



# REVISTA INGENIO

## Adoquines de hormigón ecoamigables fabricados con la incorporación de una mezcla de micro-nano sílice

### Eco-friendly concrete pavers made with silica fume and nanosilica additions

Mohammad Farid Alvansaz | Universidad Central del Ecuador, Ecuador

Byron Arévalo | Universidad Central del Ecuador, Ecuador

Julio Arévalo | Universidad Central del Ecuador, Ecuador

#### HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recepción: 21/02/2022  
Aceptación: 18/04/2022

#### PALABRAS CLAVE

Adoquines de hormigón, ecoamigable, microsíllice, nanosíllice, propiedades físico-mecánicas, durabilidad.

#### KEY WORDS

Concrete pavers, eco-friendly, silica fume, nanosilica, physical-mechanical properties, durability.

#### RESUMEN

En el presente estudio, se investiga la influencia del uso de micro y nanopartículas de sílice como sustituto parcial del cemento sobre las propiedades físico-mecánicas de adoquines de hormigón. Se reemplazaron porcentajes de microsíllice (5%, 10% y 15%) y nanosíllice (1%, 1,5% y 3%) por cemento al peso, y una combinación de ambos materiales con porcentajes de resultados óptimos. El microsíllice al 15%, nanosíllice al 3% y la combinación de ambos materiales (mezcla mix), resultó en un aumento de la resistencia a la compresión en un 28%, 12% y 23%, respectivamente, en comparación con la mezcla de control. Los adoquines sometidos a los ensayos establecidos en la norma NTE INEN 3040, obtuvieron resultados muy satisfactorios. Finalmente, se concluyó que las adiciones con nano y microelementos de sílice permiten obtener adoquines con mejores desempeños y durabilidad, contribuyendo así con la reutilización de materiales alternativos y subproductos de procesos industriales, generando un beneficio medioambiental directo.

#### ABSTRACT

In the present study, the influence of the use of micro and nano particles of silica as a partial substitute for cement on the physical mechanical properties of concrete pavers is investigated. Percentages of microsilica (5%, 10%, and 15%) and nanosilica (1%, 1,5% and 3%) were replaced by cement by weight, and a combination of both materials with percentages of optimal results. The 15% microsilica, 3% nanosilica and the combination of both materials (mixture mix), resulted in an increase in compressive strength by 28%, 12% and 23%, respectively, compared to the mixture of control. The paving stones subjected to the tests established in the NTE INEN 3040 standard, obtained very satisfactory results. Finally, it was concluded that the additions with nano and microelements of silica allow to obtain pavers with better performance and durability, thus contributing to the reuse of alternative materials and by-products of industrial processes, generating a direct environmental benefit.

## I. INTRODUCCIÓN

Aunque los adoquines hechos de concreto u hormigón pueden ser un producto relativamente nuevo, su uso como material de revestimiento no es reciente, ya que se los utiliza desde tiempos inmemoriales [1]. Los adoquines de hormigón prefabricados poseen diferentes formas y tamaños, tienen superficies excelentes, son

duraderos, resistentes, económicos y requieren menos mantenimiento cuando son colocados correctamente. [2]. Un pavimento articulado (adoquinado) constituye una excelente elección de entre otros tipos de pavimentos (rígidos y flexibles) por sus buenas prestaciones en la relación costo-rendimiento y por su alto potencial de

reutilización [3]. Los adoquines de hormigón son utilizados ampliamente en edificios industriales, municipales y gubernamentales [4].

El hormigón se considera uno de los materiales más utilizados en el mundo, con una producción anual estimada de 27,3 mil millones de toneladas en 2015, lo que da un promedio de  $1,6 \text{ m}^3$  por persona en la tierra [5]. El cemento Portland, el aglutinante de hormigón esencial, representa casi el 80% de las emisiones totales de  $\text{CO}_2$  del hormigón, compartiendo entre el 5% y el 7% de las emisiones totales de  $\text{CO}_2$  del planeta [6]. Es probable que la demanda de cemento Portland aumente en casi un 200% con respecto a las tasas de 2010 para 2050, alcanzando los 6000 millones de toneladas al año [7].

Existe un gran problema asociado con los desechos producidos por las industrias responsables de la contaminación ambiental. El deber de la industria de la construcción es ayudar al mundo a controlar la contaminación mediante la utilización, reutilización o eliminación de desechos industriales para incorporarlos en la fabricación de hormigón u otros materiales relacionados con la construcción, como es el caso de los adoquines de hormigón. [8]. En la actualidad existen varios materiales a base de sílice (puzolanas) que se los puede utilizar como sustituto del cemento hasta cierto porcentaje en el hormigón, entre los cuales podemos mencionar a las cenizas volcánicas, microsílíce, nanosílíce, metacaolín, la ceniza de la cáscara de arroz u otros materiales de desecho complementarios que provocan menores emisiones de dióxido de carbono que los tradicionales, al tiempo que ofrecen la misma fiabilidad y una durabilidad mucho mayor [9].

La incorporación de micro y nanopartículas de sílice en el hormigón mejoran el efecto de relleno (empaquetamiento) y distribución del tamaño de partícula [10], disminuyendo así la porosidad en el concreto y aumentando la reacción puzolánica con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o CH) para producir gel CSH (silicato de calcio hidratado), especialmente en la zona de transición interfacial (ITZ) entre la pasta de cemento y el agregado, con lo cual se consigue aumentar la resistencia mecánica del hormigón, (especialmente en los primeros días), su durabilidad e impermeabilidad [11]. Las partículas de nano y microsílíce llenan los vacíos de la estructura del gel CSH y actúan como núcleo para unirse fuertemente con otras partículas del mismo gel [12]. Esto significa que la aplicación de nanosílíce reduce la tasa de lixiviación de calcio de las pastas de cemento y, por lo tanto, aumenta su durabilidad. El mecanismo principal de este principio de funcionamiento está relacionado con la superficie específica alta del nanosílíce, porque funciona como sitio de nucleación para la precipitación del gel CSH [13].

## II. MATERIALES Y EXPERIMENTACIÓN

En la presente investigación se realizó una mezcla de hormigón con una resistencia base a la compresión de 51,65 MPa para la fabricación de adoquines. Se utilizó micro y nanopartículas de sílice como sustituto parcial del cemento en diferentes porcentajes. Para adoquines con microsílíce se utilizaron tasas de reemplazo de 5%, 10% y 15%, mientras que para los adoquines con nanosílíce se usaron porcentajes de 1%, 1,5% y 3%. Mediante el ensayo de resistencia a la compresión simple se obtuvieron los mejores resultados (óptimos) de porcentaje de reemplazo, con lo cual se partió para realizar una combinación entre nano y micropartículas de sílice (mezcla mix) con el fin de evaluar las propiedades físicas y mecánicas mencionadas en la norma NTE INEN 3040: 2016 para adoquines de hormigón.

### MATERIALES

#### 1. Agregados

Los agregados utilizados en la presente investigación pertenecen a la cantera de Holcim Pifo, ubicada dentro de la provincia de Pichincha, cantón Quito. La mina está conformada por roca andesita con tonalidades rosadas y en transición con andesitas grises que subyacen, las cuales fueron alteradas tectónicamente en el sitio. Los agregados poseen características favorables para la fabricación de hormigón. Los ensayos normalizados para agregados pétreos se mencionan en la norma NTE INEN; en la tabla 1 se especifica cada uno de ellos (ver Tabla 1).

Se empleó la arena fina no lavada y el agregado grueso N.º 8 de la mina de Holcim Pifo. El agregado grueso posee un tamaño máximo nominal de 3/8 de pulgada (9,53 mm). En la tabla 2 se muestran las propiedades y características de los agregados (ver Tabla 2).

#### 2. Cemento

El cemento utilizado fue el Holcim Utká tipo MS, cuyo valor de densidad es de  $2,94 \text{ g/cm}^3$ , el cual ha sido diseñado específicamente para la fabricación de elementos de hormigón prefabricados, como es el caso de adoquines.

#### 3. Microsílíce

El microsílíce utilizado en la investigación es MasterLife SF 100, el cual es un aditivo mineral compuesto de microsílíce compactada con una superficie específica de  $15.000 \text{ m}^2/\text{kg}$ , empleada como aditivo en la elaboración de hormigones y morteros, fabricado por la empresa química alemana multinacional BASF y distribuido en el

**Tabla 1.***Normativa que establece los requerimientos del agregado pétreo*

<i>Ensayo</i>	<i>Norma</i>
-Abrasión	INEN 860
-Colorimetría	INEN 855
-Densidad real específica Agregado fino	INEN 856
Agregado grueso	INEN 857
-Capacidad de absorción	INEN 856 INEN 857
-Contenido de humedad de los agregados	INEN 862
-Densidad aparente suelta y compactada	INEN 858
-Granulometría Agregado fino	INEN 696
Agregado grueso	INEN 696

**Tabla 2.***Propiedades de los agregados pétreos*

<i>Materiales</i>	<i>Absorción</i> %	<i>Densidad real</i> g/cm <sup>3</sup>	<i>Densidad aparente compactada (DAC)</i> g/cm <sup>3</sup>	<i>Humedad</i> %	<i>Módulo de finura</i> s/u
Arena	3,20	2,51	1,67	1,79	3,10
Ripio	2,49	2,57	1,39	1,44	5,84

**Tabla 3.***Propiedades del microsílíce MasterLife SF 100*

<i>Caracterización del microsílíce MasterLife SF 100</i>	
Finura:	menores a 1 mm
Porcentaje pasando 45 mm:	95-100 %
Forma:	amorfa
Partícula:	esférica
Gravedad específica:	2,2
Norma:	cumple la norma ASTM C-1240
Superficie específica:	18,0 - 22.000 m <sup>2</sup> /kg

Ecuador por Imperquik en la ciudad de Quito. Cumple con los requisitos expresados por la norma ASTM C 1240. En la tabla 3 se muestran las propiedades del microsílíce MasterLife SF 100 (ver Tabla 3).

#### 4. Nanosílíce

El nanosílíce empleado en la investigación es el Aerosil® 200, el cual está compuesto de una sílice pirogénica hidrofílica con una superficie específica de 200.000 m<sup>2</sup>/kg, que le da la cualidad de nanocompuesto. La empresa que lo fabrica es la compañía multinacional alemana Evonik, distribuido en el Ecuador por Comerquim Cía. Ltda., en la ciudad de Guayaquil. Es utilizado en la elaboración de

pinturas, selladores, adhesivos, en la industria cosmética, geles, gomas de silicona, aglutinantes, espesamiento y antiaglutinantes. En la tabla 4 se muestra las propiedades del nanosílíce Aerosil 200 (ver Tabla 4).

#### 5. Aditivo

Se empleó en la investigación el aditivo plastificante Sika® Paver HC-1, para mezclas secas de concreto en elementos prefabricados, el cual es necesario debido a la demanda adicional de agua que requieren las mezclas realizadas con nano y microsílíce. Se trata de un aditivo plastificante usado como ayudante de compactación de mezclas de concreto de asentamiento cero.

**Tabla 4.***Propiedades del nanosílice Aerosil® 200*

<i>Caracterización del nanosílice Aerosil® 200</i>	
Tamaño	3 nm a 40 nm
Forma	amorfa
Superficie específica	200 ± 25 m <sup>2</sup> /g
Densidad aparente	aprox. 50 g/l
Densidad compactada	120 g/l
Humedad	≤ 1,5% (peso)
Pérdida ignición	≤ 1,0% (peso)
PH	3,7-4,5
Contenido SiO <sub>2</sub>	> 99,8% (peso)
Superficie específica	200/g

**Tabla 5.***Dosificación de mezcla de adoquines patrón por m<sup>3</sup> de hormigón*

<i>Dosificación de la mezcla patrón (kg)</i>				
Cemento	Arena	Ripio	Agua	w/c
482	973	598	186	0,39

**Tabla 6.***Dosificación para mezclas de hormigón con porcentajes de nano y microsíllice*

<i>Dosificaciones de mezclas en porcentajes de reemplazo de cemento por micro y nanosílice (kg)</i>						
Porcentajes	Cemento	Arena	Ripio	Agua	Micro / Nano SiO <sub>2</sub>	Aditivo
5% micro-SiO <sub>2</sub>	12,65	26,86	16,50	5,67	0,67	0,067
10% micro-SiO <sub>2</sub>	1,33	26,86	16,50	5,67	11,98	0,13
15% micro-SiO <sub>2</sub>	2,00	26,86	16,50	5,67	11,31	0,16
1% nano-SiO <sub>2</sub>	13,18	26,86	16,50	5,67	0,13	0,16
1,5% nano-SiO <sub>2</sub>	13,11	26,86	16,50	5,67	0,20	0,21
3% nano-SiO <sub>2</sub>	12,91	26,86	16,50	5,67	0,40	0,27

## 6. Agua

En la investigación, el agua potable se utiliza para mezclar y curar.

### DISEÑO DE MEZCLA

Para el diseño de los adoquines de hormigón se siguieron las recomendaciones de dosificación dadas por el comité ACI-211-1 y ACI 318-08, además se considera una resistencia especificada a la compresión para adoquines de 42 MPa (INEN 30-40) y una resistencia requerida de 51,65 MPa. En la tabla 5 se muestra la dosificación de la mezcla patrón para la fabricación de los adoquines calculado para la presente investigación (ver Tabla 5).

A partir de la dosificación de control, se calcularon las

dosificaciones para las sustituciones de microelementos de sílice en varios porcentajes de reemplazo (5%, 10% y 15%) y nanoelementos de sílice (1%, 1,5% y 3%) sobre el peso del cemento, para una cantidad de 23 adoquines tipo jaboncillo (dimensiones 20 x 10 x 6 cm). En la tabla 6 se muestran las dosificaciones tanto para microsíllice como para nanosílice (ver Tabla 6).

Una vez fabricados los adoquines se realizó el curado mediante la inmersión en agua a una temperatura de 23 °C ± 2° en tanques de almacenamiento. En función de los mejores resultados obtenidos en el ensayo de compresión simple a los 28 días de edad, se eligió los porcentajes óptimos para diseñar una mezcla mix (combinación 15% microsíllice + 3% nanosílice). Para obtener una mezcla mix de comparación se decidió elaborar una mezcla

**Tabla 7.**

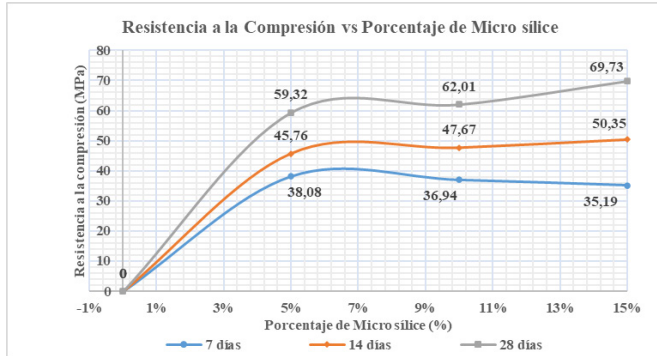
Dosificación para mezclas de hormigón mix

Dosificaciones de mezclas mix en porcentajes de reemplazo de cemento por MS y NS (kg)

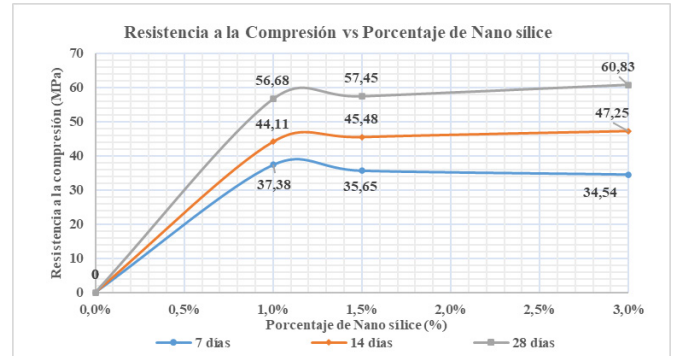
Mezclas mix	Cemento	Arena	Ripio	Agua	Microsílice	Nanosílice	Aditivo
7,5% MS-2% NS	12,05	26,86	16,50	6,05	1,00	0,27	0,21
15% MS-3% NS	10,92	26,86	16,50	6,05	2,00	0,40	0,27

**Figura 1.**

Curva de resistencia a la compresión vs. porcentaje de microsíllice

**Figura 2.**

Curva de resistencia a la compresión vs. porcentaje de nanosílice



adicional con porcentajes menores a los óptimos. Se eligió una mezcla mix de 7,5% de microsíllice y 2% de nanosílice, con el fin de obtener una mezcla mix óptima. En la tabla 7 podemos observar la dosificación para dichas mezclas (ver Tabla 7).

#### MÉTODO DE MEZCLADO

Las nanopartículas de sílice al poseer una granulometría muy fina son difíciles de manipular de forma normal, ya que poseen una superficie específica igual a 2.000.000 cm<sup>2</sup>/g, lo que representa un alto consumo de agua y se dificulta al aplicarlo en mezclas de hormigón secas como el diseño de la presente investigación. Se realizó el mezclado mediante un agitador mecánico (200 r/min) de los nanocompuestos directamente en una parte del agua de diseño (50%) por separado durante 30 a 45 minutos, previo a la unión con los demás componentes del hormigón. La incorporación del microsíllice a la mezcla se la realizó de forma similar al cemento (estado seco).

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

Con el fin de obtener un porcentaje óptimo de reemplazo de nano y micropartículas de sílice se llevaron a cabo pruebas de resistencia a la compresión simple en los adoquines de hormigón. Los resultados a los 7, 14 y 28 días de edad se muestran en las figuras 1 y 2 (ver Figuras 1 y 2).





El porcentaje de dosificación de microsíllice que mejores resultados arrojaron a la edad de 28 días fue la del 15%, con un promedio de resistencia de 69,73 MPa, lo cual representa un incremento de 28% respecto a la resistencia del adoquín patrón (54,46 MPa). El porcentaje de dosificación de nanosílice que mejores resultados arrojó a la edad de 28 días fue la del 3%, con un promedio de resistencia de 60,83 MPa, lo que representa un incremento 12% respecto a la resistencia del adoquín patrón (54,46 MPa). Con base en estos resultados, los porcentajes óptimos para realizar la mezcla mix son 15% de microsíllice y 3% de nanosílice.

Para obtener una mezcla de comparación se decidió elaborar una mezcla adicional con los porcentajes menores a los óptimos. Se eligió una mezcla mix de 7,5% de microsíllice y 2% de nanosílice, con el fin de obtener una mezcla mix óptima, cuyos resultados de resistencia a la compresión simple se muestran a continuación (ver Figura 3).

La dosificación de 15% de microsíllice y 3% de nanosílice a la edad de 28 días obtuvo una resistencia promedio de 67,15 MPa lo cual representa un incremento de 23% de la resistencia conseguida del adoquín patrón (54,46 MPa). La dosificación de 7,5% de microsíllice y 2% de nanosílice a la edad de 28 días obtuvo una resistencia promedio de 62,36 Mpa, lo cual representa un incremento de 15% de la resistencia del adoquín patrón (54,46 MPa). Con base en los resultados obtenidos, el porcentaje óptimo del mix corresponde al 15% de microsíllice y 3% de nanosílice. La última fase de la investigación consistió en someter a los adoquines óptimos a ensayos normativos especificados en la NTE INEN 3040, cuyos resultados se presentan a continuación.

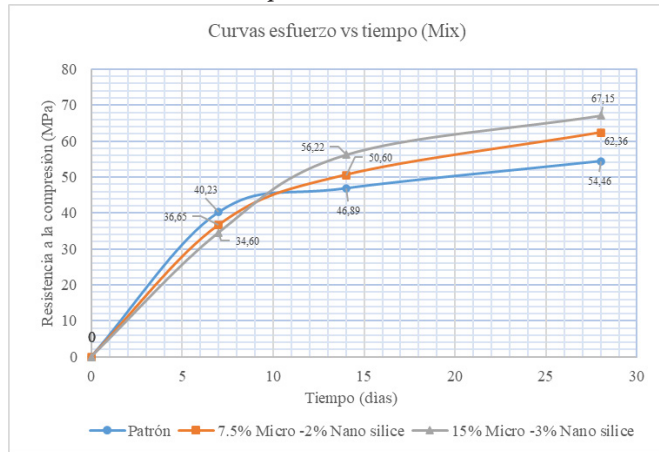
**Tabla 8.**

Revisión de aspectos visuales de los adoquines de hormigón con porcentajes de reemplazo de cemento por nano-micro elementos de sílice

Tipo de mezcla	Microsílice	Nanosílice	Mezcla mix
			
Patrón	15%	3%	15% MS y 3% NS

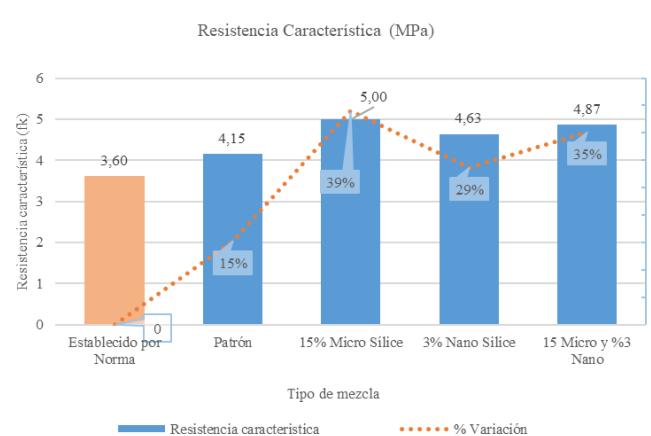
**Figura 3.**

Curvas resistencia vs. tiempo de mezclas mix con micro-nano sílice



**Figura 4.**

Resistencia característica de tracción indirecta



**ASPECTOS VISUALES**

Los adoquines tanto con nano como con micropartículas de sílice y la combinación de éstos (mezcla mix) no presentan deformidades ni rebabas, ni tampoco se evidencia ningún exceso de fisuras ni descamaciones evidentes. En cuanto a su textura, ésta es uniforme, Los adoquines cumplen con las especificaciones de la norma INEN 3040 en lo que se refiere a aspectos visuales, tal como se muestra en la tabla 8 (ver Tabla 8).

**RESISTENCIA A LA ROTURA POR TRACCIÓN INDIRECTA**

Como se puede observar en la tabla 9 y en la figura 4, todos los adoquines tanto patrón como los fabricados con adición de 3% nanosílice, 15% micro y el mix (15 micro - 3% nanosílice) cumplen con lo establecido en la norma, es decir, el valor de resistencia característica debe ser mayor o igual a 3,6 MPa (ver Tabla 9 y Figura 4).

**RESISTENCIA A DESLIZAMIENTO O RESBALAMIENTO**

Los adoquines óptimos presentan una superficie de contacto rugosa, rasposa o áspera con rayaduras o arrugas,

tales características satisfacen los requerimientos establecidos en la normativa. Por lo tanto, no se ejecutó el ensayo de péndulo de fricción y se tomó como satisfactoria la resistencia a deslizamiento.

**RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN**

La norma INEN 3040, mediante el ensayo de la rueda ancha, establece que la longitud de cuerda de la huella permitida debe ser menor o igual a 23 mm, según los resultados obtenidos todas las mezclas óptimas cumplen con este requisito, ya que los valores promedios de la cuerda son menores a 23 mm. Se evidencia que la mezcla que arrojó los mejores resultados fue la de 15% de micro-sílice y la mezcla mix (15% microsíllice - 3% nanosíllice), con longitudes de cuerda promedios de 19,4 mm y 19,6 mm, con porcentajes de variación respecto a la norma del -16% y -15%. Según los resultados promedios de longitud de huella del adoquín con reemplazo de nano y microelementos de sílice, entran en la categoría de adoquines especiales (cuerda máxima 20 mm) (ver Tabla 10 y Figura 5).

**Tabla 9.**

Resistencia característica de tracción indirecta

Tipo de mezcla	Resistencia característica	% Respecto al patrón	% variación
Establecido por norma	3,60	100%	0,00%
Patrón	4,15	115%	15,17%
15% microsílíce	5,00	139%	39,00%
3% nanosílíce	4,63	129%	28,65%
15% micro y 3% nano	4,87	135%	35,20%

**Tabla 10.**

Resultados del ensayo resistencia al desgaste por abrasión en adoquines

Muestras	Longitud de cuerda medida (mm)				
	Norma	Patrón	15% microsílíce	3% nanosílíce	15% microsílíce 3% nanosílíce
1	23	22,1	18,75	19,1	19,6
2	23	23,2	19,8	20,2	19,5
3	23	22,1	19,5	20,0	19,7

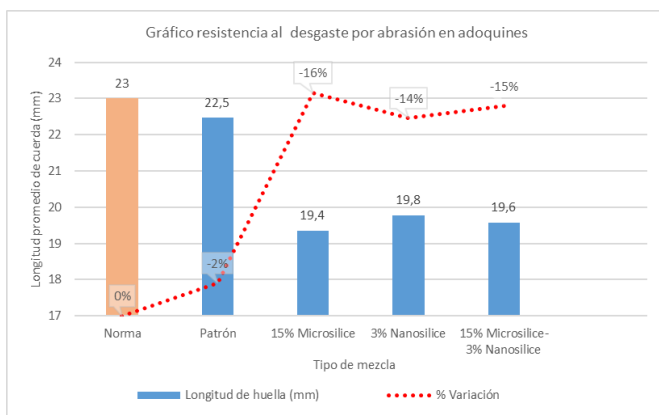
**Tabla 11.**

Resultados del ensayo de resistencia climática por absorción de agua en adoquines

Tipo de adoquín	$W_a$ promedio (%)	Condición
		$W_a \leq 6\%$
Microsílíce 15%	4,17	Sí cumple
Nanosílíce 3%	4,86	Sí cumple
Micro 15% y nano 3%	4,34	Sí cumple

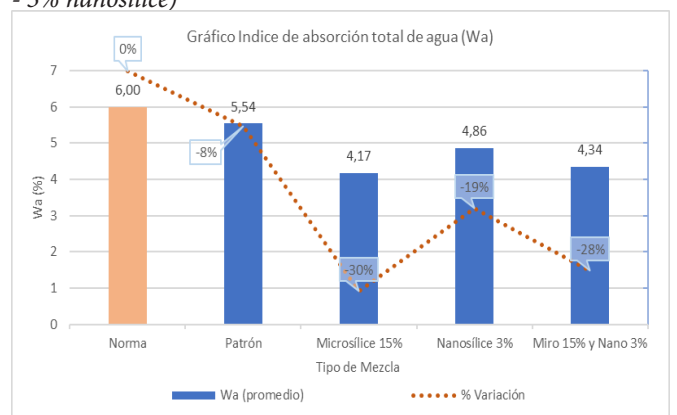
**Figura 5.**

Resistencia al desgaste por abrasión en adoquines y porcentaje de variación respecto a la norma INEN 3040



**Figura 6.**

Diagrama del índice de absorción total de agua en adoquines patrón, 15% de micro sílice, 3% nanosílíce y mix (15% microsílíce - 3% nanosílíce)



**RESISTENCIA CLIMÁTICA POR ABSORCIÓN TOTAL DE AGUA.**

Según los resultados obtenidos en la tabla 11, todos los especímenes patrón, micro sílice 15%, nanosílíce 3% y la mezcla mix (15% micro sílice - 3% nanosílíce) cumplen

satisfactoriamente con lo establecido en la norma INEN 3040 anexo D, la cual especifica que el índice de absorción debe ser inferior o igual a 6%. Por consiguiente, los adoquines son aptos para su uso (ver Tabla 11 y Figura 6).

#### IV. CONCLUSIONES

Los adoquines de hormigón con sustitución de cemento por 15% de microsílíce, obtuvieron los mejores resultados de resistencia a la compresión a la edad de 28 días, con un incremento del 28% respecto a la resistencia del adoquín patrón, lo cual demuestra que la sustitución de micropartículas de sílice aumenta la resistencia a la compresión de forma significativa.

Los adoquines de hormigón con sustitución de cemento por 3% de nanosílíce, obtuvieron los mejores resultados de resistencia a la compresión a la edad de 28 días, con un incremento del 12% respecto a la resistencia del adoquín patrón, lo cual demuestra que la sustitución de nanopartículas de sílice aumenta la resistencia a la compresión considerablemente.

Tomando en cuenta los mejores resultados de resistencia a la compresión obtenidos individualmente tanto de micro como de nanopartículas de sílice en sustitución de porcentajes de cemento, nos permiten concluir que los porcentajes óptimos para la fabricación de adoquines con una mezcla mix (combinación de nano y microsílíce) son los correspondientes a 15% de microsílíce y 3% de nanosílíce.

Los adoquines de hormigón óptimos elaborados con una mezcla mix con sustitución de cemento por una combinación de nano y micropartículas de sílice fueron los fabricados con 15% de microsílíce y 3% de nanosílíce, los cuales obtuvieron los mejores resultados de resistencia a la compresión a la edad de 28 días, con un incremento del 23% respecto a la resistencia del adoquín patrón.

Se pudo observar durante la presente investigación, que los adoquines elaborados con micro y nanopartículas de sílice arrojaron valores de resistencia a la compresión menores que la mezcla patrón a edades tempranas (7 días) y va incrementándose conforme aumenta la edad (14 días), hasta sobrepasarla a los 28 días. Según otras investigaciones referentes a la adición de nano y micropartículas de sílice en mezclas de hormigón, la actividad puzolánica se eleva conforme aumenta la edad del hormigón, frenándose definitivamente alrededor de los 90 días de edad, es decir, que la resistencia mecánica sigue en ascenso durante dicho período.

Los adoquines óptimos encontrados en la presente investigación: 15% microsílíce, 3% nanosílíce y la combinación de éstos (15% microsílíce + 3% nanosílíce), cumplieron todos los parámetros expuestos en la normativa NTE INEN 3040 de forma satisfactoria y con muy buenos resultados, lo que nos permite concluir que cualquiera de éstos podría ser utilizado para la fabricación de adoquines de hormigón.

Se pudo evidenciar el aspecto positivo referente al cuidado del medioambiente en la utilización de nano y micropartículas de sílice en reemplazo de porcentajes de cemento para la elaboración de prefabricados de hormigón (adoquines), debido principalmente a la reducción de

cemento que repercute en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. El problema de la contaminación ambiental es cada día más implacable, por lo que, materiales como el nano y microsílíce se convierten en un importante contribuyente de la contaminación, cuyo desecho en vertederos o botaderos puede ser muy peligroso; es aquí donde toma mucha importancia su uso y aprovechamiento en la industria de la construcción.

A partir de la presente investigación sobre las propiedades frescas del hormigón para la elaboración de adoquines, se demostró que la incorporación de nano y micropartículas de sílice disminuye la trabajabilidad del hormigón, por lo cual es indispensable la utilización de aditivos plastificantes o superplastificantes. Todas las combinaciones demuestran una menor trabajabilidad que la mezcla de control. El aumento del porcentaje de sustitución del cemento por nano o microsílíce contribuye a una disminución de la trabajabilidad en la misma proporción.

#### REFERENCIAS

- [1] T. Echaveguren Navarro, *Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón*, vol. 4, n.º 1, pp. 64-75, 2016, [Online]. Available: [https://issuu.com/ich\\_mkt/docs/manual\\_diseno\\_de\\_pavimentos\\_de\\_adoq](https://issuu.com/ich_mkt/docs/manual_diseno_de_pavimentos_de_adoq)
- [2] V. Herrera y V. Salguero, «Adoquines modificados con fibra de polipropileno para el uso en vías de la ciudad de Quito», tesis, UCE, Quito, 2013. Accessed: Jun. 15, 2020. [Online]. Available: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/2212>
- [3] L. Viera, X. Escobar y J. Rivas, *Uso de espuma flex como agregado para la elaboración de adoquines de hormigón*, tesis, UCE, Quito, 2016.
- [4] C. Lasso y A. Pariguamán Quilumba, *Correlación entre las propiedades mecánicas de los adoquines ecológicos fabricados con agregados reciclados y adoquines convencionales*, tesis, UCE, Quito, 2017. doi: 10.1097/INF.0000000000002124.
- [5] R. Cisneros Gómez, *Análisis de la industria cementera en Ecuador, concentración versus abuso de poder de mercado en el periodo 2011-2015*, tesis, Universidad Católica, Quito, nov., 2017.
- [6] L. Rodgers, «La enorme fuente de emisiones de CO<sub>2</sub> que está por todas partes y que quizás no conocías», BBC News Mundo, Dec. 17, 2018. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783> (accessed May 31, 2021).
- [7] J. Cagiao *et al.*, *Huella ecológica del cemento*, Coruña, jun. 2010.
- [8] S. Dhabhai and R. Singh Shekhawat, «Optimized concrete paver blocks utilizing micro silica as a partial replacement of cement», *Int. J. Tech. Res. Sci.*, vol. 5, n.º 10, pp. 30-37, 2020, doi: 10.30780/ijtrs.v05.i10.005.
- [9] G. Q. Bianchi, *Application of nano-silica in concrete*, 2014. doi: 10.6100/IR780551.



- [10] D. Tavakoli and A. Heidari, «Properties of concrete incorporating silica fume and nano-SiO<sub>2</sub>», *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 6, n.º 1, pp. 3946-3950, 2013, doi: 10.17485/ijst/2013/v6i1.12.
- [11] A. Hamdy El-Didamony, S. Berry Abd El-Ghani, and M. Saleh Abd El-Aleem, «Chemical and engineering properties of blended cement containing micro and nanosilica», *Am. J. Chem. Eng.*, vol. 5, n.º 5, p. 111, 2017, doi: 10.11648/j.ajche.20170505.13.
- [12] P. Mondal, S. P. Shah, L. D. Marks, and J. J. Gaitero, «Comparative study of the effects of microsilica and nanosilica in concrete», *Transp. Res. Rec.*, n.º 2141, pp. 6-9, 2010, doi: 10.3141/2141-02.
- [13] J. J. Howland Albear, «Estudio de las proporciones óptimas de microsilice y nanosilice en hormigones de alto desempeño por durabilidad, mediante un diseño de experimento de tipo hexagonal», *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. VII, n.º 2, pp. 26-32, 2016.