

COMBINED INFLUENCE OF STEEL FIBERS AND MICROSILICA ON THE MECHANICAL PERFORMANCE OF CONCRETE FOR RIGID PAVEMENTS

INFLUENCIA COMBINADA DE FIBRAS DE ACERO Y MICROSÍLICE EN EL DESEMPEÑO MECÁNICO DEL CONCRETO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS

Ruht Thalia, Jimenez Carrion¹; Danna Adamarys, Castillo Abad²; Heber Laureano, Ticona Arapa³

Recibido: 18/12/2025; Evaluado: 28/03/2026; Aprobado: 16/06/2026

DOI: <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica272.8>

ABSTRACT

The objective of the research was to analyze the mechanical behavior of concrete containing microsilica and steel fibers, particularly for use in rigid pavements. With this purpose, 108 specimens—including beams and test cylinders—were produced and subjected to stresses typical of pavement slabs: tension, flexure, and compression. Four combinations were developed: a standard concrete mix and three modified mixes containing steel fibers (1%, 2%, and 3%) and microsilica (5%, 7.5%, and 10%). Satisfactory results were obtained at 28 days, with mix M2 (2% steel fiber + 7.5% microsilica) demonstrating the best performance, achieving a compressive strength of 24,58 MPa, a flexural strength of 4,18 MPa, and a tensile strength of 2,60 MPa. The combination of these two additives yielded the best structural performance, highlighting their potential to enhance pavement durability and mitigate early-stage failures in rigid concrete structures.

Keywords: *fiber-reinforced concrete; microsilica; rigid pavements; mechanical strength of concrete; concrete durability*

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo principal analizar cómo se comporta mecánicamente el concreto cuya mezcla incluye microsílize y fibras de acero, sobre todo en pavimentos rígidos. Con este fin, se produjeron 108 muestras, que incluían vigas y probetas expuestas a las presiones típicas de una losa de pavimento: tracción, flexión y compresión. Se desarrollaron 4 combinaciones: una mezcla de concreto estándar y tres mezclas modificadas con 1%, 2% y 3% de fibra de acero, así como con 5%, 7,5% y 10% de microsílize. Se obtuvieron resultados satisfactorios a los 28 días mostrando que la mezcla M2 (2%Fibra de acero+7,5% microsílize) tuvo el mejor rendimiento, con una resistencia de 24,58 MPa a compresión, de 4,18 MPa a flexión y de 2,60 MPa a tracción. La combinación de ambos aditivos generó el mejor desempeño estructural, evidenciando su potencial para mejorar la durabilidad del pavimento y mitigar fallas tempranas en estructuras de concreto rígido.

Palabras clave: *concreto reforzado con fibras; microsílize; pavimentos rígidos; resistencia mecánica del concreto; durabilidad del concreto*

¹Ruht Thalia, Jimenez Carrion. Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil. Universidad César Vallejo (ROR:0297axj39). Lima, Perú. Correo: rjimenezcar@ucvvirtual.edu.pe. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2181-7111>

²Danna Adamarys, Castillo Abad. Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil. Universidad César Vallejo (ROR:0297axj39). Lima, Perú. Correo: dcastilloaba@ucvvirtual.edu.pe. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-8877>

³Heber Laureano, Ticona Arapa. Dr. en ingeniería civil. Universidad César Vallejo (ROR:0297axj39). Lima, Perú. Correo: hticonaa@ucvvirtual.edu.pe. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8754-9255>

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las exigencias ambientales y los compromisos globales de sostenibilidad han impulsado la búsqueda de materiales más ecológicos. En este contexto, la elaboración de concretos desde subproductos industriales o materiales reciclados reduce las emisiones de CO₂, disminuye el consumo energético y permite obtener mezclas más durables y con menores requerimientos de mano de obra. Dentro de estas innovaciones destaca el concreto autocompactante (CAC), capaz de fluir por gravedad y consolidarse en secciones confinadas sin necesidad de vibración, lo que ha motivado investigaciones orientadas a mejorar sus propiedades mecánicas [1].

En obras viales, el concreto utilizado en pavimentos suele estar expuesto a condiciones severas que pueden inducir deterioro temprano, evidenciado en fisuras estructurales y fisuras por retracción, afectando el desempeño y la durabilidad del pavimento [2]. Para mitigar estos problemas, el concreto adicionado con fibras de acero ha surgido como una alternativa eficiente. Este material incorpora fibras metálicas dentro de la matriz cementicia, cuyo desempeño depende de la geometría y relación de aspecto de las fibras, su contenido, orientación, grado de distribución y adherencia con el concreto [3].

En relación con lo señalado, la investigación tiene como objetivo principal evaluar la influencia del uso combinado de fibras de acero (FA) y microsílíce (MS) en concreto a los 28 días de curado destinado a pavimentos rígidos. Para ello, resulta esencial determinar de qué manera estos aditivos mejoran las propiedades mecánicas del concreto, en la resistencia a la compresión, flexión y tracción.

Asimismo, se pretende analizar la factibilidad de aplicar esta mezcla mejorada en pavimentos expuestos a cargas repetidas, considerando aspectos como su durabilidad y desempeño estructural. Este enfoque contribuye a optimizar el rendimiento del concreto, incrementando su capacidad para soportar las sollicitaciones típicas de los pavimentos rígidos y minimizando el riesgo de fallas tempranas.

2. DESARROLLO

Diversos estudios han evidenciado que las fibras de acero producen un endurecimiento significativo a través de la deformación, conservando su resistencia y tenacidad incluso ante deformaciones extensas [4]. Asimismo, al retrasar la aparición de grietas y restringir su crecimiento, optimizan notablemente la ductilidad del material ante tensiones de tracción. [5]. Las fibras de acero son los elementos más empleados en el concreto debido a su capacidad para controlar la fisuración, y sus efectos se incrementan cuando se combinan con microsílíce [6].

Por otro lado, la microsílíce resulta de la producción del silicio metálico, mediante una reacción a altas temperaturas a partir de cuarzo, coque y hierro. Durante este proceso se generan vapores de SiO₂ que posteriormente se oxidan y condensan en partículas ultrafinas [7]. Más del 95% de estas partículas presentan un tamaño inferior a 1µm y están constituidas principalmente por sílice amorfa con trazas de óxidos metálicos [8]. Su elevada finura permite reducir la porosidad y las reacciones capilares del concreto, aumentando su resistencia y durabilidad, aunque con una reducción en la fluidez de la mezcla [9].

El concreto con adiciones ha ganado aceptación debido a su bajo costo y su contribución a prácticas constructivas más sostenibles [10]. De manera complementaria, el desarrollo de fibras de acero con superficies adherentes, junto con técnicas de mezclado que favorecen su distribución uniforme, ha mejorado significativamente el rendimiento estructural del concreto con fibras como refuerzo [11]. No obstante, el incremento de fibras en la mezcla puede reducir la trabajabilidad, especialmente cuando el contenido de finos es menor al de los agregados gruesos [12].

La razón por la que el concreto es uno de los materiales más utilizados en la ingeniería estructural a nivel global es debido a su resistencia, versatilidad y adaptabilidad para cumplir con diversas necesidades constructivas. Sus orígenes se relacionan directamente con el desarrollo del cemento, y

en sus primeras aplicaciones sin refuerzo se distinguía por su fragilidad, poca resistencia a la tracción y limitada capacidad de deflexión. La incorporación de fibras de acero constituyó un avance trascendental, permitiendo al material resistir esfuerzos de tracción y posicionando al concreto armado como una alternativa eficiente frente a otros materiales en elementos sometidos a flexión. La evolución hacia estructuras más eficientes impulsó el desarrollo del hormigón de alta resistencia, hoy ampliamente utilizado en la construcción contemporánea [13].

La interacción entre la microsilice y las fibras de acero genera una mejora sinérgica significativa. Esta adición conjunta no solo aumenta la resistencia mecánica del concreto, sino que también densifica su estructura porosa, reduciendo la penetración de agentes agresivos y mejorando su durabilidad [14]. Asimismo, la resistencia a la tracción por hendimiento aumenta mientras se adiciona mayor cantidad de fibras [6]. Se ha determinado que un mayor contenido de microsilice y una mayor relación longitud/diámetro de las fibras contribuyen a mejorar significativamente el desempeño mecánico del material [15].

Múltiples investigaciones, a nivel nacional e internacional, han analizado el efecto de la incorporación conjunta de fibras de acero y microsilice en las propiedades del concreto, en este sentido, los autores Jahandari et al. [16] comprobaron que la combinación de 1% de fibra de acero y 8% de humo de sílice mejora significativamente la resistencia a compresión del concreto realizado con agregados tipo A (menor calidad, proveniente de un concreto de baja resistencia) y tipo B (mayor calidad, obtenido de un concreto de alta resistencia) registrándose valores máximos de 58,38MPa y 58,23MPa, respectivamente.

De igual manera, Köksal, Beycioğlu y Dobiszewska [17] identificaron que la mezcla más óptima fue aquella que incorporó 15% MS y 0,70% FA, la cual alcanzó una resistencia a la compresión de 69,3 MPa, además de incrementos en la resistencia a la tracción de 10,01MPa y a la flexión de 10,3MPa, evidenciando que la acción conjunta de ambos

materiales mejora significativamente la tenacidad y el desempeño mecánico del concreto.

Asimismo, Aguilar et al. [18] analizaron un concreto con $f'c=27,46$ MPa, en el que incorporaron fibra de acero reciclada (FAR) y microsilice (MS). Identificaron que la mezcla MD9 que contenía dosificaciones de 12% FAR y 10%MS, fue la que presentó las mayores resistencias mecánicas con 59,86 MPa en compresión, 6,72 MPa en flexión y 4,41 MPa en tracción, además de evidenciar mejoras en el diseño estructural del pavimento. De manera similar, Cuya [19] estudió el concreto $f'c=20,60$ MPa modificado con 12%FA y 10%MS, resultado un aumento considerable en la resistencia a la compresión de hasta 27,80 MPa, así como mejoras en resistencia a la tracción de 4,41 MPa y a flexión de 5,44 MPa.

Así también, de reportar una disminución significativa de la permeabilidad del concreto. En Lima, Accilio et al. [20] también investigaron concreto $f'c=20,60$ MPa con fibra de acero (FA) y microsilice (MS), determinando que la combinación G3(2%FA+10%MS) alcanzó la mejor resistencia en compresión de 35,50 MPa, además de adicionar resistencia a la tracción y flexión, aunque con pérdida de trabajabilidad al aumentar los porcentajes de adiciones de FA y MS.

3. METODOLOGÍA

El presente artículo adoptó una metodología experimental, dado que se elaboraron 108 muestras las cuales fueron 72 probetas y 36 vigas, evaluadas en diferentes mezclas de concreto modificadas con fibras de acero con 1%, 2% y 3% y microsilice 5%, 7,5% y 10%, con el objetivo de analizar su efecto directo en las propiedades mecánicas, tales como la compresión, la flexión y la tracción. Esta perspectiva posibilitó la manipulación controlada de las variables independientes para examinar cómo variaban las variables dependientes vinculadas con el rendimiento mecánico del concreto. Complementariamente, el estudio incorporó un enfoque correlacional, pues no solo se

recurrió a métodos descriptivos, sino que también se buscó identificar el grado de vinculación entre las variables, considerando las proporciones de FA y MS empleadas y las resistencias obtenidas.

La metodología utilizada abarcó la preparación de muestras, el diseño de mezclas, la caracterización de materiales y la realización de pruebas mecánicas. Inicialmente, se caracterizaron los agregados de la cantera Sojo del departamento de Piura, Perú, mediante ensayos de laboratorio. Posteriormente, se elaboró la mezcla de acuerdo con el método ACI 211.1 [21], basándose en un concreto con $f'c=20,60$ MPa sobre el cual se realizaron las modificaciones necesarias para incluir fibras de acero y microsílce en los porcentajes establecidos.

Definidas las proporciones, las mezclas se prepararon en laboratorio mediante dosificación precisa y amasado mecánico, controlando la fluidez y las condiciones ambientales. Tras la mezcla, se moldearon los especímenes requeridos por la normativa: cilindros para los ensayos de compresión y tracción, y vigas prismáticas para las pruebas de flexión. Seguidamente, los especímenes fueron almacenados en laboratorio y sometidos al proceso de curado

correspondiente.

Finalmente, se ejecutaron los ensayos mecánicos, aplicando los procedimientos establecidos en las normas ASTM C39 para compresión, ASTM C496 para tracción y ASTM C78/C293 para flexión [22]. Cada ensayo se desarrolló con equipos calibrados y supervisión especializada, dejando constancia de todas las lecturas necesarias para el análisis posterior.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características Físicas y Mecánicas Fibra de Acero y Microsílce

En la Tabla 1 se indican las características de la FA y MS que fueron adecuadas para su aplicación en el concreto. La fibra de acero presentó una forma recta, con una longitud de 35mm, con 0,70% de carbono y 0,80% de manganeso. Óptima para mejorar el comportamiento a tracción y la tenacidad del material. Asimismo, la microsílce resultó con un tamaño de partícula promedio de $0,15\mu m$ en color gris y un contenido de 92% de dióxido de silicio, todos dentro de valores aceptados para su empleo como adición mineral. Estos parámetros confirman que ambos materiales son adecuados para potenciar el desempeño del concreto.

Tabla 1. Caracterización de la fibra de acero (FA) y microsílce (MS). Fuente: los autores

FA		MS	
Propiedades físicas			
Forma geométrica	Recta	Forma	Polvo ultrafino amorfo
Longitud	35,00 mm	Tamaño	0,15 μm
Diámetro	0,55mm		
Relación L/d	65,00mm	Color	Gris
Propiedades químicas			
Carbono (C)	0,70%	Dióxido de Silicio (SiO ₂)	92%
Manganeso (Mn)	0,80%	Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	1,5%
Silicio (Si)	0,25%	Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	1,0%
Azufre (S)	0,03%	Óxido de Magnesio (MgO)	1,0%
Fósforo (P),	0,02%	Óxido de Azufre (SO ₃)	0,5%
Cromo (Cr)	0,30%		
Níquel (Ni)	0,10%		

4.2. Caracterización de los Agregados

De acuerdo a la Tabla 2, el agregado fino (AF) demuestra un módulo de fineza de 2,95, lo que indica que su granulometría es adecuada para producir mezclas de concreto con buena trabajabilidad. Tanto su peso unitario suelto y compactado de 1454,7 kg/m³ y 1573,25 kg/m³ como su peso específico de 2,62 g/cm³ reflejan una densidad apropiada para concreto convencionales. Asimismo, presentó un contenido de humedad bajo 2,1% y una absorción escasa de 0,71% lo que indica que mantiene poca agua.

Esto posibilita tener un control más exacto de

la relación a/c en el proceso de elaboración de la mezcla. Por su parte, el agregado grueso (AG) posee un tamaño máximo nominal de 3/4", un peso unitario suelto de 1483,44 kg/m³ y compactado de 1571,81 kg/m³, con un peso específico de 2,73 g/cm³. Sus valores de humedad 1,4% y absorción 1,08% también son bajos, lo que indica que se trata de un material de buena calidad y estabilidad.

En conjunto, ambos agregados presentan características físicas que aseguran una mezcla homogénea y consistente, contribuyendo a un concreto con adecuada trabajabilidad, resistencia y durabilidad.

Tabla 2. Evaluación física de los agregados grueso y fino. Fuente: los autores

Propiedades	AF	AG
Cantera	Sojo	Sojo
Módulo de fineza	2,95	-
Tamaño máximo nominal	-	3/4"
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1454,7	1483,44
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1573,25	1571,81
Peso específico (g/cm ³)	2,62	2,73
Contenido de humedad (%)	2,1	1,4
Porcentaje de absorción (%)	0,71	1,08

4.3. Diseño de Muestras

Con relación a la dosificación de los materiales complementarios incorporados al concreto, se definieron las cantidades de fibras de acero (FA) y microsilíce (MS) a emplear en cada mezcla. Estas cantidades fueron determinadas a partir de la mezcla patrón diseñada mediante el método ACI 211.1 [21], lo que permitió calcular los porcentajes y proporciones por metro cúbico correspondientes a cada combinación experimental.

La Tabla 3 presenta las cantidades de materiales empleadas por m³ de concreto para

cuatro diseños experimentales. En el diseño patrón se utilizan 386,80 kg de cemento y 963,55kg de agregado grueso, sin incluir FA y MS. En los diseños modificados, la microsilíce se adiciona al cemento, manteniéndose constante la cantidad de cemento, con porcentajes de 5%, 7,5% y 10%. Por otro lado, la fibra de acero se adiciona al agregado grueso, asimismo el peso total del agregado se conserva constante a medida que aumenta la proporción de fibra 1%, 2% y 3%. El AF y el agua permanecen constantes en todos los diseños, garantizando la trabajabilidad y la consistencia del concreto.

Tabla 3. Diseño de mezcla patrón y de mezclas experimentales. Fuente: los autores

Diseño	Cemento (kg)	MS (kg)	AF (kg)	AG (kg)	FA (kg)	Agua (l)
M0 Patrón	386,80	0,00	745,37	963,55	0,00	202,84
M1(1%FA+ 5% MS)	386,80	19,34	745,37	963,55	9,64	202,84
M2(2%FA+7,5% MS)	386,80	29,01	745,37	963,55	19,27	202,84
M3(3%FA+10% MS)	386,80	38,68	745,37	963,55	28,91	202,84

4.4. Evaluación y Comparación de las Propiedades Mecánicas

A continuación, se detallan los valores obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión para periodos de 7, 14 y 28 días de curado. Este análisis compara el desempeño mecánico de la muestra patrón (M0) frente a las muestras modificadas con diferentes dosificaciones de FA y MS en las muestras experimentales (M1, M2 y M3), permitiendo evaluar el efecto de estos aditivos en el desempeño final del concreto.

Resistencia a la compresión

Las probetas destinadas al ensayo de

resistencia a la compresión se elaboraron siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C39 [22], la cual establece los requisitos y procedimientos necesarios para garantizar la uniformidad y comparabilidad de los resultados entre las distintas muestras evaluadas.

Respecto a la Tabla 4, se aprecia que la muestra M2 obtuvo los mejores resultados de resistencia en función de los días de curado, siendo la más adecuada de acuerdo con los porcentajes de FA y MS incorporados. Esta mezcla alcanzó resistencias de 18,09 MPa, 22,15 MPa y 24,57 MPa durante los 7, 14 y 28 días de curado, respectivamente.

Tabla 4. Valores obtenidos de la resistencia a compresión del concreto para la muestra patrón y mezclas modificadas con FA y MS. Fuente: los autores

Días	Muestras (MPa)			
	Patrón	Experimentales		
	M0(0%FA+0%MS)	M1(1%FA+5%MS)	M2(2%FA+7,5%MS)	M3(3%FA+10%MS)
7	15,55	17,56	18,09	17,00
14	19,34	21,37	22,15	19,84
28	22,18	23,92	24,57	22,48

En la Figura 1, se compara de manera visual el desempeño mecánico entre la mezcla patrón y las mezclas modificadas con FA y MS. Entre los resultados, destaca el grupo con la dosificación M2(2%FA+7,5MS) siendo la

más óptima, la cual superó al patrón en un 16,35%, 14,56% y 10,78% a los 7,14 y 28 días respectivamente, evidenciando el efecto que generan estos aditivos en el comportamiento del concreto.

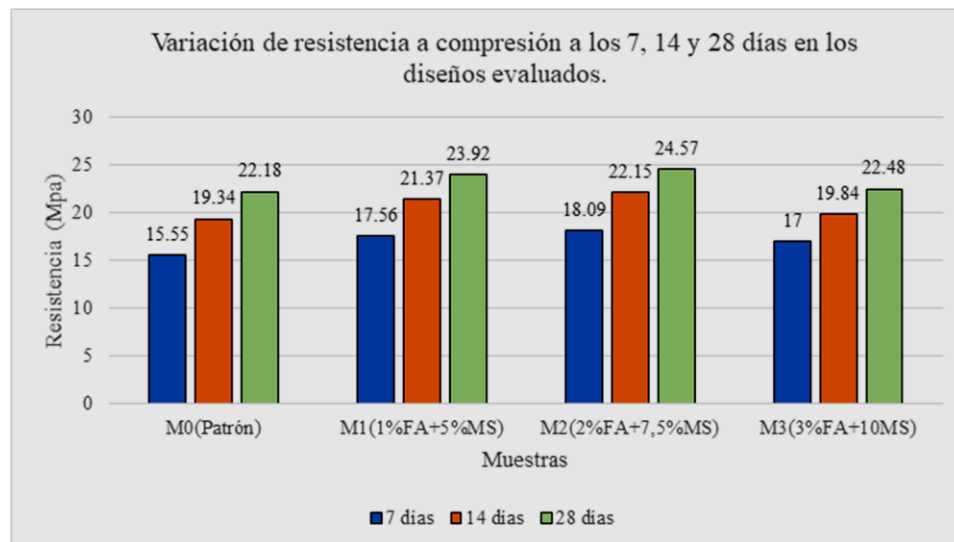


Figura 1. Variación de la resistencia a compresión entre las mezclas M0–M3. Fuente: los autores

Resistencia a la flexión

Asimismo, se detallan los resultados del ensayo de resistencia a la flexión a los 7, 14 y 28 días de curado de las diferentes muestras ensayadas. Tal como muestra la Tabla 5, el diseño M3 presenta una disminución a los 28 días en la resistencia a la flexión de 3,86 MPa

respecto a la muestra M2 con 4,18 MPa considerando que contiene mayor porcentaje de adiciones. Aunque supera al diseño patrón, el incremento excesivo de FA y MS genera una pérdida de eficiencia, probablemente debido a reducción de trabajabilidad o formación de puntos débiles por apelmazamiento de fibras.

Tabla 5. Valores obtenidos de la resistencia a flexión del concreto para la muestra patrón y mezclas modificadas con FA y MS. Fuente: los autores

Días	Muestras (MPa)			
	Patrón	Experimentales		
	M0(0%FA+0%MS)	M1(1%FA+5%MS)	M2(2%FA+7,5%MS)	M3(3%FA+10%MS)
7	2,59	2,94	3,10	2,83
14	3,24	3,64	3,72	3,31
28	3,66	4,03	4,18	3,86

De acuerdo con la Figura 2, se presenta la comparación de los datos obtenidos de las tres muestras de cada diseño experimental. Los resultados indican que la muestra M2, con mayores porcentajes de FA y MS, registró el mayor incremento en la resistencia, alcanzando 19,56%, 14,87% y 14,03% a los 7,

14 y 28 días, respectivamente. En contraste, al añadir una mayor cantidad de adiciones en la muestra M3, la resistencia disminuyó, obteniendo variaciones de 9,35%, 2,33% y 5,44% en los mismos periodos de curado respecto a la muestra patrón.

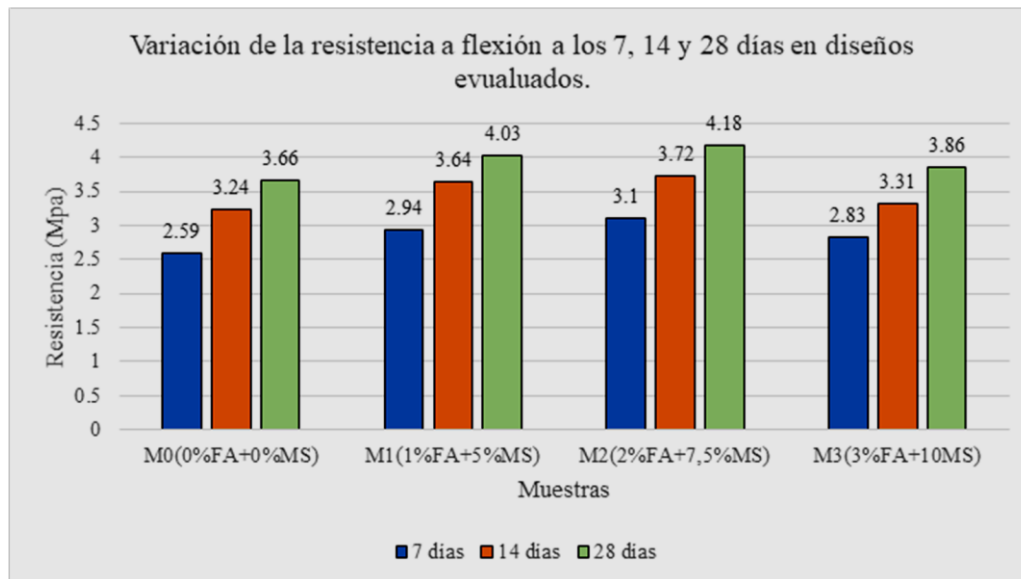


Figura 2. Variación de la resistencia a flexión entre las mezclas M0–M3. Fuente: los autores

Resistencia a la tracción

Por otro lado, se describen los valores obtenidos en el ensayo de resistencia a la tracción efectuado a los 7, 14 y 28 días de curado, realizado para las distintas muestras.

Como se observa en la Tabla 6, los resultados evidencian que el mejor desempeño a tracción a los 28 días corresponde a la muestra M2(2%FA+7,5%MS), alcanzando una resistencia de 2,60 MPa. En contraste, la

muestra M3 obtuvo 2,32 MPa, lo que evidencia una reducción en la resistencia. Por ello, la M2 continúa demostrando un

comportamiento óptimo en términos de refuerzo, compacidad y capacidad de transferencia de esfuerzos

Tabla 6. Valores obtenidos de la resistencia a tracción del concreto para la muestra patrón y mezclas modificadas con FA y MS. Fuente: los autores

Días	Muestras			
	Patrón	Experimentales		
	M0(0%FA+0%MS)	M1(1%FA+5%MS)	M2(2%FA+7,5%MS)	M3(3%FA+10%MS)
7	1,15	1,38	1,49	1,31
14	1,65	1,92	2,00	1,77
28	2,08	2,52	2,60	2,32

La Figura 3 muestran que las muestras M1 y M2 alcanzaron mayores valores de resistencia a la tracción en comparación con la muestra M3, la cual contiene una mayor proporción de

FA y MS en la mezcla. Esta última registró una disminución del 13,75%, 7,63% y 11,66% a los 7, 14 y 28 días, respectivamente, respecto a la muestra sin FA y MS.

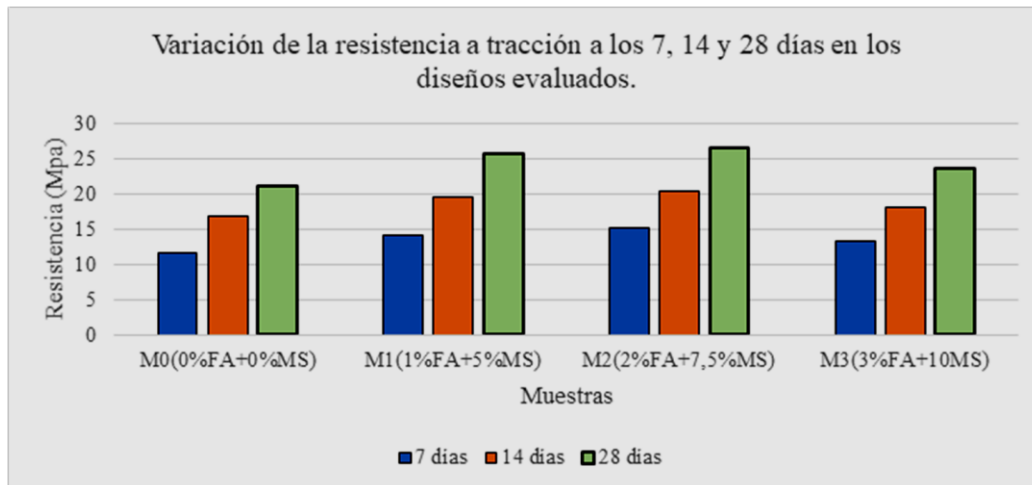


Figura 3. Variación de la resistencia a flexión entre las mezclas M0–M3. Fuente: los autores

4.5. Análisis Estadístico

Se aplicó el análisis descriptivo para evaluar la consistencia de los datos y las diferencias iniciales entre las mezclas. Posteriormente, se empleó el ANOVA con la finalidad de verificar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las muestras evaluadas. A partir de este procedimiento, se aplicó una prueba post hoc de Tukey, la cual permitió identificar de

manera precisa entre qué muestras se presentaban diferencias significativas.

Prueba de normalidad de la resistencia a la compresión

Después de analizar e interpretar los resultados obtenidos, se llevó a cabo la contrastación de la hipótesis. Se comenzó por comprobar si los datos relativos a la resistencia a compresión eran normales mediante la prueba de Shapiro-Wilk (Tabla 7).

Tabla 7. Prueba de normalidad Shapiro-Wilk a los 28 días. Fuente: los autores

Variable	Muestras	Estadístico	Gl	Significancia
Comprensión	M0(0%FA+0%MS)	0,997	3	0,890
	M1(1%FA+5%MS)	0,949	3	0,567
	M2(2%FA+7,5%MS)	0,947	3	0,554
	M3(3%FA+10%MS)	0,900	3	0,384

Como se señala en la Tabla 7, el análisis de prueba de normalidad Shapiro-Wilk mostraron que todas las muestras evaluadas presentan valores de significancia (0,890; 0,567; 0,554 y 0,384) superiores a 0,05, lo que afirma que los datos siguen una distribución normal. En función a ello, se continuó con la formulación de la hipótesis nula y alternativa:

- Hipótesis Nula: La incorporación simultánea de FA y MS en diversas proporciones no produce alteraciones importantes en la resistencia a compresión del concreto para pavimentos rígidos.
- Hipótesis Alternativa: La incorporación

simultánea de FA y MS en diversas proporciones produce alteraciones importantes en la resistencia a compresión del concreto para pavimentos rígidos.

ANOVA de la resistencia a la compresión

Posteriormente, se aplicó el ANOVA considerando los resultados determinados a los 28 días de curado, este análisis permitió determinar si las muestras modificadas, mediante la incorporación de FA y MS, generan un efecto real sobre el comportamiento mecánico del concreto (Tabla 8).

Tabla 8. Resultado del ANOVA para la resistencia a compresión. Fuente: los autores

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	11,765	3	3,922	512,143	0,000
Dentro de grupos	0,061	8	0,008		
Total	11,826	11			

En la Tabla 8, el análisis ANOVA indicó diferencias significativas entre las cuatro muestras, se observa la suma de cuadrados con 11,765 y dentro de los grupos con 0,061 indicando que la mayor variabilidad viene de las mezclas mas no de los ensayos, además, con un valor F de 512,143 alto y una sig. de 0,000 menor a 0,05. Esto confirmó que la inclusión de FA y MS genera variaciones significativas en la resistencia a compresión del concreto, por ende, se acepta la hipótesis

alternativa

Post-Hoc de HSD Tukey de Resistencia a compresión

El análisis Post-Hoc de la resistencia a compresión (Tabla 9) utilizando el método Tukey HSD se presenta a continuación, con el fin de determinar con precisión las mezclas en las que las adiciones de FA y MS generan efectos estadísticamente significativos respecto a la muestra patrón.

Tabla 9. Resultados del Post-Hoc Tukey para la resistencia a compresión. Fuente: los autores

(I) Muestra	(J) Muestra	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
M0(Patrón)	M-1	-1,73000*	0,07110	0,000	-1,9577	-1,5023
	M-2	-2,39000*	0,07110	0,000	-2,6177	-2,1623
	M-3	-0,29333*	0,07110	0,014	-0,5210	-0,0656

Los hallazgos de la Tabla 9 indican que todos los contrastes entre la mezcla patrón (M0) y las mezclas modificadas (M1, M2 y M3) tienen diferencias medias negativas que son estadísticamente relevantes ($p < 0,05$). Esta tendencia señala un aumento considerable de la resistencia a compresión en las mezclas con adiciones, pues el contraste negativo (I-J) muestra que las resistencias de las mezclas alteradas sobrepasan a la del patrón. El mayor incremento se observa en M2, seguida de M1 y M3, lo que evidencia que la interacción entre las FA y la MS mejora de manera sustancial el desempeño mecánico del concreto frente a cargas compresivas.

Prueba de normalidad de la resistencia a la flexión

Por lo consiguiente, se verificó la normalidad de los valores de resistencia a la flexión a los 28 días mediante la aplicación de la prueba Shapiro-Wilk. En la tabla 10, la prueba de

normalidad aplicada a las muestras señaló valores de significancia (1,000; 0,964 y 0,637) mayores a 0,05 lo que permitió corroborar que los valores de resistencia a la flexión presentan un comportamiento acorde con una distribución normal.

En este contexto, se procedió a plantear la hipótesis nula y su correspondiente hipótesis alternativa: lo que permitió corroborar que los valores de resistencia a la flexión presentan un comportamiento acorde con una distribución normal.

- Hipótesis Nula: La resistencia a la flexión del concreto para pavimentos rígidos no se alterada al introducir FA y MS juntos en distintas proporciones.
- Hipótesis Alternativa: La resistencia a la flexión del concreto para pavimentos rígidos se ve alterada al introducir FA y MS juntos en distintas proporciones.

Tabla 10. Prueba de normalidad Shapiro-Wilk para la resistencia a flexión. Fuente: los autores

	Muestras	Estadístico	gl	Significancia
Flexión	M0(0%FA+0%MS)	1,000	3	1,000
	M1(1%FA+5%MS)	1,000	3	1,000
	M2(2%FA+7,5%MS)	0,964	3	0,637
	M3(3%FA+10%MS)	1,000	3	1,000

ANOVA de la resistencia a la flexión

Los datos de la resistencia a la flexión se analizaron posteriormente a través del método ANOVA, tomando en cuenta los cuatro diseños experimentales que combinan FA y MS. En la Tabla 11, los resultados de ANOVA

evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre las mezclas, con un valor F de 705,640 y un valor p menor a 0,05, lo que confirmó que la composición de las mezclas con FA y MS generó un incremento significativo en la resistencia a flexión. De este modo se acepta la hipótesis alternativa.

Tabla 11. Resultado del ANOVA para la resistencia a flexión. Fuente: los autores

Flexión	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0,441	3	0,147	705,640	0,000
Dentro de grupos	0,002	8	0,000		
Total	0,443	11			

Post-Hoc de HSD Tukey de resistencia a la flexión

A continuación, se presenta el análisis Post-Hoc mediante el método Tukey HSD para la variable resistencia a flexión, a fin de establecer las diferencias con significancia

estadística entre la muestra patrón y las mezclas con adiciones (Tabla 12). Los resultados muestran que todas las comparaciones entre la muestra patrón (M0) y las mezclas modificadas (M1, M2 y M3) presentan diferencias de medias negativas y altamente significativas ($p < 0,001$). Este

comportamiento demuestra que, al añadir FA y MS, la resistencia a la flexión de las mezclas aumenta significativamente.

El mayor efecto se observa en M2, seguida de

M1 y M3, lo cual indica que la combinación de ambas adiciones mejora la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de flexión, fortaleciendo la matriz cementicia y su desempeño estructural.

Tabla 12. Resultados del Post-Hoc Tukey para la resistencia a flexión. Fuente: los autores

(I) Muestra	(J) Muestra	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
M-0 (Patrón)	M1	-0,37000*	0,01179	0,000	-0,4077	-0,3323
	M2	-0,51333*	0,01179	0,000	-0,5511	-0,4756
	M3	-0,20000*	0,01179	0,000	-0,2377	-0,1623

Prueba de normalidad a la resistencia a la tracción

A continuación, se presenta la prueba de normalidad aplicada a los valores de resistencia a la tracción a los 28 días. Los valores de significancia (0,637; 0,298; y 0,780) que se indican en la tabla 13 son superiores a 0,05. Esto sugiere que los datos de resistencia a la tracción tienen una distribución normal. A partir de esta base, se establecieron

la hipótesis alternativa y la hipótesis nula.

- Hipótesis Nula: El uso combinado de FA y MS en varias cantidades no produce cambios importantes en la resistencia a la flexión del concreto para pavimento rígido.
- Hipótesis Alternativa: El uso combinado de FA y MS en varias cantidades produce cambios importantes en la resistencia a la flexión del concreto para pavimento rígido

Tabla 13. Prueba de normalidad Shapiro-Wilk para la resistencia a la tracción. Fuente: los autores

	Muestra	Estadístico	gl	Significancia
Tracción	M0(0%FA+0%MS)	0,964	3	0,637
	M1(1%FA+5%MS)	0,871	3	0,298
	M2(2%FA+7,5%MS)	0,871	3	0,298
	M3(3%FA+10%MS)	0,987	3	0,780

ANOVA de resistencia a la tracción

A continuación, mediante el análisis de varianza (ANOVA) se procesaron los datos correspondientes al esfuerzo de tracción a los 28 días, considerando las muestras experimentales con adición FA y MS. En la Tabla 14, las mezclas mostraron variaciones

que fueron estadísticamente significativas, según los resultados, con un valor F de 213,136 y un valor p menor a 0,05, indicando que la composición de las mezclas con FA y MS tuvo un impacto notable en la resistencia a la tracción. Esto demuestra que la hipótesis alternativa es aceptada.

Tabla 14. Resultado del ANOVA para la resistencia a tracción. Fuente: los autores

Tracción	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0,469	3	0,156	213,136	0,000
Dentro de grupos	0,006	8	0,001		
Total	0,475	11			

Post-Hoc de HSD Tukey de Resistencia a la tracción

Del mismo modo, se realizó la prueba Post-Hoc Tukey HSD para la variable resistencia a

tracción, con el fin de determinar la magnitud de las diferencias entre la mezcla patrón y las mezclas con adiciones (Tabla 15). En esta prueba se observa que las diferencias medias entre M0 y las mezclas M1, M2 y M3 son

también negativas y altamente significativas ($p < 0,001$).

Este resultado demuestra un incremento marcado en las muestras experimentales con FA y MS, lo que muestra una mejora significativa tanto en la cohesión interna del

material como en su habilidad para soportar esfuerzos de tracción. Entre las mezclas evaluadas, M2 presenta el mayor aumento de resistencia, seguida de muestra M1 y M3, confirmando el efecto combinado de ambas adiciones en la respuesta mecánica del material.

Tabla 15. Resultado del Post-Hoc Tukey para la resistencia a tracción. Fuente: los autores

(I) Muestra	(J) Muestra	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
M-0 (Patrón)	M1	-0,42000*	0,02211	0,000	-0,4908	-0,3492
	M2	-0,52000*	0,02211	0,000	-0,5908	-0,4492
	M3	-0,24000*	0,02211	0,000	-0,3108	-0,1692

5. CONCLUSIONES

Se determinó que la adición conjunta de fibras de acero (FA) y microsilice (MS) produce un incremento significativo en el desempeño mecánico del concreto. Por ello, la mezcla M2 (2%FA+7,5%MS) alcanzó los valores más altos de resistencia, registrando 24,57 MPa en compresión, 4,18 MPa en flexión y 2,60 MPa en tracción a los 28 días de curado, superando a la mezcla patrón (M0) en un 10,78%, 14,03% y 11,66%, respectivamente. Lo cual evidenció su eficacia como diseño óptimo.

La muestra M3(3%FA+10%MS) experimentó una disminución en su resistencia a la compresión de 22,48MPa, pese a que sus valores fueron más altos que los de la mezcla patrón, un 3,86 MPa en flexión y 2,32 MPa tracción, lo que sugiere que un exceso de FA y MS generó una pérdida de eficiencia, posiblemente por reducción de trabajabilidad.

La prueba Post-Hoc Tukey y el ANOVA confirmaron que las diferencias vistas entre las mezclas son estadísticamente relevantes ($p < 0,05$), esto indica que el uso de MS y FA tiene un efecto benéfico en las características mecánicas del concreto. Específicamente, la combinación M2(2%FA+7,5%MS) mostró el incremento más destacado en lo que respecta a compresión, flexión y tracción.

Esto indica que este porcentaje de adiciones permite que la cohesión interna y la capacidad de transferencia de esfuerzos del material mejoren. Por otro lado, la mezcla M3(3%

FA+10%MS), a pesar de superar a la mezcla patrón (M0), presentó una reducción en la eficiencia mecánica respecto a M2, lo que evidencia que un exceso de FA y MS genero problemas de trabajabilidad.

6. FINANCIAMIENTO

La investigación que ha dado origen a este artículo no ha recibido el aporte financiero de ninguna fuente.

7. CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores hacen constar que no poseen ningún tipo de conflicto de interés que pueda influir en la objetividad y transparencia del presente estudio.

8. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

DCA y RJC: Identificación y formulación del problema de investigación; recolección y estudio teórico de fundamentos relacionados con el asunto; organización de la metodología; diseño y ejecución de pruebas experimentales; elaboración de ensayos en el laboratorio; manejo y análisis de los datos; interpretación de los hallazgos; evaluación de mejoras enfocadas en pavimentos rígidos y preparación del manuscrito principal. HTA: Orientación metodológica; supervisión del diseño experimental; revisión técnica y académica del manuscrito; aportes en la interpretación de resultados; aprobación final de la versión enviada.

9. REFERENCIAS

- [1] H. Okamura y M. Ouchi, "Self-Compacting Concrete," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 5-15, 2003.
- [2] A. A. C. Romero, "Sistemas de reparación estructural de pavimento rígido con inyecciones de resinas epóxicas," *Revista Ingeniería y sus Alcances*, vol. 6, no. 14, 2022.
- [3] J. Thomas y A. Ramaswamy, "Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 5, pp. 385-392, May 2007.
- [4] K. Liu, L. Lu, F. Wang y W. Liang, "Theoretical and experimental study on multi-phase model of thermal conductivity for fiber reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 148, pp. 465-475, 2017.
- [5] M. K. Lee, "Crack opening evaluation of highly flowable strain hardening fiber reinforced concrete (HF-SHFR) under tensile and shear forces," en *Proceedings of the ASCE / fib International Workshop on Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC) and Ultra-High-Performance Concrete (UHPC)*, 2014, pp. 13-22.
- [6] Y. Zheng et al., "Mechanical properties and durability of steel fiber-reinforced concrete: A review on 137 papers," *Construction Materials*, vol. 5, art. 100086, 2024.
- [7] R. Siddique, "Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties," *Construction & Building Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 303-317, 2011.
- [8] M. I. Khan, "Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties," *Construction & Building Materials*, vol. 25, no. 5, pp. 992-1002, 2011.
- [9] Z. Wu, C. Shi y K. Khayat, "Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials," *Cement and Concrete Composites*, vol. 71, pp. 97-109, 2016.
- [10] T. M. Borhan, M. S. Abo Dhaheer, y Z. A. Mahdi, "Characteristics of Sustainable Self-compacting Concrete Reinforced by Fibres from Waste Materials," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 45, no. 5, pp. 4359-4367, 2020.
- [11] A. E. Naaman, "Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 241-252, 2003.
- [12] R. N. Mohamed, "Steel fibre self-compacting concrete under biaxial loading," *Construction and Building Materials*, vol. 232, pp. 117441, 2019.
- [13] A. A. Shah y Y. Ribakov, "Recent trends in steel fibered high-strength concrete," *Materials & Design*, vol. 32, no. 8-9, pp. 4122-4151, 2011.
- [14] S. S. Rahimian Koloor y M. Petru, "Temperature impact on engineered cementitious composites containing steel fibers and silica fume," *Construction and Building Materials*, vol. 306, art. 124804, 2021.
- [15] S. Abbas, X. Su, Y. Zheng y X. Wang, "Exploring mechanical and durability properties of ultra-high-performance concrete: Effect of steel fiber length and dosage," *Construction and Building Materials*, vol. 83, pp. 237-249, 2015.
- [16] S. Jahandari et al., "Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concretes Containing Silica Fume and Steel Fibres," *Materials*, vol. 14, no. 22, p. 7065, Nov. 2021, doi: 10.3390/ma14227065
- [17] F. Köksal, A. Beycioğlu, and M. Dobiszewska, "Optimization Based on Toughness and Splitting Tensile Strength of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Incorporating Silica Fume Using Response Surface Method," *Materials*,

vol. 15, no. 18, p. 6218, Sep. 2022, doi: 10.3390/ma15186218.

- [18] A. Aguilar Gomez and Y. J. Dipaz Gamboa, “*Efecto de la incorporación de fibras de acero reciclado de neumáticos y microsilice en el concreto para el uso en pavimento rígido en la Av. Javier Pérez de Cuéllar, Ayacucho, 2021*”, Tesis de pregrado, Univ. Continental, Ayacucho, Perú, 2021.
- [19] E. T. Cuya Pillaca, “*Fibras de acero reciclado de neumáticos y microsilice en las propiedades del concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$, para el uso en pavimento rígido, Av. La Victoria, distrito San Juan Bautista – Ayacucho – 2022*,” Tesis de Título Profesional, Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2022.
- [20] Y. M. Accilio Quiquia and T. Chancas Quispe, “*Evaluación del concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ agregando fibras de acero y microsilice*,” Tesis de Título Profesional, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, 2022.
- [21] American Concrete Institute, “*Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, ACI Standard 211.1-91*” (Reapproved 2009), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, EE. UU., 2009.
- [22] S. P. Muñoz Pérez, M. E. Rivera Segura, Y. A. Alejandria Bustamante, and L. I. Villena Zapata, “Study of the combined effect of coffee husk ash and polypropylene fibres on the mechanical properties of concrete,” *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 32–41, Feb. 2024.

10. LICENCIA Y DERECHO DE AUTOR

Esta obra está licenciada bajo la Licencia Creative Commons Atribución Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Los autores conservan los derechos de autor de los artículos publicados y otorgan al editor el

derecho a publicarlos, a ser citados como su editor original en caso de reutilización y a distribuirlos en todos los formatos y medios.

11. LICENSE & COPYRIGHT

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-NC-SA 4.0)

Authors retain copyright of the published papers and grant to the publisher the right to publish the article, to be cited as its original publisher in case of reuse, and to distribute it in all forms and media.