



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**INFLUENCIA DEL USO DE ARENA DE CUARZO EN EL DESGASTE DE ADOQUINES QUE  
INCORPORAN ALUMINATO DE ESTRONCIO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingenieros Civiles

AUTORES: Michael Christopher Machai Arias  
Jenner Fabian Maldonado Pardo  
TUTOR: Fernando Vinicio Ulloa López

Quito - Ecuador  
2023

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Michael Christopher Machai Arias, con documento de identificación N° 1723461727 y Jenner Fabian Maldonado Pardo con documento de identificación N° 1105537789; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 10 de agosto del 2023

Atentamente,



---

Michael Christopher Machai Arias  
1723461727



---

Jenner Fabian Maldonado Pardo  
1105537789


**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN  
A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Michael Christopher Machai Arias con documento de identificación N° 1723461727 y Jenner Fabian Maldonado Pardo con documento de identificación N° 1105537789; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Influencia del uso de Arena de Cuarzo en el desgaste de Adoquines que incorporan Aluminato de Estroncio”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 10 de agosto del 2023

Atentamente,



---

Michael Christopher Machai Arias  
1723461727



---

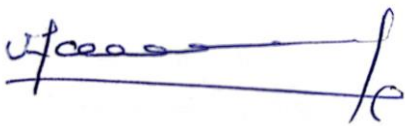
Jenner Fabian Maldonado Pardo  
1105537789

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Fernando Vinicio Ulloa López con documento de identificación N° 1706347539, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: INFLUENCIA DEL USO DE ARENA DE CUARZO EN EL DESGASTE DE ADOQUINES QUE INCORPORAN ALUMINATO DE ESTRONCIO, realizado por Michael Christopher Machai Arias con documento de identificación N° 1723461727 y por Jenner Fabian Maldonado Pardo con documento de identificación N° 1105537789, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 10 de agosto del 2023

Atentamente,



---

Ing. Fernando Vinicio Ulloa López  
1706347539

# INFLUENCIA DEL USO DE ARENA DE CUARZO EN EL DESGASTE DE ADOQUINES QUE INCORPORAN ALUMINATO DE ESTRONCIO

## INFLUENCE OF THE USE OF QUARTZ SAND ON THE WEAR OF PAVING STONES THAT INCORPORATE STRONTIUM ALUMINATE

Michael Machai - Arias<sup>1</sup>, Jenner Maldonado - Pardo<sup>2</sup>

### Resumen

La presente investigación se llevó a cabo para diseñar adoquines bicapa fluorescentes con una resistencia a la compresión de 350 kgf/cm<sup>2</sup>. Estos adoquines incorporaron aluminato de estroncio (SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:M), (M=Eu<sup>2+</sup>, Dy<sup>3+</sup>) y cuarzo (SiO<sub>2</sub>) en la mezcla, y se evaluó su influencia en el desgaste de la capa de rodadura. Para ello, se realizaron pruebas para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados, los cuales calificaron para ser utilizados en el diseño de la mezcla empleada en la fabricación de los adoquines.

Una vez fabricado los adoquines, se llevaron a cabo pruebas de resistencia a la compresión y desgaste (método Böhme). Los resultados de compresión mostraron que, la combinación de aluminato de estroncio y cuarzo, no mejoraron la resistencia a la compresión, sin embargo, a los 14 días de curado la resistencia superaron sin dificultad los 350 kgf/cm<sup>2</sup>. En cuanto al desgaste, la influencia del SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:M y SiO<sub>2</sub>, contribuyen a la disminución del desgaste en adoquines y el máximo valor que se registró fue de 11 765,13 mm<sup>3</sup>/5 000 mm<sup>2</sup>.

Por otro lado, dosificar el SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:M, respecto al peso del cemento no se obtuvieron resultados visibles de la intensidad de la luminiscencia, por tal motivo se fabricaron especímenes dosificados al peso de la mezcla del recibimiento.

**Palabras Clave:** Aluminato de estroncio, cuarzo, bicapa, böhme, luminiscencia, fluorescente.

### Abstract

The present research was conducted to design fluorescent bilayer pavers with a compression strength of 350 kgf/cm<sup>2</sup>. These pavers incorporated strontium aluminate (SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:M), (M=Eu<sup>2+</sup>, Dy<sup>3+</sup>) and quartz (SiO<sub>2</sub>) in the mix, and their influence on the wear of the wearing layer was evaluated. To achieve this, tests were carried out to determine the physical and mechanical properties of the aggregates, which qualified for use in the mix design employed in the manufacturing of the pavers.

Once the pavers were manufactured, tests for compression strength and wear (Böhme method) were conducted. The compression results showed that the combination of strontium aluminate and quartz did not improve the compression strength; however, after 14 days of curing, the strength easily surpassed 350 kgf/cm<sup>2</sup>. Regarding wear, the influence of SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:M and SiO<sub>2</sub> contributed to the reduction of wear in the pavers, with the maximum recorded value being 11 765,13 mm<sup>3</sup>/ 5 000 mm<sup>2</sup>.

On the other hand, dosing SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:M, relative to the weight of the cement, did not yield visible results of the luminosity intensity; therefore, specimens were manufactured dosed based on the weight of the mix used.

**Keywords:** Strontium aluminate, quartz, bilayer, böhme, luminosity, fluorescent.

<sup>1</sup>Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

<sup>2</sup>Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: [mmachai@est.ups.edu.ec](mailto:mmachai@est.ups.edu.ec), [jmaldonadop@est.ups.edu.ec](mailto:jmaldonadop@est.ups.edu.ec)

## 1. Introducción

En el Ecuador, a la falta de estudios sobre el desgaste en adoquines con un recubrimiento superficial de hormigón dosificado con aluminato de estroncio y cuarzo ha impulsado la realización de esta investigación con el objetivo de determinar el nivel de desgaste cuando se exponen a pigmentos fluorescentes. Además, se busca analizar si las sustancias  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{M}$  y  $\text{SiO}_2$  tienen un impacto positivo o negativo en el hormigón expuesto en la capa superficial de los adoquines.

El aluminato de estroncio es un compuesto químico conocido por su capacidad de emitir luz bajo ciertas condiciones y cuando se dopan con Europio ( $\text{Eu}^{2+}$ ) y Disprosio ( $\text{Dy}^{3+}$ ), se logra una alta eficiencia cuántica y fosforescencia [1]. Además, en mezclas de hormigón, el aluminato de estroncio al producir el fenómeno de la fotoluminiscencia también mejora sus propiedades físico – mecánicas [2]. Por el contrario [3], menciona que, la presencia de  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{M}$ , no afecta en la resistencia y duración, dado que este compuesto es insoluble, realizando pruebas de compresión en cubos de mortero.

Basado en este contexto el presente trabajo intenta explorar, cual es el efecto del aluminato de estroncio dosificado al peso del cemento y adicionar a este cuarzo, dado que el  $\text{SiO}_2$  es un compuesto cristalino de dióxido de silicio, de gran durabilidad que puede mejorar las propiedades mecánicas del concreto, así como la traslucidez y la capacidad de soportar el ataque de sulfatos [4].

La emisión de fotoluminiscencia ocurre cuando los electrones de los iones metálicos saltan de sus órbitas internas a las externas durante el proceso de absorción de energía. Al regresar a su estado original, estos electrones emiten un fotón de luz [2]. El tiempo de carga del aluminato de estroncio varía dependiendo del tipo de luz al que estará expuesto. En el caso de la luz natural (luz del sol) se requiere de 5 minutos, para la luz negra, se necesita de 5 a 10 minutos, mientras que para luz normal o en ambientes sombríos, se requiere de 20 a 30 minutos [3].

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Agregados

Con los materiales pétreos (agregado fino y grueso), se procedió a realizar la caracterización de estos mediante ensayos de laboratorio, siguiendo las normativas vigentes correspondientes, con el fin de diseñar una mezcla de hormigón que incorporará aluminato de estroncio y cuarzo para la fabricación de adoquines, asegurando el cumplimiento de los estándares de calidad requeridos.

Se llevó a cabo la reducción de muestra [5], utilizando el método del separador mecánico y la homogenización del material antes de realizar los diferentes ensayos de laboratorio. Asimismo, se realizó el análisis granulométrico [6], para obtener la distribución de tamaños de los áridos, en donde se obtuvo un tamaño máximo nominal de 3/8 plg, con un módulo de finura para la grava y arena de 5,6 y 2,6 respectivamente. En la Figura 1 y 2 se presenta las curvas granulométricas de los agregados.

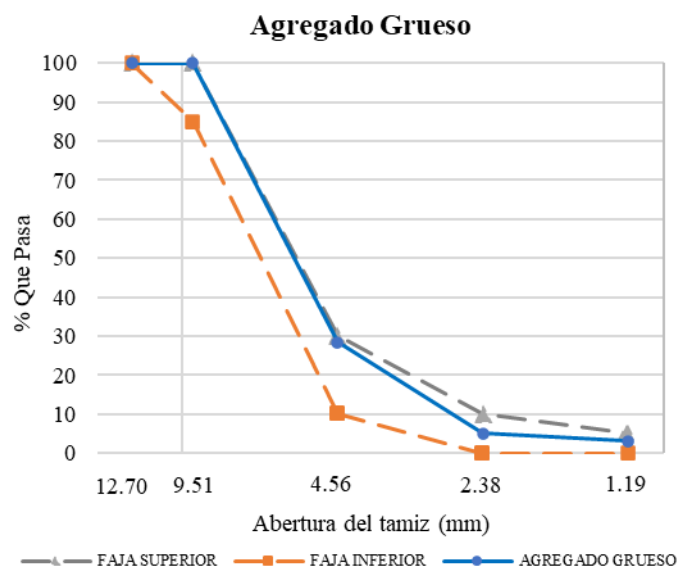


Figura 1. Curva granulométrica del agregado grueso

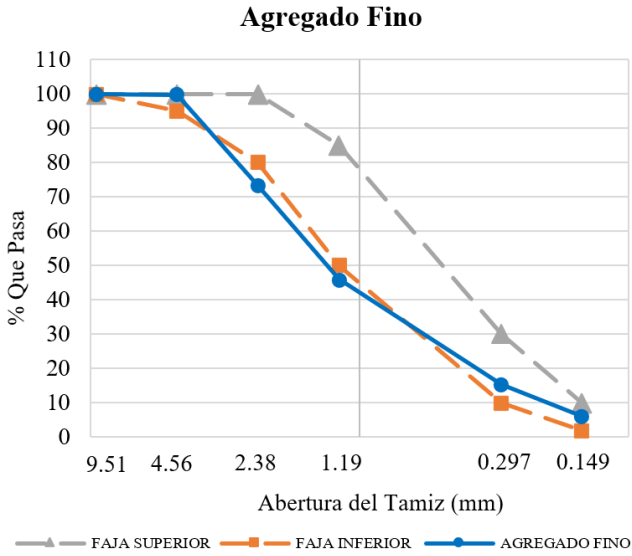


Figura 2. Curva granulométrica del agregado fino

Se ajustó la granulometría del agregado fino utilizando el método Road Note Laboratory (RNL) [14], para optimizar la mezcla con arena y grava. Se logró una proporción de 70% de arena y 30% de grava. Los resultados se encuentran en la Figura 3

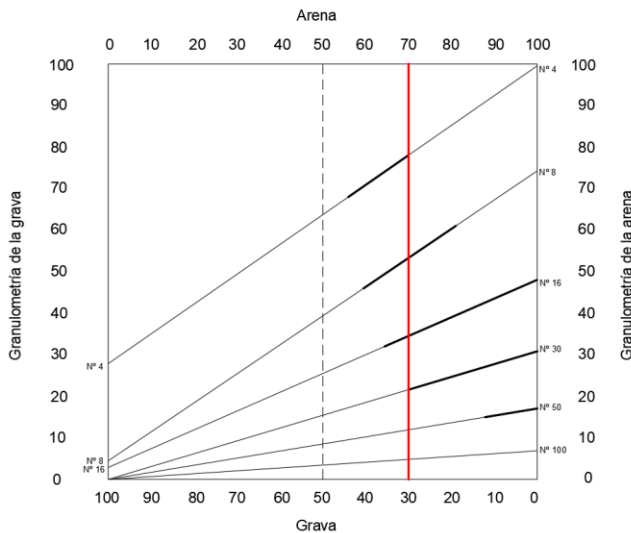


Figura 3. Gráfica de ajuste de arena y grava método (RLN)

Se determinaron las densidades promedio y el peso unitario de los agregados. Para el caso del agregado fino, se utilizó el método del picnómetro [7], el porcentaje de absorción fue de 0,85%. En la Tabla 1 se muestran los resultados.

Tabla 1: Pesos específicos del agregado fino

Peso Especifico	Valor (kg/m <sup>3</sup> )
Peso específico masivo	2 594,61
Peso específico masivo SSS	2 616,75
Peso específico de los sólidos	2 653,50

Mientras que para el agregado grueso se siguió el procedimiento establecido en la norma [8], el porcentaje de absorción fue de 3,73%. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Pesos específicos del agregado grueso

Peso Especifico	Valor (kg/m <sup>3</sup> )
Peso específico masivo	2 322,20
Peso específico masivo SSS	2 408,84
Peso específico de los sólidos	2 543,07

La determinación del peso unitario se realizó en condiciones secas mediante un proceso de compactado suelto y varillado, siguiendo el procedimiento indicado en la norma [9].

Tabla 3: Pesos unitarios de la arena y grava

Material	Ripo		Arena	
	Suelto	Varillado	Suelto	Varillado
Tipo				
Peso Unitario kg/m <sup>3</sup>	1 157,25	1 285,31	1 372,88	1 518,20

Se determinó el contenido de humedad en los áridos, a fin de considerar la cantidad de agua presente en el diseño de la mezcla, descrita en la norma [10]. En la Tabla 4 se describen los resultados.

Tabla 4: Porcentajes de humedades de los agregados

Agregado	Porcentaje de humedad
Fino	5,60
Grueso	5,26

Asimismo, se utilizó el ensayo de colorimetría [11], para identificar las impurezas orgánicas presentes en el árido fino, empleando hidróxido de sodio (NaOH). Mediante la escala de Gardner, se observó que el material estaba libre de impurezas, como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Determinación de impurezas – colorimetría

Finalmente, se llevó a cabo el ensayo de abrasión [12], utilizando 8 esferas en la máquina de Los Ángeles. El resultado mostró una degradación del 27,4% en el agregado, valor que se encuentra por debajo del límite del 50% establecido por la norma.

A través de estos ensayos, se obtuvo información precisa sobre las características de los materiales y su comportamiento en diferentes condiciones, lo que permitirá diseñar una mezcla de hormigón óptima para la fabricación de adoquines, garantizando su durabilidad y calidad.

## 2.2 Cemento

Se empleó cemento Chimborazo Tipo HE de alta resistencia inicial. Este tipo de cemento es ampliamente utilizado en la industria de la fabricación de adoquines debido a sus propiedades específicas. El cemento seleccionado cumple con todas las especificaciones establecidas en la norma [13], lo que garantiza su idoneidad para este propósito.

## 2.3 Diseño de Mezcla

La investigación llevó a cabo el método ACI 211.1 – 91 [14], el cual propone pasos para alcanzar un diseño óptimo de mezcla de hormigón en la fabricación de adoquines:

a) Se seleccionó el asentamiento en función del tipo de estructura. En el caso específico de los adoquines, el asentamiento se determinó considerando la consistencia y grado de

trabajabilidad deseado, donde se buscó un asentamiento seco y de magnitud reducida.

- b) Se eligió el tamaño máximo nominal una vez realizado el análisis granulométrico, el cual se determinó en función del tamiz inmediatamente más grande en el que quedara un retenido acumulado de al menos el 15% del material tamizado.
- c) La estimación del contenido de aire se determinó en función del tamaño máximo nominal del agregado.
- d) La estimación de la cantidad de agua se basó en la selección del asentamiento, tamaño máximo nominal y el porcentaje estimado del contenido de aire.
- e) La relación agua cemento  $a/c$  se definió en función de la resistencia a la compresión requerida ( $f'_{cr} = 350 \text{ kgf/cm}^2$ ) y la inclusión de aire en la mezcla. Una vez seleccionada la relación  $a/c$ , se procedió a calcular la cantidad de cemento mediante la fórmula:

$$C = \frac{a}{a/c}$$

- f) A continuación, se verificó la granulometría de los agregados para asegurarse de que cumplan con las especificaciones de la normativa técnica. En función de esta evaluación, se determinó las cantidades óptimas de arena y grava.
- g) Por último, se realizó un ajuste a la cantidad de agua considerando la humedad presente en los agregados.

Estos pasos, permitieron lograr un diseño adecuado de mezcla de hormigón que se ajustó a las especificaciones necesarias para la fabricación de adoquines con las características de resistencia y trabajabilidad requeridas.

### 2.3.1 Mezcla de adoquín

En la Tabla 5, se presentan la dosificación empleada para la fabricación de los adoquines.



Tabla 5: Dosificación de la mezcla

Material	Peso en kg/m <sup>3</sup>	Dosificación	Peso para 50 kg
Cemento	512,5	1	50
Arena	1 084,61	2,37	118,42
Grava	649,42	1,02	90,75
Agua	146,81	0,29	14,50
Aire	0	0	0
Total	2 393,34		2 74,17

### 2.3.2 Mezcla de recubrimiento

En la Tabla 6, se presentan la cantidad de materiales que se utilizó en el recubrimiento del adoquín.

Tabla 6: Cantidades de materiales para el recubrimiento

Muestras	SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (g)	SiO <sub>2</sub> (g)	Cemento (g)	Arena (g)
M1		5%	22,45	26,61	202,07	505,52
M2	10%	10%	22,45	53,21	202,07	478,91
M3		15%	22,45	79,82	202,07	452,31
M4		5%	26,94	26,61	197,58	505,52
M5	12%	10%	26,94	53,21	197,58	478,91
M6		15%	26,94	79,82	197,58	452,31
M7		5%	33,68	26,61	190,85	505,52
M8	15%	10%	33,68	53,21	190,85	478,91
M9		15%	33,68	79,82	190,85	452,31
M10	10%	0%	22,45	0,00	202,07	532,13
M11	12%	0%	26,94	0,00	197,58	532,13
M12	15%	0%	33,68	0,00	190,85	532,13
M13	0%	5%	0,00	26,61	224,53	505,52
M14	0%	10%	0,00	53,21	224,53	478,91
M15	0%	15%	0,00	79,82	224,53	452,31

Para identificar las mezclas, se las denotó con la letra M, acompañado de un número en orden ascendente (1 – 15), en las cuales los porcentajes de aluminato de estroncio y cuarzo varían.

Dado que las cantidades de grava y agua no son remplazadas parcialmente por SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:M y SiO<sub>2</sub>, estas se mantienen constantes, es decir, 229,02 g de grava y 65,11 g agua. La cantidad total emplea de cada mezcla para el recubrimiento del adoquín es de 1 050,78 g.

### 2.4 Fabricación de adoquines

Se diseñó la mezcla y se fabricaron los adoquines bicapa en moldes según las especificaciones técnicas [15]. La primera capa (espesor de 7 cm)

es hormigón sin aluminato de estroncio ni cuarzo. Luego, la segunda capa (espesor de 1 cm) contiene SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:M y SiO<sub>2</sub> solamente en la capa de rodadura. Tras llenar los moldes, se vibró – compactaron con una prensa hidráulica para homogenizar y reducir espacios. Después de desmoldarlos, reposaron en la intemperie, duramente aproximadamente 4 días a temperatura ambiente, regándolos periódicamente para mantener la humedad.



Figura 5. Fabricación de adoquines. a) mezcla con aluminato de estroncio y cuarzo. b) relleno de material en la prensa. c) vibro – compactado. d) apilación de adoquines

### 2.5 Configuración de ensayos

Para realizar los ensayos de compresión y desgaste, se fabricaron 108 unidades de adoquines, como se muestra en la Tabla 7.

Para el curado de los adoquines fabricados, se los mantuvo en un lugar protegido de la luz solar y el viento, para un fraguado adecuado, como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Stock de adoquines

Previo a los ensayo de compresión y desgaste, la normativa [15], sugiere que los especímenes se deben sumergir 24 horas. Conforme se muestra en la figura 7.



Figura 7. Adoquines en sumergencia (24 h)

### 2.5.1 Ensayo de compresión

Se evaluó la resistencia a la compresión [16], de los adoquines aplicando una carga gradual y controlada de 15 MPa por minuto sobre su superficie. La carga máxima que soportaron antes de fracturarse se registró como la resistencia a la compresión ( $f_c$ ). Previamente al ensayo, los adoquines se sumergieron como se indicó en la Figura 7. En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 7: Resultados a la compresión (Edad 14 días)

Muestra	Unidades	Aluminato de estroncio (%)	Cuarzo (%)	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
M1	8		5%	357,87
M2	8	10%	10%	358,12
M3	8		15%	397,20
M4	8		5%	397,00
M5	8	12%	10%	353,89
M6	8		15%	442,96
M7	8		5%	403,33
M8	8	15%	10%	464,42
M9	8		15%	411,72
M10	6	10%	0%	427,64
M11	6	12%	0%	378,09
M12	6	15%	0%	430,19
M13	6	0%	5%	424,08
M14	6	0%	10%	427,64
M15	6	0%	15%	468,11
Total	108			

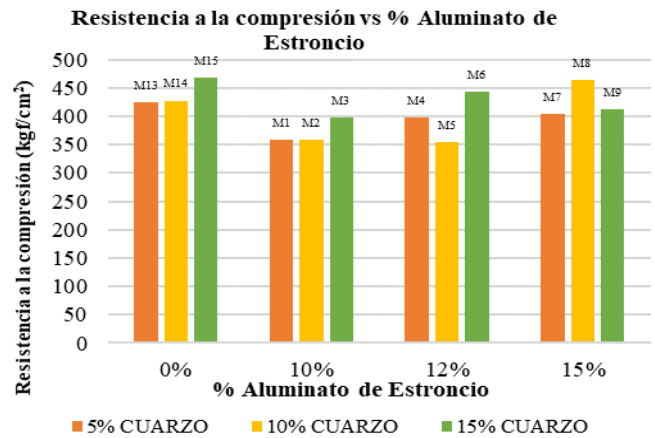


Figura 8. Resistencia a la compresión vs % Aluminato de Estroncio

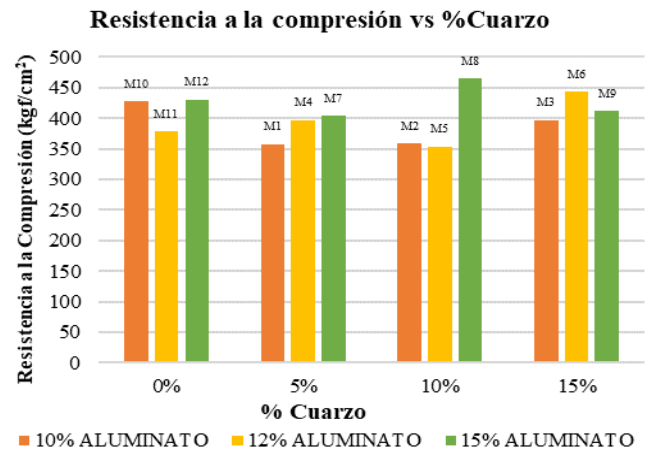


Figura 9. Resistencia a la compresión vs % Cuarzo

### 2.5.2 Ensayo de desgaste método Böhme

Para determinar el desgaste superficial de una probeta sobre la pista de la rueda metálica. Se esparcen 20 g de aluminio fundido y se aplica una carga de  $294 \pm 3$  N, girando el disco a 22 revoluciones por ciclo, a una velocidad de  $30 \pm 1$  revoluciones por minuto. Se realizaron 16 ciclos de prueba. Tras cada 4 ciclos, se registró la masa de la probeta y se calculó la diferencia de masas para determinar el volumen de desgaste en  $\text{mm}^3$ . Las probetas, adoquines en este caso, se cortaron en cubos homogéneos de  $71 \pm 1,5$  mm según la norma. Antes del ensayo de desgaste, los especímenes se colocaron en un horno a  $110 \pm 5$  °C [15]. En las Figuras 10 y 11, se muestran los resultados obtenidos

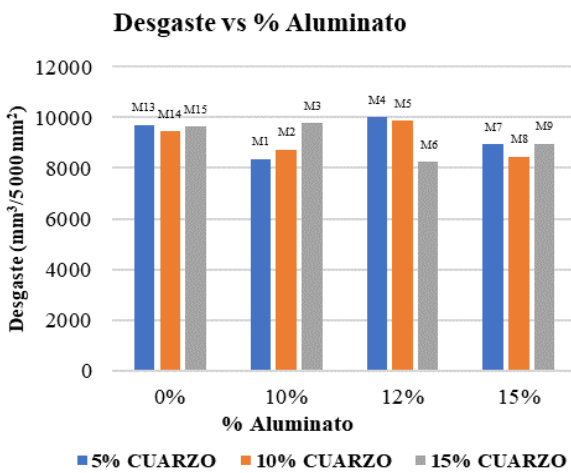


Figura 10. Desgaste vs % Aluminato de Estroncio

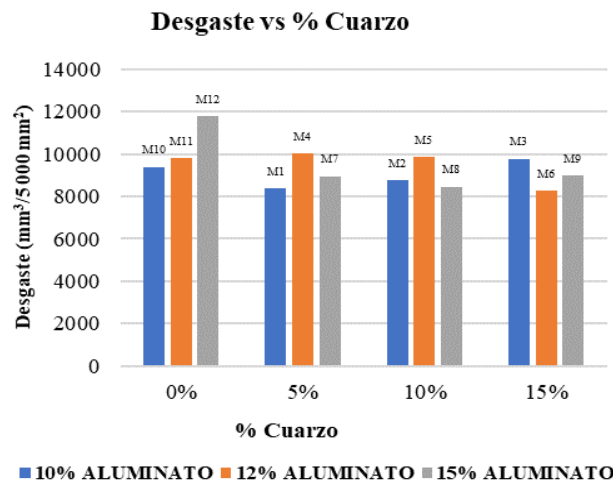


Figura 11. Desgaste vs % Cuarzo

### 2.5.3 Luminiscencia

Se midió la luminiscencia mediante fotografías al someter las muestras con  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{M}$  y  $\text{SiO}_2$  a luz ultravioleta en una cámara oscura. Se registró la intensidad lumínica y el tiempo de emisión persistente hasta la descarga. Se realizó con todas las muestras, incluyendo aquellas con solo aluminato de estroncio, ya que, el aluminato de estroncio es el material influyente en la luminiscencia según la investigación, En las Figuras 12 y 13, se observan los resultados

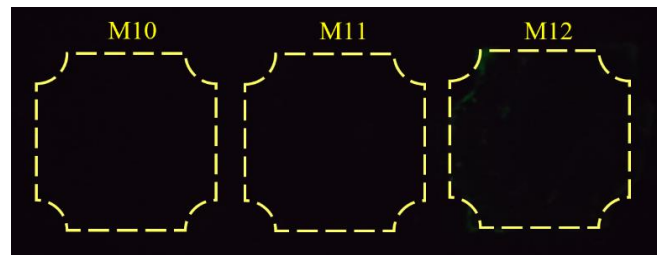


Figura 12. Adoquines con 15% de Aluminato de Estroncio y 5%, 10% y 15% de cuarzo

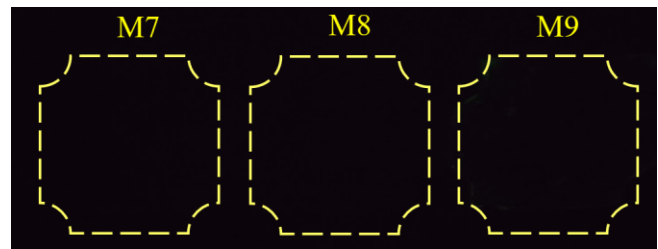


Figura 13. Adoquines con 10%, 12% y 15% de Aluminato de estroncio

## 3. Resultados y Discusión

### 3.1 Compresión

Analizando los datos que se obtuvieron en el ensayo de compresión, en la Tabla 8 se presentan los resultados.

Tabla 8: Tendencia de la resistencia a la compresión vs % Aluminato de estroncio

Muestra sin $\text{SrAl}_2\text{O}_4$	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Muestra con $\text{SrAl}_2\text{O}_4$	$\text{SrAl}_2\text{O}_4$	$\text{SiO}_2$	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Tendencia resistencia
M13	424.08	M1	10%		357,87	baja
		M4	12%	5%	397,00	baja
		M7	15%		403,33	baja
M14	427.64	M2	10%		358,12	baja
		M5	12%	10%	353,89	baja
		M8	15%		464,42	sube
M15	468.11	M3	10%		397,20	baja
		M6	12%	15%	442,96	baja
		M9	15%		411,72	baja

Como se observó en la Tabla 8, la resistencia a la compresión tiende a disminuir cuando se aumenta el aluminato de estroncio en las familias que se mantiene constante el porcentaje de cuarzo. Sin embargo, en la muestra M8 la resistencia a la compresión sube con la combinación de 15% de aluminato de estroncio y 10% de cuarzo.

Tabla 9: Tendencia de la resistencia a la compresión vs % de Cuarzo

Muestras sin SiO <sub>2</sub>	f'c kg/cm <sup>2</sup>	Muestras con SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	f'c kg/cm <sup>2</sup>	Tendencia resistencia
M10	427,64	M1	5%		357,87	baja
		M2	10%	10%	358,12	baja
		M3	15%		397,20	baja
M11	378,09	M4	5%		397,00	sube
		M5	10%	12%	353,89	baja
		M6	15%		442,96	sube
M12	430,19	M7	5%		403,33	baja
		M8	10%	15%	464,42	sube
		M9	15%		411,72	baja

Como se observó en la Tabla 9, la resistencia a la compresión no tiene una tendencia específica. Sin embargo, en las familias con 10% de aluminato de estroncio al aumentar el porcentaje de cuarzo la resistencia a la compresión baja, al igual que en las muestras M5, M7 y M9. Por otro lado, en las muestras M4, M6 y M8, la resistencia a la compresión sube.

### 3.2 Desgaste

Analizando los datos que se obtuvieron en el ensayo de desgaste. En la Tabla 10 se muestran resultados.

Tabla 10: Tendencia del desgaste vs % de Aluminato de Estroncio

Muestras sin SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Desgaste mm <sup>3</sup> /5000mm <sup>2</sup>	Muestra con SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	Desgaste mm <sup>3</sup> /5000mm <sup>2</sup>	Tendencia desgaste
M13	9 718,63	M1	10%		8 370,98	baja
		M4	12%	5%	10 026,93	sube
		M7	15%		8 945,27	baja
M14	9 471,24	M2	10%		8 742,66	baja
		M5	12%	10%	9 873,23	sube
		M8	15%		8 455,93	baja
M15	9 627,76	M3	10%		9 782,20	sube
		M6	12%	15%	8 259,08	baja
		M9	15%		8 969,16	baja

Como se observó en la Tabla 10, el desgaste no tiene una tendencia específica. Sin embargo, en las familias con 5%, 10% y 15% de cuarzo, por cada dos muestras en las que el desgaste disminuye una muestra indica que el desgaste aumenta.

Tabla 11: Tendencia del desgaste vs % de Cuarzo

Muestra sin SiO <sub>2</sub>	Desgaste mm <sup>3</sup> /5000 mm <sup>2</sup>	Muestra con SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Desgaste mm <sup>3</sup> /5000 mm <sup>2</sup>	Tendencia desgaste
M10	9 400,64	M1	5%		8 370,98	baja
		M2	10%	10%	8 742,66	baja
		M3	15%		9 782,20	sube
M11	9 819,66	M4	5%		10026,93	sube
		M5	10%	12%	9 873,23	sube
		M6	15%		8 259,08	baja
M12	11765,13	M7	5%		8 945,27	baja
		M8	10%	15%	8 455,93	baja
		M9	15%		8 969,16	baja

Como se observó en la Tabla 11, el desgaste no tiene una tendencia específica. Sin embargo, en la familia con 15% de aluminato de estroncio, el desgaste tiende a disminuir a medida que se aumenta el porcentaje de cuarzo.

### 3.3 Luminiscencia

Se observó en las Figuras 12 y 13, la cantidad de aluminato de estroncio en adoquines fue muy baja, ya que se dosificó siguiendo los porcentajes propuestos respecto al peso del cemento. Esto explica los resultados poco favorables en la luminiscencia de los adoquines. Para lograr resultados satisfactorios, es necesario encontrar un equilibrio adecuado entre los materiales utilizados. Para solucionar esto, se propuso dosificar la cantidad de SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:M en relación con el peso de la mezcla del recubrimiento, con el objetivo de asegurar que la cantidad del producto fosforescente sea adecuada para la luminiscencia.

Se planteó como alternativa investigar la influencia del aluminato de estroncio y cuarzo en la luminiscencia mediante la fabricación de cubos de hormigón de dimensiones (70x70x70 mm). Estos cubos se dosificaron con cantidades de aluminato de estroncio en relación con la masa de la mezcla del recubrimiento, como fue mencionado previamente. Se llevaron a cabo pruebas de luminiscencia mediante fotografías.

Sin embargo, es importante destacar que los especímenes fabricados no fueron sometidos a ensayos de compresión ni desgaste. Desde la Figura 14 – 29, se visualizan los resultados que se obtuvieron de la alternativa propuesta.

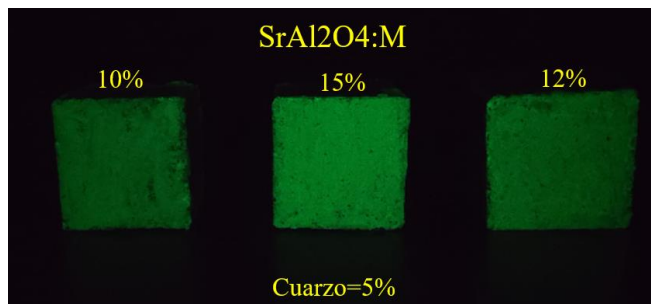


Figura 14. Intensidad con cada porcentaje de SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> y SiO<sub>2</sub> con 5 minutos de carga

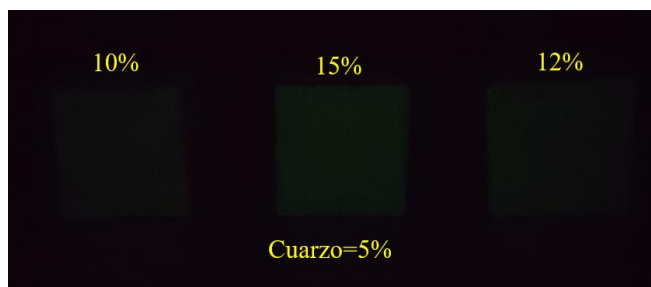


Figura 15. Intensidad después de 5 minutos de carga luz UV

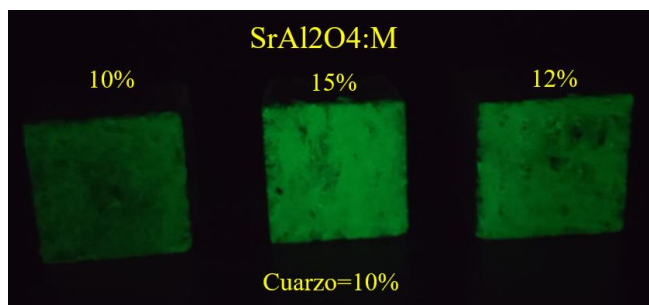


Figura 16. Intensidad con cada porcentaje de SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> y SiO<sub>2</sub> con 5 minutos de carga con luz UV

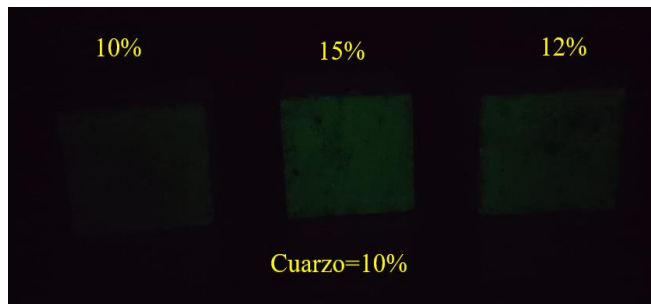


Figura 17. Intensidad después de 5 minutos de carga UV

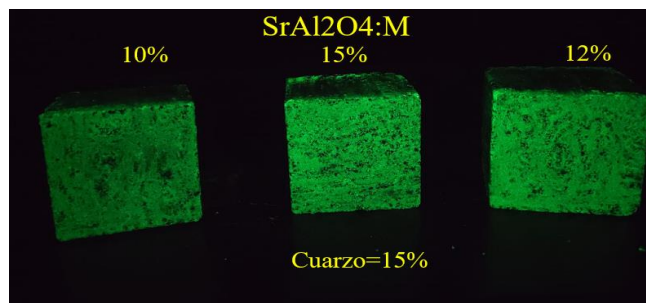


Figura 18. Intensidad con cada porcentaje de SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> y SiO<sub>2</sub> con 5 minutos de carga con luz UV

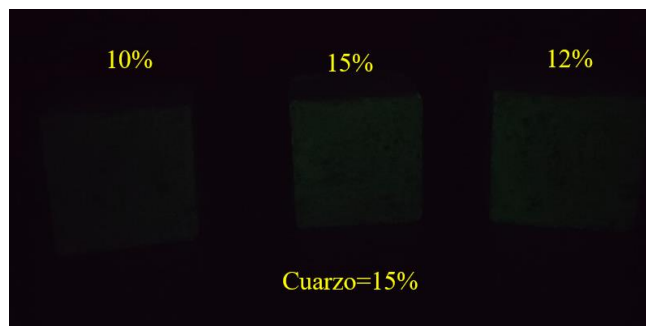


Figura 19. Intensidad después de 5 minutos de carga luz UV

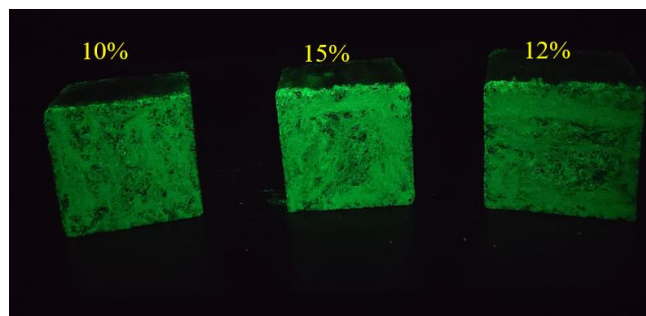


Figura 20. Intensidad con cada porcentaje de SrAl<sub>2</sub>O, 5 minutos de carga con luz UV

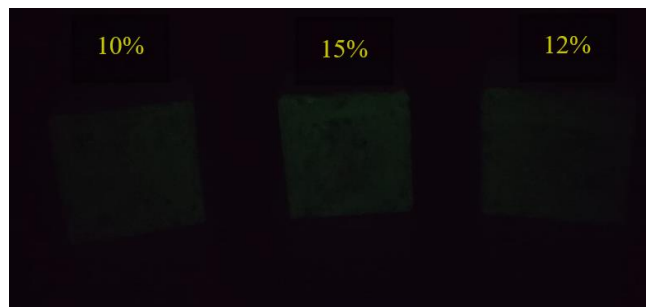


Figura 21. Intensidad después de 5 minutos de carga luz UV

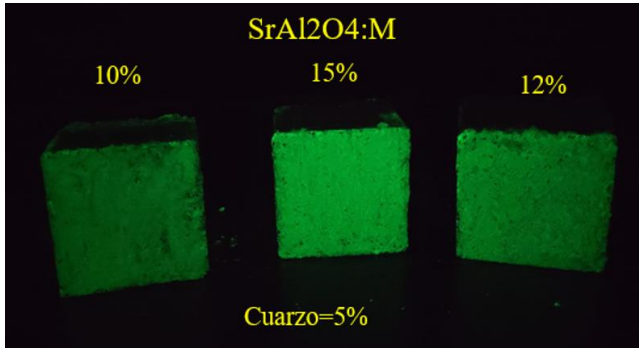


Figura 22. Intensidad con cada porcentaje de  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  y  $\text{SiO}_2$  con 10 minutos de carga con luz UV

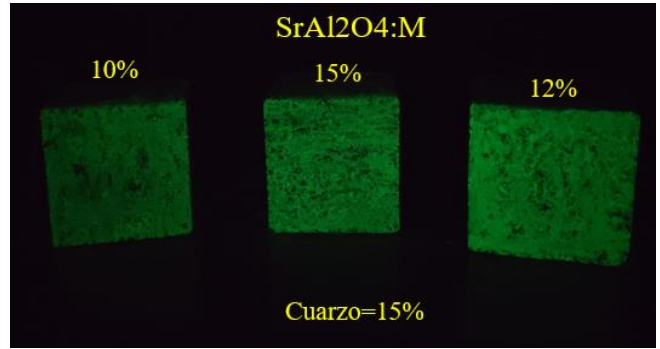


Figura 26. Intensidad con cada porcentaje de  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  y  $\text{SiO}_2$  con 10 minutos de carga con luz UV

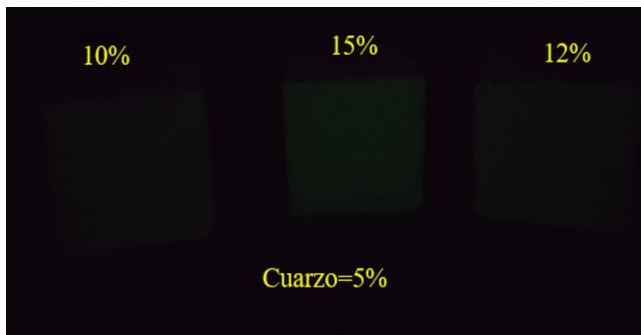


Figura 23. Intensidad después de 10 minutos de carga luz UV

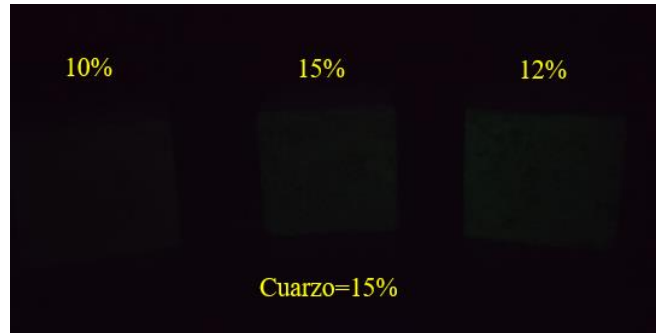


Figura 27. Intensidad después de 10 minutos de carga luz UV

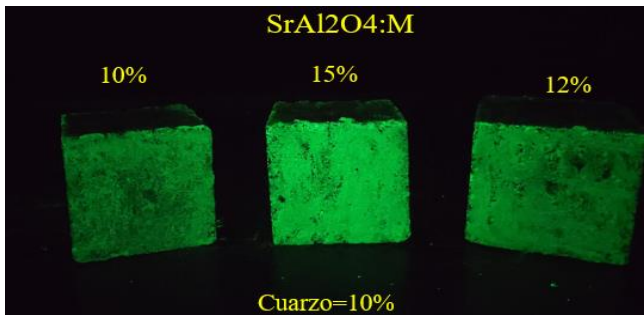


Figura 24. Intensidad con cada porcentaje de  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  y  $\text{SiO}_2$  con 10 minutos de carga con luz UV

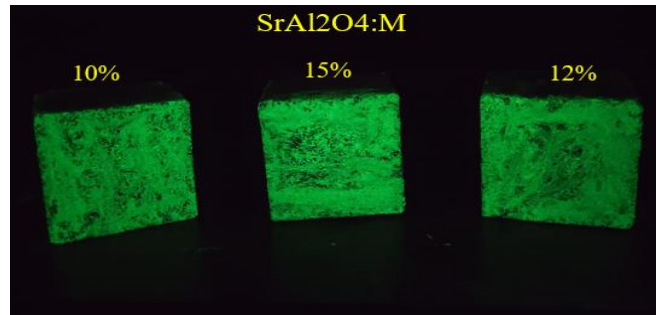


Figura 28. Intensidad con cada porcentaje de  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ , 5 minutos de carga con luz UV



Figura 25. Intensidad después de 10 minutos de carga luz UV



Figura 29. Intensidad después de 10 minutos de carga luz UV

Como se pudo observar en las Figuras 22, 24, 26 y 28, el porcentaje de cuarzo no influye en la intensidad de la luminiscencia; es decir, no se observó que el cuarzo contribuya a la translucidez del recubrimiento del adoquín para aumentar la intensidad de la luminiscencia. La cantidad de aluminato de estroncio fue dosificada en relación con la mezcla del recubrimiento, lo que permitió obtener resultados favorables en cuanto a la luminiscencia. Además, se notó que el tiempo de duración de la luminiscencia es directamente proporcional al tiempo de exposición a la luz ultravioleta.

#### 4. Conclusiones

Los resultados de los ensayos de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados han demostrado que cumplen con los estándares establecidos en la normativa. Tras un ajuste adecuado en las proporciones, se determinó que la mezcla óptima para la fabricación de adoquines debe contener un 30% de grava y un 70% de arena. Estos hallazgos validan el uso de los agregados para utilizarlos en la mezcla de diseño requerida en adoquines de 350 kgf/cm<sup>2</sup>.

Con respecto al ensayo de compresión, la resistencia en función del aluminato de estroncio resultó que, el 88,88% de las muestras indicaron que disminuye, mientras que 11,11% de las muestras restantes indicaron que mejora. Por otro lado, la resistencia a la compresión en función del cuarzo resultó que, el 66,67% de los adoquines, provocaron la disminución, por el contrario, el 33,33% mejoraron la resistencia. La combinación del aluminato de estroncio y cuarzo, no mejoran la resistencia a la compresión. Sin embargo, los adoquines ensayados han superado sin dificultad a los 14 días de curado la resistencia requerida de 350 kgf/cm<sup>2</sup>, como lo indica la normativa ecuatoriana, para la fabricación de adoquines.

Respecto al ensayo de desgaste por el método böhme, el desgaste en función del aluminato de estroncio, el 66,67% de los adoquines indicaron que el desgaste disminuye, mientras que el 33,33% contribuyen al desgaste. Por otro lado, el desgaste en función del cuarzo, indicaron que el

66,67% de los adoquines disminuye, y el 33,33% induce al desgaste. Se concluye, que la influencia del aluminato de estroncio y cuarzo contribuye a la disminución del desgaste en adoquines. El desgaste máximo registrado fue de 11765,13 mm<sup>3</sup>/5 000 mm<sup>2</sup>, valor que está por debajo de los 20 000 mm<sup>3</sup>/5 000 mm<sup>2</sup>, por norma.

Los resultados de la luminiscencia al dosificar los adoquines según el peso del cemento no fueron visibles. Por tanto, se fabricaron cubos de hormigón dosificados con respecto al peso de la mezcla del recubrimiento. Al exponerlos a la luz UV, se observó una mejora significativa en la intensidad de la luminiscencia. A pesar de obtener resultados favorables en ensayos de compresión y desgaste, la baja cantidad de SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:M en la mezcla sugiere que tiene una influencia limitada en dichos resultados, siendo la composición de la mezcla del adoquín el principal factor influyente en esos ensayos.

Para futuras investigaciones sobre la influencia del aluminato de estroncio en mezclas de hormigón, se sugiere dosificar el producto fosforescente en relación con el peso de la mezcla, así como también, investigar el porcentaje óptimo de SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:M necesario para que no influya negativamente en el desgaste y cumpla con la normativa Ecuatoriana. Además, se recomienda emplear un método más adecuado para medir la luminiscencia, lo que permitirá evaluar la viabilidad del producto para su aplicación en el área correspondiente.

Finalmente, se recomienda tener un control adecuado en la conformación del adoquín bicapa respecto al vibro – compactado, para evitar posible segregación del producto fosforescente, ya que este material, en el mercado actual tiene un costo aproximado de \$ 100,00 por cada kilogramo.

## **Referencias**

- [1] M. A. Sanjuàn, C. Argiz.” Cementos Fotoluminiscentes” Instituto Español de cemento y sus aplicaciones (IECA). C/Josè Abascal, 53-28003, Madrid, España, abril 2019.
- [2] M. Flor, A. Carpio, J. Santamaría, “Estudio de un compuesto cementante fotoluminiscente y su aplicación en la construcción” Proyecto de titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. Julio 2018.
- [3] G. Fernandez , M. Laines, “Diseño de morteros fotoluminiscentes aplicados de forma ornamental y señalización en caso de emergencia para edificaciones” Trabajo de graduación. Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, Noviembre 2016.
- [4] J. Aguas, “Hormigón Translúcido con fibra de vidrio y cuarzo” Proyecto de titulación, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Quito, Ecuador, 2015.
- [5] NTE INEN - 2566:2010 “Áridos. Reducido de muestras a tamaño de ensayo” Instituto Ecuatoriano de Normalización, pp. 1-6, 2010.
- [6] NTE INEN – 696 “Áridos. Análisis Granulométrico en los Áridos, Finos y Gruesos” Instituto Ecuatoriano de Normalización, pp. 1-9, 2011.
- [7] NTE INEN – 856 “Áridos. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Árido Fino” Instituto Ecuatoriano de Normalización, pp. 1-10, 2010.
- [8] NTE INEN – 857 “Áridos. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Árido Grueso” Instituto Ecuatoriano de Normalización, pp. 1-10, 2010M.
- [9] NTE INEN – 858 “Áridos. Determinación de la Masa Unitaria (Peso Volumétrico) y el Porcentaje de Vacíos” Instituto Ecuatoriano de Normalización, pp. 1-7, 2010.
- [10] NTE INEN – 862 “Áridos para Hormigón. Determinación del Contenido Total de Humedad” Instituto Ecuatoriano de Normalización, pp. 1-4, 2011.
- [11] NTE INEN – 855 “Áridos. Determinación de las Impurezas Orgánicas en el Árido Fino para Hormigón” Instituto Ecuatoriano de Normalización, pp. 1-4, 2010.
- [12] NTE INEN – 860 “Áridos. Determinación del Valor de la Degradación del Árido Grueso de Partículas Menores a 37.5 mm Mediante el Uso de la Máquina de los Ángeles” Instituto Ecuatoriano de Normalización, pp. 1-6, 2011.
- [13] NTE INEN – 2380 “Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos” Instituto Ecuatoriano de Normalización, pp.1-11, 2011.
- [14] D. Sánchez, J. Osoro “Tecnología del concreto: Materiales, propiedades y diseño de mezclas” 3ra ed., vol 1, Ed. Nomos Impresores, Colombia, 2010, pp. 186-204.
- [15] NTE INEN – 3040 “Adoquines de hormigón, requisitos y métodos de ensayo” Instituto Ecuatoriano de Normalización, pp. 1-45, 2015.
- [16] NTE INEN – 1485 “Determinación de la resistencia a la compresión” Instituto Ecuatoriano de Normalización, pp. 1-8, 2010.