0,8896) fue sustancialmente superior al nivel de significación de 0,05, lo que confirma que las diferencias entre los valores predichos y observados no son estadísticamente significativas y refuerza la fiabilidad del modelo Lasso para la toma de decisiones de ingeniería (Brandes et al., 2018; Hall & Hall, 2017; Patil, 2025).

La robustez de la Regresión de Lazo se justifica además mediante el análisis del Factor de Inflación de Varianza (VIF). Se observaron valores extremadamente altos de VIF para varios parámetros físicamente interrelacionados, incluyendo la relación agua/cemento ($VIF \approx 7836$), la relación agua/cemento efectiva ($VIF \approx 7078$), el contenido de cemento ($VIF \approx 924$) y la intensidad del aglutinante ($VIF \approx 847$), lo que indica una multicolinealidad severa en el conjunto de datos híbrido. Esta multicolinealidad es inherente a variables de dosificación concretas y se vuelve especialmente pronunciada en conjuntos de datos híbridos que combinan datos experimentales y de la literatura. Bajo estas condiciones, los modelos de regresión convencionales y los modelos complejos no lineales están sujetos a inestabilidades. La regresión de lazo mitiga eficazmente este problema mediante la regularización L1, que penaliza variables predictoras redundantes y estabiliza la estimación de coeficientes, aumentando así la capacidad de generalizar bajo condiciones caracterizadas por variables de entrada altamente correlacionadas (Asteris et al., 2021; Kumar et al., 2024). La presencia de multicolinealidad severa en el conjunto de datos híbridos no es inesperada, ya que muchos parámetros concretos de dosificación están físicamente interrelacionados. Por ejemplo, la intensidad del aglutinante, el contenido de cemento, la relación agua/cemento y la relación efectiva agua/cemento se derivan de principios de dosificación relacionados y en conjunto influyen en el desarrollo de resistencia. Aunque estas variables tienen una fuerte correlación estadística, representan diferentes características de ingeniería que rigen el rendimiento del hormigón con agregados reciclados. Por lo tanto, el objetivo de este estudio no fue eliminar variables correlacionadas únicamente basándose en criterios estadísticos, sino preservar información físicamente significativa y relevante para el comportamiento del hormigón destinado al pavimento. La adopción de modelos regularizados de aprendizaje automático permitió mantener estas variables, minimizando al mismo tiempo los efectos adversos de la multicolinealidad sobre la estabilidad de las previsiones.

Se obtuvo una validación física adicional de la adecuación del modelo mediante análisis SHAP, que reveló que la intensidad del aglutinante (media de $|SHAP| \approx 2,61$) y el contenido de cemento ($\approx 2,34$) son los parámetros con mayor influencia en la predicción de la resistencia a la compresión,

seguidos por la resistencia del hormigón original ($\approx 2,05$) y la dosificación del superplastificante ($\approx 1,95$). Estos resultados son totalmente coherentes con el comportamiento del hormigón destinado a pavimentos rígidos, en el que la calidad de la pulpa, el origen de los agregados reciclados y la eficiencia de compactación ejercen una influencia predominante en la capacidad de carga y durabilidad. El índice de severidad del agregado reciclado también mostró una contribución significativa ($\approx 1,25$), confirmando que el efecto combinado de la cantidad y calidad de los agregados reciclados ejerce una mayor influencia que la tasa de reemplazo por los agregados reciclados considerados solos, que presentaron una contribución comparativamente baja al SHAP ($\approx 0,13$). Variables de menor relevancia, como el método de curado, el tamaño máximo del agregado y el contenido de fibras o adiciones minerales, mostraron influencia secundaria dentro del rango estudiado, indicando que sus efectos son en gran medida indirectos o están incorporados a los parámetros predominantes de la mezcla (Jagadesh et al., 2024; Ojha et al., 2024). La predominancia de la intensidad del aglutinante y el contenido de cemento observada en el análisis SHAP es coherente con los mecanismos fundamentales que rigen el desarrollo de la resistencia del hormigón. La intensidad del aglutinante refleja la cantidad de material cementicio disponible para la formación de productos de hidratación y para el desarrollo de una microestructura densa, mientras que el contenido de cemento influye directamente en la formación del gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), que es principalmente responsable del desarrollo de resistencia. Valores más altos de estos parámetros generalmente contribuyen a la mejora de la calidad de la purina, la reducción de la porosidad y el aumento de la capacidad de carga. Por lo tanto, su alta contribución a las predicciones del modelo refleja principios ampliamente establecidos de la tecnología del hormigón y el diseño de materiales para pavimentos rígidos.

La resistencia del hormigón original destacó como otra variable de gran influencia, ya que los áridos reciclados heredan características físicas del hormigón original del que se producen. Los agregados reciclados de hormigón original con mayor resistencia suelen tener un menor nivel de microgrietas, menor deterioro del mortero adherido y mayor integridad del árido. En consecuencia, la calidad del hormigón original influye significativamente en el comportamiento mecánico del hormigón con los agregados reciclados. La alta contribución SHAP asociada a esta variable confirma que la calidad del agregado reciclado no puede representarse adecuadamente solo por la tasa de sustitución, sino que también debe tener en cuenta las propiedades del material fuente. La importancia de la dosificación del superplastificante puede atribuirse a su influencia en la trabajabilidad, dispersión de partículas y eficiencia de compactación. La correcta dispersión de las partículas de cemento favorece una hidratación más uniforme y permite reducir la demanda efectiva de agua sin comprometer la trabajabilidad. Este efecto es especialmente beneficioso en hormigón con agregados reciclados, en los que la mayor capacidad de absorción de agua de los agregados reciclados puede afectar negativamente a las propiedades del hormigón en estado fresco. Por tanto, los resultados del análisis SHAP indican que los aditivos químicos desempeñan un papel significativo en el control del rendimiento del hormigón tanto en estado fresco como endurecido, dentro del rango de proporciones de las mezclas investigadas.

La Figura 6 ilustra la contribución de las variables de entrada individuales a la predicción de la resistencia a la compresión a 28 días utilizando el modelo de Regresión Laso, interpretado mediante análisis SHAP. Los valores absolutos medios de SHAP presentados en la Figura 6(a) cuantifican la importancia global de cada parámetro en la influencia del resultado del modelo, mientras que la Figura 6(b) ofrece una visualización comparativa de los efectos de las variables a lo largo del conjunto de datos.

Aunque la regresión de cresta se acercó a la de la regresión de lazo, con valores similares de R^2 y error, sus errores de predicción ligeramente mayores y su sesgo ligeramente mayor indican menos robustez ante una multicolinealidad severa, ya que la regresión de cresta promueve la reducción de la magnitud de los coeficientes sin eliminar variables redundantes. Los modelos *de aprendizaje en conjunto*, incluyendo Gradient Boosting, XGBoost y Random Forest, mostraron menor

precisión predictiva y una tendencia al sesgo positivo, lo que indica una sobreestimación sistemática de la resistencia a la compresión. Este comportamiento es indeseable en aplicaciones de pavimento rígido, ya que puede resultar en un dimensionamiento no conservador del grosor de la losa y márgenes de seguridad reducidos, especialmente bajo condiciones de tráfico intenso (Ojha et al., 2024; Patil, 2025). La regresión de vectores de soporte (SVR) presentó el rendimiento global más débil, caracterizado por una mayor dispersión de errores y una capacidad de generalización limitada para el conjunto de datos híbrido utilizado en el presente estudio.

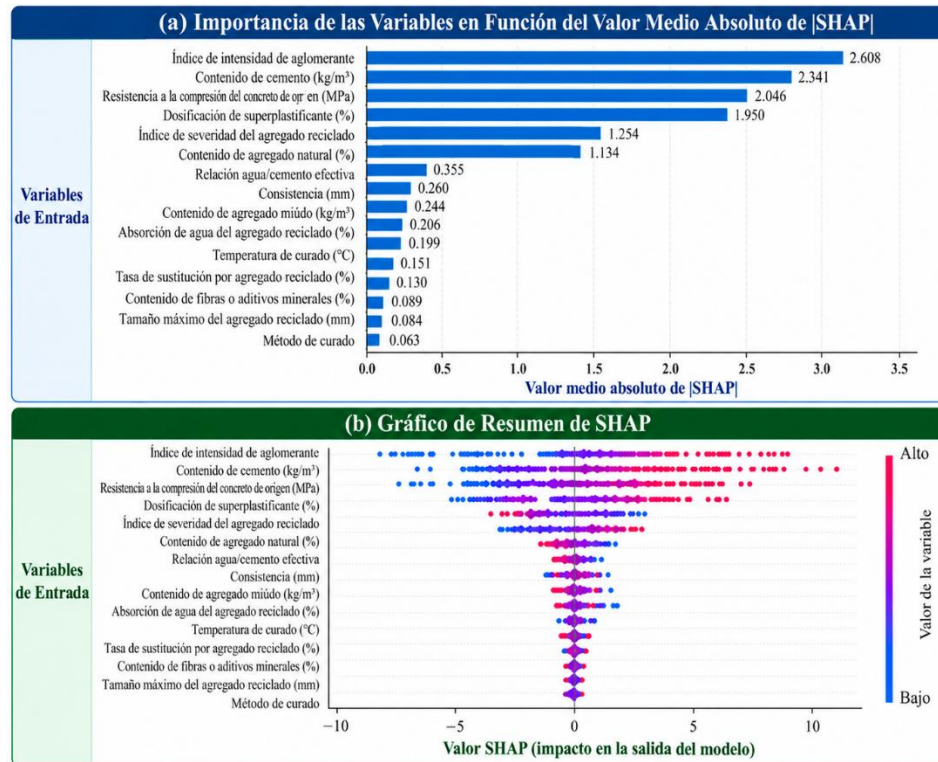


Figura 6. Interpretación basada en SHAP del modelo de regresión de Lasso para la predicción de la resistencia a la compresión a 28 días de hormigón con agregados reciclados: (a) valores absolutos medios de SHAP, que indican la contribución relativa de cada parámetro de entrada; y (b) gráfico resumen SHAP, que ilustra la influencia comparativa de las variables en las predicciones del modelo.

La evidencia integrada de las métricas de precisión predictiva, el análisis de sesgos, la evaluación VIF y la interpretación basada en SAP sobre la importancia de las variables confirma que la regresión de lazo ofrece la estructura más fiable, estable y físicamente coherente para la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón con agregados reciclados en aplicaciones de pavimento rígido. Dentro del ámbito de este estudio, la regresión de lazo se identifica como el modelo más adecuado para apoyar la evaluación de materiales de pavimentación y el diseño sostenible de pavimentos. De forma más amplia, el estudio demuestra que el valor del aprendizaje automático para la predicción de la resistencia del hormigón con agregados reciclados (RAC) depende no solo de la selección del algoritmo, sino también de la calidad y diversidad del conjunto de datos utilizado. El conjunto de datos híbrido de literatura experimental desarrollado en este estudio constituye la principal contribución metodológica, al combinar observaciones fundamentadas experimentalmente con una gama más amplia de condiciones de CRA reportadas en la literatura, mientras que el análisis comparativo de los modelos identifica la regresión de lazo como el enfoque más adecuado dentro del alcance de los datos disponibles.

6. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES PRÁCTICAS

Este estudio desarrolló y evaluó sistemáticamente un conjunto de datos híbrido experimental-literatura para la predicción de la resistencia a la compresión de hormigón con agregados reciclados (RAC) a 28 días destinada a aplicaciones en pavimentos rígidos. El conjunto combina observaciones obtenidas en laboratorio con datos cuidadosamente seleccionados de la literatura para representar un rango más amplio de condiciones de dosificación RAC, características de agregados reciclados y condiciones de curado. Posteriormente, se utilizó análisis por aprendizaje automático para evaluar el rendimiento de diferentes enfoques de modelización dentro de este conjunto de datos heterogéneo. Los resultados demuestran que la principal contribución del estudio es establecer una base de datos de pavimentos más completa y orientada a la aplicación para la predicción de la resistencia RAC, mientras que el análisis de los modelos aporta evidencia sobre la adecuación relativa de diferentes enfoques de predicción.

La investigación experimental confirmó que la resistencia a la compresión del CRA utilizado en pavimentos rígidos está regida por la influencia combinada de las características del aglutinante, la calidad de los áridos reciclados, la resistencia del hormigón fuente y las condiciones de curado. Los valores de resistencia medidos mostraron una variabilidad significativa, especialmente para niveles más altos de sustitución por agregados reciclados, lo que evidencia las limitaciones de las relaciones empíricas convencionales cuando el RAC se emplea en hormigón destinado a pavimentación. Este hallazgo justificó el desarrollo de un marco de previsión basado en datos, adaptado a las proporciones de mezcla relevantes para aplicaciones en pavimento.

El conjunto de datos híbrido integró con éxito los datos experimentales con los resultados reportados en la literatura, permitiendo desarrollar modelos de aprendizaje automático a partir de una gama más amplia de cualidades de los agregados reciclados y composiciones de mezcla. Este enfoque permitió una mejor generalizabilidad y contribuyó a superar la limitación resultante de la cantidad limitada de datos experimentales, una situación común en estudios de materiales destinados a pavimentar. La evaluación comparativa de los modelos de aprendizaje automático demostró que las técnicas de regresión lineal regularizada son más efectivas que los modelos *de conjunto* y los modelos *basados en* núcleos cuando se aplican a conjuntos de datos híbridos de esta naturaleza. Entre todos los modelos evaluados, la regresión Lasso mostró el mejor rendimiento predictivo, con un coeficiente de determinación de 0,7713, un error absoluto medio de 3,51 MPa y un error cuadrático medio de raíz de 4,47 MPa. Estos valores indican una precisión fiable para predecir la resistencia de la evaluación de materiales destinados a pavimentos rígidos. En contraste, los modelos *de aprendizaje en conjunto*, como Gradient Boosting, XGBoost y Random Forest, mostraron valores R^2 más bajos, que oscilaban entre 0,69 y 0,72, y valores RMSE más altos, entre 4,97 y 5,21 MPa, mientras que la Regresión de Vectores de Soporte (SVR) mostró el rendimiento más débil, con RMSE de 5,62 MPa y MAPE superior al 20%. El análisis de sesgo reforzó aún más la adecuación de la Regresión de Lazo, que mostró un Error de Sesgo Medio (EBM) despreciable de $-0,0317$ MPa, y una diferencia estadísticamente no significativa entre las fuerzas predichas y observadas, según indica el valor p de 0,8896. Este comportamiento significativo y estadísticamente consistente y sesgado es especialmente importante para el diseño de pavimentos rígidos, donde estimaciones conservadoras de la resistencia a la compresión son esenciales para garantizar el grosor adecuado de la losa y el rendimiento en fatiga.

La robustez del modelo seleccionado se validó aún más mediante el análisis del Factor de Inflación de Varianza (VIF), que reveló una multicolinealidad severa entre varias variables de dosificación físicamente interrelacionadas. Se observaron valores extremadamente altos de VIF para la relación agua/cemento y la relación efectiva agua/cemento (superior a 7000), así como para el contenido de cemento y la intensidad del aglutinante (superior a 800), reflejando la dependencia física inherente entre estas variables. A pesar de ello, la Regresión de Lazo se mantuvo estable debido a su capacidad de regularización en L1, confirmando su idoneidad para conjuntos de datos de

pavimentación en los que la presencia de variables correlacionadas es inevitable. El análisis SHapley Additive ExPlanations (SHAP) proporcionó información adicional, desde una perspectiva ingenierina, sobre los mecanismos que rigen el desarrollo de la resistencia a la compresión del hormigón con agregados reciclados. La intensidad del aglutinante destacó como la variable con mayor influencia, evidenciando la importancia de la disponibilidad de material cementicio en los procesos de hidratación y formación de microestructuras. El contenido de cemento también mostró una gran contribución, confirmando su papel directo en la formación de productos de hidratación responsables del desarrollo de resistencia. La resistencia del hormigón original se identificó como otro parámetro de gran influencia, ya que la calidad de los agregados reciclados depende en gran medida de las características del hormigón de su origen. Los áridos reciclados procedentes de hormigones de mayor resistencia suelen tener menores niveles de microgrietas y mayor integridad, contribuyendo positivamente al rendimiento mecánico. La dosis del superplastificante también mostró una influencia significativa, ya que mejoró la trabajabilidad, la dispersión de partículas y la eficiencia de compactación, especialmente en mezclas que contienen agregados reciclados con mayor absorción de agua. En conjunto, estos resultados indican que el desarrollo de la resistencia a la compresión del hormigón con agregados reciclados depende no solo de los niveles de sustitución de los agregados reciclados, sino también de la calidad del aglutinante, las características del material fuente y las estrategias para optimizar la mezcla. El índice de severidad del agregado reciclado también demostró que la calidad del agregado ejerce una mayor influencia en el rendimiento de resistencia que la tasa de sustitución considerada por sí sola. La multicolinealidad observada debe interpretarse como una característica inherente de los conjuntos de datos de lotes concretos, y no como una deficiencia del modelado. Muchas variables utilizadas en el diseño de mezclas de hormigón están matemáticamente relacionadas y no pueden tratarse como parámetros completamente independientes. En consecuencia, se consideró necesario mantener las variables correlacionadas para preservar la relevancia desde el punto de vista de la ingeniería y mantener la coherencia con los procedimientos prácticos de dosificación concreta. El desempeño satisfactorio de los modelos regularizados demuestra que es posible obtener predicciones fiables de la resistencia, incluso en presencia de una fuerte dependencia entre las variables.

Desde la perspectiva de la ingeniería de pavimentos rígidos, estos resultados indican que la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón con agregados reciclados (RAC) está gobernada principalmente por relaciones lineales predominantes asociadas con los parámetros de calidad del aglutinante y los agregados. La mayor precisión, el sesgo insignificante, la robustez frente a una multicolinealidad extrema y el comportamiento físicamente interpretable de la regresión de lazo hacen que este modelo sea especialmente adecuado para la toma de decisiones a nivel de material en el diseño de placas de pavimento, estimación de la vida útil por fatiga y selección de materiales impulsada por la sostenibilidad. La tendencia *de los modelos de conjunto* a sobreestimar la resistencia refuerza aún más la importancia de la evaluación de sesgos cuando se aplican enfoques de aprendizaje automático a sistemas de pavimentación en los que la seguridad es un aspecto crítico.

A pesar de los resultados prometedores, deben reconocerse algunas limitaciones. El conjunto de datos híbrido contiene variables que exhiben una multicolinealidad significativa, debido a las relaciones inherentes entre parámetros de dosificación concretos. Aunque las técnicas de regularización han controlado eficazmente su influencia en el presente estudio, la transferibilidad de los modelos desarrollados debería investigarse más a fondo utilizando conjuntos de datos independientes de diferentes regiones geográficas y fuentes de material. Futuros estudios también podrían explorar técnicas avanzadas de selección de variables y reducción de dimensionalidad para evaluar si se puede lograr una precisión predictiva comparable utilizando un conjunto reducido de variables de ingeniería.

La metodología propuesta permite una estimación fiable de la resistencia a la compresión del

hormigón con áridos reciclados, con un error medio de previsión de aproximadamente 3,5 MPa, lo que contribuye al diseño preliminar de materiales destinados a pavimentos rígidos. La metodología ayuda a optimizar las mezclas y a la evaluación de la calidad, al tiempo que reduce la dependencia de una extensa campaña de ensayos en laboratorio durante las etapas iniciales del diseño. Además, la interpretación transparente proporcionada por el análisis SHAP permite a los ingenieros priorizar la calidad del aglutinante y las características de los áridos reciclados durante la dosificación del hormigón para pavimentación, contribuyendo a una construcción sostenible sin comprometer la fiabilidad estructural. También cabe señalar que la validación de los modelos se realizó mediante una estructura de *cinco vías de validación cruzada*, y no utilizando un conjunto de datos externo totalmente independiente. Aunque este enfoque proporciona una evaluación rigurosa de la capacidad predictiva interna, una validación adicional utilizando conjuntos de datos de diferentes regiones geográficas, fuentes agregadas y entornos de construcción contribuiría a aumentar la fiabilidad de la aplicabilidad más amplia de la metodología propuesta. Por tanto, los resultados del presente estudio deben interpretarse como una evaluación comparativa fiable de los algoritmos de aprendizaje automático dentro del alcance del conjunto de datos híbrido disponible. Desde un punto de vista práctico, la metodología propuesta de aprendizaje automático puede ayudar a los ingenieros en la rápida evaluación de mezclas de hormigón con áridos reciclados durante las etapas preliminares del diseño del pavimento y la selección de materiales. La capacidad de identificar las variables con mayor influencia en la resistencia proporciona un apoyo adicional para optimizar las proporciones de las mezclas, manteniendo al mismo tiempo los objetivos relacionados con la sostenibilidad de la construcción.

Las investigaciones futuras deberían centrarse en ampliar la metodología propuesta para predecir la resistencia a la tracción a la flexión, el módulo de elasticidad y el rendimiento a la fatiga, propiedades directamente utilizadas en el diseño mecanicista-empírico de pavimentos rígidos. La incorporación de indicadores de durabilidad a largo plazo, como la contracción, la resistencia a la abrasión y el rendimiento frente a ciclos de congelación y deshielo, contribuiría aún más a mejorar la evaluación de los pavimentos según su ciclo de vida. También se necesitan estudios adicionales para desarrollar conjuntos de datos calibrados en condiciones de campo, que incorporen cargas debidas al tráfico, la exposición ambiental y la variabilidad de la construcción, así como para explorar modelos *de aprendizaje automático informados por la física*, capaces de integrar la mecánica del pavimento con predicciones basadas en datos. Estos avances contribuirán a ampliar aún más la aplicabilidad del aprendizaje automático en la ingeniería sostenible de pavimentos rígidos.

Aunque la metodología desarrollada ha presentado un rendimiento predictivo satisfactorio, su validación se limitó a una *validación cruzada en cinco partes* del conjunto de datos híbrido disponible. Los estudios futuros deberían incorporar conjuntos de datos externos independientes y poblaciones muestrales más amplias para evaluar de forma más completa la capacidad de transferencia y la robustez de los modelos.

2. REFERENCIAS

- Alyami, M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., Alrshoudi, F. (2024). *Machine learning-based prediction of concrete compressive strength using hybrid datasets*. Construction and Building Materials, 390, 131768. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131768>
- American Association of State Highway, & Officials, T. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. AASHTO.
- Asteris, P. G., Apostolopoulou, M., Skentou, A. D., Moropoulou, A. (2021). *Application of machine learning techniques for concrete strength prediction*. Materials, 14(6), 1434. <https://doi.org/10.3390/ma14061434>
- Asteris, P. G., Kolovos, K. G., Douvika, M. G., Roussis, P. C. (2019). *Prediction of self-compacting concrete strength using artificial neural networks*. European Journal of Environmental and Civil

- Engineering, 23(3), 329–347. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1320233>
- Asteris, P. G., Skentou, A. D., Bardhan, A., Samui, P., Pilakoutas, K. (2020). *Predicting concrete strength using machine learning*. Construction and Building Materials, 252, 119134. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119134>
- Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., Maiti, S. (2014). *Recycled aggregate from C&D waste and its use in concrete*. Resources, Conservation and Recycling, 68, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.10.007>
- Brandes, M. R., Butterfield, J., Roesler, J. R. (2018). *Effect of recycled concrete aggregates on strength and stiffness gain of concrete*. PCI Journal, 63(3), 52–65. <https://doi.org/10.15554/pci.06012018.52.65>
- Butler, L., West, J. S., Tighe, S. L. (2016). *Effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between concrete and steel reinforcement*. Cement and Concrete Research, 41(10), 1037–1049. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.004>
- Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K., Barai, S. V. (2007). *Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach*. Journal of Materials in Civil Engineering, 19(5), 379–386. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:5\(379\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(379))
- Chauhan, B. L., Singh, G. J. (2023). *Sustainable development of recycled concrete aggregate through optimized acid–mechanical treatment: A simplified approach*. Construction and Building Materials, 399, 132559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132559>
- Chou, J. S., Pham, A. D. (2013). *Hybrid computational model for predicting bridge construction cost*. Automation in Construction, 35, 331–340. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.016>
- Chou, J. S., Tsai, C. F., Pham, A. D., Lu, Y. H. (2014). *Machine learning in concrete strength simulations: Multi-nation data analytics*. Construction and Building Materials, 73, 771–780. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.054>
- Duan, Z., Kou, S. C., Poon, C. S. (2021). *Using artificial neural networks to predict the compressive strength of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 289, 123155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123155>
- Etcheberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M. (2007). *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*. Cement and Concrete Research, 37(5), 735–742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
- Fanijo, E. O. (2023). *A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregates for pavement construction*. Cleaner Materials, 8, 100159. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100159>
- Gogoi, S., Singh, J. P., Verma, A. (2023). *Multicollinearity effects in machine learning models for concrete*. Materials Today: Proceedings, 72, 2580–2587. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.507>
- Hall, J. W., Hall, J. L. (2017). *Engineering Decision-Making under Uncertainty*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69953-0>
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Ismail, S., Ramli, M., Karim, M. R. (2022). *Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties: A review*. Construction and Building Materials, 340, 127746. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127746>
- Jagadesh, P., Karthik, K., Kalaivani, P. (2024). *Examining the influence of recycled aggregates on the fresh and mechanical characteristics of high-strength concrete: A comprehensive review*. Sustainability, 16(20), 9052. <https://doi.org/10.3390/su16209052>
- Katz, A. (2003). *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*. Cement and Concrete Research, 33(5), 703–711. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01033-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01033-5)
- Khan, M. A., Khan, M. I., Aslam, F. (2022). *Machine learning-based prediction of recycled aggregate concrete strength*. Journal of Building Engineering, 45, 103115. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103115>
- Kumar, M., Samui, P., Kumar, D. R. (2024). *State-of-the-art machine learning models for predicting compressive strength of concrete: A comparative study*. Construction and Building Materials, 375, 130890. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130890>
- Li, L., Wang, Y., Zhang, J., Li, Z. (2022). *Effects of multicollinearity on machine learning prediction of concrete strength incorporating recycled aggregates*. Engineering Structures, 252, 113620. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113620>
- Limbachiya, M. C., Leelawat, T., Dhir, R. K. (2000). *Use of recycled concrete aggregate in high-strength*

- concrete. *Materials and Structures*, 33(9), 574–580. <https://doi.org/10.1007/BF02480538>
- Liu, H., Wu, J., Chen, B. (2021). *Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete using ensemble machine learning techniques*. *Materials*, 14(18), 5263. <https://doi.org/10.3390/ma14185263>
- Lundberg, S. M., Lee, S. I. (2017). *A unified approach to interpreting model predictions*. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 4765–4774.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education.
- Nguyen, T. T., Pham, T. M., Hao, H. (2021). *Prediction of concrete compressive strength using machine learning: A comparative study*. *Structures*, 33, 120–134. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.056>
- Ojha, P. N., Kaura, P., Singh, B. (2024). *Studies on mechanical performance of treated and non-treated coarse recycled concrete aggregate and its performance in concrete: An Indian case study*. *Research on Engineering Structures & Materials*, 10(1), 341–362. <https://doi.org/10.17515/resm2023.53me0728rs>
- Padmini, A. K., Ramamurthy, K., Mathews, M. S. (2009). *Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete*. *Construction and Building Materials*, 23(2), 829–836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006>
- Park, S., Kim, J., Lee, H. (2022). *Machine learning-based prediction of mechanical properties of recycled aggregate concrete under controlled experimental conditions*. *Sustainability*, 14(9), 5407. <https://doi.org/10.3390/su14095407>
- Patil, R. D. (2025). *The performance of concrete with various recycled aggregates: Indian case studies and comparative assessment*. *European Transport Research Review*, 17(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s12544-025-00632-1>
- Pedro, D., de Brito, J., Evangelista, L. (2017). *Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties*. *Construction and Building Materials*, 154, 294–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.185>
- Shahmansouri, A. A., Bengar, H. A., Akbarzadeh Bengar, H. (2021). *Data-driven prediction of concrete properties*. *Engineering Structures*, 226, 111353. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111353>
- Silva, R. V., de Brito, J., Dhir, R. K. (2014). *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*. *Construction and Building Materials*, 65, 201–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
- Tam, V. W. Y., Soomro, M., Evangelista, A. C. J. (2018). *A review of recycled aggregate in concrete applications*. *Journal of Cleaner Production*, 172, 272–291. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.236>
- Tam, V. W. Y., Tam, C. M., Ng, W. C. Y. (2005). *Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach*. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1195–1203. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.025>
- Tamagusko, J., Ferreira, R. M., Jalali, S. (2024). *Practical limitations of laboratory-based datasets in machine learning applications for recycled aggregate concrete*. *Automation in Construction*, 156, 105116. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105116>
- Tank, Y. R., Parmar, J. P., Gadhiya, D. H., Goyani, J. S. (2014). *Experimental study of compressive strength of recycled aggregate concrete*. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(4), 1380–1384.
- Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Alaejos, P., de Juan, M. (2013). *Durability of recycled aggregate concrete*. *Construction and Building Materials*, 40, 1054–1065. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106>
- Xiao, J., Li, W., Fan, Y., Huang, X. (2018). *An overview of study on recycled aggregate concrete in China*. *Construction and Building Materials*, 31, 364–383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.074>
- Yeh, I. C. (1998). *Modeling of strength of high-performance concrete using artificial neural networks*. *Cement and Concrete Research*, 28(12), 1797–1808. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00165-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00165-3)
- Zhang, J., Zhao, Y., Chen, Y. (2020). *Prediction of recycled aggregate concrete strength using support vector machine and ensemble learning*. *Materials & Design*, 190, 108572. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108572>
- Zhuang, Y., Chen, Y., Li, Z. (2021). *Performance comparison of machine learning models for concrete strength prediction*. *Construction and Building Materials*, 276, 122132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122132>