



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**DISEÑAR UN HORMIGÓN LUMINISCENTE A BASE DE VIDRIO Y PIGMENTOS DE
COLOR PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BORDILLOS PREFABRICADOS –
DEMARCADORES EN VÍAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingenieros Civil

AUTORES: Richard Roberto Defaz Mendoza
Marco Vinicio Quishpe Coyachamín

TUTOR: Daniel Armando Valverde Castillo

Quito - Ecuador
2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Richard Roberto Defaz Mendoza con documento de identificación N° 1723161053 y Marco Vinicio Quishpe Coyachamín con documento de identificación N° 2100758131; 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, 19 de septiembre del 2024

Atentamente,



Richard Roberto Defaz Mendoza

1723161053



Marco Vinicio Quishpe Coyachamín

2100758131

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

Nosotros, Richard Roberto Defaz Mendoza con documento de identificación N° 1723161053 y Marco Vinicio Quishpe Coyachamín con documento de identificación N° 2100758131; 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 Proyecto de investigación: “Diseñar un hormigón luminiscente a base de vidrio y pigmentos de color para la implementación de bordillos prefabricados – demarcadores en vías”, 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, 19 de septiembre del 2024

Atentamente,



Richard Roberto Defaz Mendoza
1723161053



Marco Vinicio Quishpe Coyachamín
2100758131

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Daniel Armando Valverde Castillo con documento de identificación N° 1900467869 , docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑAR UN HORMIGÓN LUMINISCENTE A BASE DE VIDRIO Y PIGMENTOS DE COLOR PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BORDILLOS PREFABRICADOS - DEMARCADORES EN VÍAS, realizado por Richard Roberto Defaz Mendoza con documento de identificación N° 1723161053 y por Marco Vinicio Quishpe Coyachamín con documento de identificación N° 2100758131, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto de investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de septiembre del 2024

Atentamente,



Ing. Daniel Armando Valverde Castillo

C.I: 1900467869

DISEÑAR UN HORMIGÓN LUMINESCENTE A BASE DE VIDRIO Y PIGMENTOS DE COLOR PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BORDILLOS PREFABRICADOS - DEMARCADORES EN VÍAS

DESIGN A LUMINESCENT CONCRETE BASED ON GLASS AND COLOR PIGMENTS FOR THE IMPLEMENTATION OF PREFABRICATED CURBS - ROAD DEMARCATION

Marco Quishpe - Coyachamín¹, Richard Defaz - Mendoza², Daniel Valverde - Castillo³

Resumen

Este estudio busca contribuir en la investigación técnica y experimental del uso de materiales reciclados, cumpliendo con las normativas INEN, ACI y ASTM. Esto con el objetivo de proponer el uso adecuado de materiales reciclados; permitiendo así la incorporación de estos en la construcción.

Para llevar a cabo este estudio, se establecerá una dosificación modelo en la cual se modificará el porcentaje de sustitución del árido fino natural por árido artificial. El polvo de vidrio es el material que reemplazará al árido fino cumpliendo con la dosificación adecuada; además, la cantidad de pigmento tendrá una relación directa con el cemento. Posteriormente, se evaluará el hormigón en ensayos de laboratorio a flexión, abrasión, y compresión a los 21 días del curado.

Una vez cumplidos los requisitos y la demanda de uso estipulado por la normativa NTE INEN 3132 en el país, se procedió con la extracción de núcleos en los bordillos, lo cual permitió realizar el ensayo de luminancia y colorimetría de acuerdo con la Comisión Internacional de Iluminación (CIE).

Abstract

This study aims to contribute to technical and experimental research on the use of recycled materials, following INEN, ACI, and ASTM standards. The objective is to propose the adequate use of recycled materials, thus allowing the incorporation of these materials in construction.

To carry out this study, a model dosage will be established in which the percentage of replacement of the natural fine aggregate by artificial aggregate will be modified. The glass powder is the material that will replace the fine aggregate, complying with the appropriate dosage; in addition, the amount of pigment will have a direct relationship with the cement. Subsequently, the concrete will be evaluated in flexure, abrasion, and compression 21 days after curing.

Once the requirements and the demand for use stipulated by NTE INEN 3132 in the country had been met, we proceeded with the extraction of cores in the curbs, which allowed us to perform the luminance and colorimetry test following the International Commission on Illumination (CIE).

¹ Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador.

² Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador.

³ Docente de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: mquishpec6@est.ups.edu.ec; rdefaz@est.ups.edu.ec; dvalverde@ups.edu.ec

Por medio de un espectrofotómetro, se obtuvieron los datos de triestímulo y cromaticidad, lo que permitió observar el incremento en la luminiscencia como se presenta en las tablas 5 y 6. Además, de determinar la tonalidad mediante el diagrama de cromaticidad que se muestran en la figura 18 y 19.

Es necesario realizar un análisis de precios unitarios APU, para determinar si el proyecto es rentable a largo plazo. Esto comparando con otros elementos utilizados para delimitar una vía; como: postes de alumbrado público, tachas y la pintura utilizada como señalética.

Palabras Clave: Fotoluminiscencia, Hormigón, reciclaje, vidrio.

Using a spectrophotometer, the tristimulus and chromaticity data were obtained, which allowed observing the increase in luminescence as shown in Tables 5 and 6; in addition, the tonality was determined using the chromaticity diagram shown in Figures 18 and 19.

A unit price analysis is needed to determine whether the project is cost-effective in the long term, compared to other elements used to delimit a road, such as street lighting poles, studs, and paint used as signage. This analysis will also provide conclusions and recommendations for this research.

Keywords: Photoluminescence, concrete, recycling, glass.

1. Introducción

Esta investigación se fundamenta en el aprovechamiento de recursos naturales como la radiación ultravioleta y el uso de materiales reciclados como el polvo de vidrio. En el futuro, la disponibilidad de iluminación artificial podría verse limitada, debido al uso prioritario de fuentes naturales de agua para el suministro de agua potable. Dicho uso reduce el aporte de caudales para la producción de energía en las hidroeléctricas, en donde el 2% del agua se destina anualmente a consumo doméstico, industrial y agrícola. Además, la obtención de arena se ha vuelto más difícil ya que existe una explotación intensiva en la industria de la construcción; según la ONU, se espera que esta explotación aumente un 45% para principios de 2060.

El presente estudio se enfoca en mejorar la señalización vial e iluminación en los límites de una carretera mediante el uso de bordillos prefabricados fotoluminiscentes. Según HORSIMA [1], los creadores de “Artevia TM Boreal”, estos bordillos representan una excelente alternativa para la iluminación en vías. Este proceso busca explorar nuevas técnicas de construcción que optimicen la captación de luz UV; contribuyendo a la implementación de nuevas normativas para una delimitación efectiva de vías incluyendo ciclovías y senderos.

Con el desarrollo de la presente investigación se contribuye adicionalmente a la implementación de bordillos como demarcadores viales, ofreciendo una nueva forma de señalización para la prevención de accidentes de tránsito. Actualmente se registran 12 muertes por cada 100.000 habitantes, dentro de los cuales 4.476 siniestros están relacionados al irrespeto de la señalización vial.

Esta propuesta busca potencialmente reemplazar señales tradicionales como las barreras metálicas que suelen colocarse en ausencia de postes de alumbrado. La señalización debe cumplir ciertas condiciones como: ser necesaria, visible y llamar la atención, legible y fácil de entender, que

el usuario tenga tiempo de interpretarla, infundir respeto, ser creíble como menciona RTE INEN 004-2: 2011 [2]. Los bordillos luminiscentes desempeñarían un papel crucial como señalética vial horizontal, marcando los límites de la carretera y manteniendo la dirección continua de la misma.

El hormigón luminiscente es una propuesta en auge que se proyecta en la innovación en el campo de la construcción. Con el uso de vidrio reciclado se disminuyen costos debido a su obtención accesible; así como su manipulación para obtener varios tipos de agregados ya sean finos o gruesos. Cabe mencionar que MONOGRÁFICO [3] manifiesta que la fotoluminiscencia no sustituirá la iluminación, sino que trata de mejorar nuevas técnicas en señaléticas, ya sea peatonal o vial.

El hormigón desempeña un papel fundamental en la industria de la construcción, debido a su excelente trabajabilidad y facilidad de obtener sus componentes necesarios para su elaboración. Gracias a sus características físico-mecánicas, se logran alcanzar altas resistencias a la compresión.

Sin embargo, se presenta una alternativa que ha sido objeto de estudio en los últimos años: la sustitución de componentes del hormigón por otros materiales en porcentajes específicos. Esto con el fin de reducir el impacto ambiental durante su explotación y fabricación.

Actualmente, la producción del hormigón representa el 7% del CO₂ emitidos a la atmósfera anualmente. La reutilización de residuos como el vidrio se destaca como una de las alternativas que ha generado mayor interés en la comunidad científica.

La investigación tiene grandes usos como afirma Galiana [4] que “Los usos o aplicaciones de la técnica pueden ser muy variados, pensados principalmente para exteriores como recurso decorativo: pavimentos exteriores, senderos, parques, jardines, piscinas, etc.” Gracias a esto, el hormigón ayudará como recursos decorativos en muchos ambientes, no solo en el campo vial.

El vidrio es un material reutilizable y común en las ciudades; sin embargo, en el caso de Quito, una gran cantidad de este material termina en vertederos. Por ello se ha desarrollado un diseño de hormigón fotoluminiscente con resistencia f_c de 280 kg/cm², que incluye reemplazar un 25% del agregado fino con polvo de vidrio, mismo que mejore las propiedades del pigmento a pesar del mayor costo en comparación con la arena.

Tanto el agregado fino como el grueso son obtenidos de canteras ubicadas en áreas en donde se concentran las principales fábricas de adoquines y bordillos de Quito. Por ejemplo, HORMI-BLOCK, propiedad del ingeniero Kennedy Punin, se encuentra en la parroquia de San Antonio. Esta empresa brindó apoyo para la fabricación de los especímenes. Además, se ha observado que los especímenes demuestran buenas características en los ensayos de laboratorio, según lo indicado por la empresa.

Para este proceso, inicialmente se adquirió el vidrio compuesto de silicatos sólidos y de cal que corresponde a la fórmula: $SiO_2(Na_2O)_m(CaO)_n$ según la NEC-HS-VD [5], mismo que fue obtenido en el sector de Calderón. Posteriormente, se tritura el vidrio para obtener una granulometría similar al agregado fino, lo que facilita su reemplazo en el proceso. Este enfoque busca reducir costos y aprovechar de manera más efectiva los recursos reciclados.

Sin embargo, para utilizar el polvo de vidrio, es esencial que las partículas tengan un tamaño entre 0.063 y 2 milímetros para considerarlo arena artificial. Este material se empleará como reemplazo del 25% en la dosificación del hormigón. Por ello, se realizó un secado del material en horno, seguido de una trituración, lo que garantiza una granulometría adecuada.

Cuatro tipos de bordillos fueron fabricados con el fin de analizar si los componentes utilizados afectaban las propiedades del espécimen en ensayos como la compresión, flexión y abrasión requeridos por la normativa INEN 3132 [6]. Estos

ensayos se realizaron en el laboratorio de la UPS. Además, se utilizó cemento Portland tipo I Blanco con la finalidad de mejorar la visibilidad del pigmento.

Con la resistencia obtenida en la fabricación de bordillos fotoluminiscentes, se llevaron a cabo ensayos de luminiscencia en los testigos extraídos en el laboratorio de la empresa ST INNOVA S.A. Este ensayo permite determinar el porcentaje de visibilidad utilizando un espectrofotómetro, el cual se emplea como método no destructivo para evitar cualquier impacto en los especímenes.

2. Materiales y Métodos

2.1. Obtención de vidrio reciclado

El polvo de vidrio proviene de la recicladora "Nueva Vida" en la parroquia de Calderón. La familia dedicada al reciclaje explicó que gran parte del material proviene de vidrierías y ferreterías, quienes manejan este material.



Figura 1. Recicladora "Nueva Vida" del propietario Oliver Yáñez.

Los propietarios entregaron dos tipos de muestras: vidrio triturado y polvo de vidrio. Ambos tipos se trasladó a las instalaciones de la universidad, en donde se procedió con la trituración manual, limpieza y secado para eliminar la humedad y permitir un análisis adecuado. El objetivo fue alcanzar una granulometría óptima del material.



Figura 2. Tamizado del agregado artificial o “Polvo de Vidrio”

2.2. Obtención de agregados fino y grueso

El material suministrado por la fábrica HORMI-BLOCK proviene de las canteras de San Antonio de Pichincha, tanto el polvo azul como el ripio. Esto ha permitido la realización de ensayos en laboratorio, tales como densidad, pesos unitarios, granulometría y resistencia al desgaste. Los datos son fundamentales para realizar una correcta dosificación en la fabricación de bordillos prefabricados y otros elementos como adoquines.



Figura 3. Traslado de material granulométrico hacia laboratorio de la UPS

2.3. Pigmento

El Aluminato de Estroncio $SrAl_2O_4$ es un pigmento de color verde con características fotoluminiscente fue adquirido mediante una empresa peruana SILIKA cumpliendo con, la norma ASTM C979 [7]. Dicha norma menciona que no se debe utilizar más del 10% con respecto al cemento, incrementando la propiedad lumínica el cual le permita ser visible en la obscuridad, teniendo una carga de 1 hora y descarga de 40 min.



Figura 4. Pigmento Fotoluminiscente de 30grs color verde

2.4. Ensayos de Áridos

Los áridos son fundamentales para obtener buenas propiedades en un elemento de concreto, ya sea estructural o no. Si no cumplen con alguna condición específica, es probable que se descarte su uso, debido a que podrían afectar ciertas condiciones requeridas en los ensayos a flexión y compresión.

2.5. Ensayos de granulometría

La norma ASTM C136 [8] proporciona métodos que establecen la distribución de los materiales propuestos como agregados para varios usos. Los resultados fueron utilizados para verificar si los tamaños de partículas cumplen con la especificación correspondiente.

Se utilizó agregado fino y grueso además de polvo de vidrio con el 25% con respecto al polvo azul, los cuales fueron usados en la fabricación del hormigón para elementos no estructurales.

Los áridos fueron clasificados según su procedencia.

Tipo I corresponde al material grueso de la mina de San Antonio de Pichincha, con un TMN de 1". Está caracterizado bajo cumplimiento de la norma ASTM - C33 [9].

Tipo II corresponde al árido fino (polvo azul) procedente de la cantera de San Antonio de Pichincha, mismos que son muy utilizados en elementos no estructurales.

El tamaño para el análisis del contenido de humedad en el agregado grueso se determinó de acuerdo con la norma ASTM C566 [16], misma que menciona que para un agregado de TMN de 1" es de 4 kg. De igual forma, los agregados finos se usaron 500 g, de acuerdo con la norma ASTM C128 [13].

2.5.4. Ensayos de abrasión

El ensayo de abrasión NTE INEN 860:2011 [17] establece un valor de degradación no mayor al 50% del árido grueso mediante el desgaste, permitiendo así determinar su resistencia. Como resultado, se obtuvo un desgaste del 53.76%. Sin embargo, se decidió trabajar con este material en la fabricación de bordillos, ya que grandes empresas lo utilizan en la producción de elementos como bordillos, adoquines y bloques.

Los bordillos generalmente no están expuestos a condiciones de tráfico intenso o abrasión constante, lo que significa que el material puede experimentar un desgaste menor.

2.5.5. Resumen de valores.

Se proporciona un resumen de los ensayos en la Tabla 1 de los materiales. Los resultados obtenidos fueron utilizados en el proceso de diseño de mezclas.

Tabla 1. Resultados de laboratorio de los agregados.

	RESUMEN DE ÁRIDOS		
	ARENA	VIDRIO	GRAVA
TMN (mm)			1"
MÓDULO DE FINURA	2,73	2,53	
PESO ESPECÍFICO (g/cm ³)	2,74		2,66
PESO UNITARIO SUELTO (g/cm ³)	1,54	1,64	1,26
PESO UNITARIO VARRILLADO (g/cm ³)	1,71	1,78	1,36
ABSORCIÓN (%)	1,86		5,11
DESGASTE A LA ABRASIÓN (%)			53,76

2.5.6. Diseño de hormigón para bordillos

Al concluir los ensayos, se estableció un diseño de hormigón según la guía del Ing. Marlon Arévalo, basado en el método del ACI y la norma 211.1-70 [18], necesario para la fabricación de bordillos prefabricados. Se empleó un pigmento en una

proporción del 6% respecto al cemento y se reemplazó el 25% del árido fino con material reciclado. Además, se realizaron especímenes por separado: uno solo pigmento y otros con una mezcla de 75% de árido fino y 25% de polvo de vidrio, lo cual permitió verificar la influencia de estas sustituciones.

PESO POR BORDILLOS					
MATERIAL	BORDILLO N	BORDILLO VI	BORDILLO PI	BOR. VI+PI	TOTAL
CEMENTO (kg)	12,83	12,83	12,83	12,83	102,64
ARENA (kg)	35,36	26,52	35,36	26,52	247,50
AGUA (lt)	16,20	16,20	16,20	16,20	129,60
GRAVA (kg)	41,19	41,19	41,19	41,19	329,51
PIGMENTO (kg)			0,70	0,70	1,40
VIDRIO (kg)		8,84		8,84	35,36
PESO (lb)	196,63	196,63	198,16	198,16	

Figura 9. Cantidades usados en especímenes

2.5.7. Elaboración de bordillos para ensayos de laboratorio

Las dimensiones de los especímenes se determinaron conforme a la norma ecuatoriana INEN 3132 [6], la cual permite la fabricación de bordillos prefabricados. Esta normativa no establece dimensiones obligatorias, por lo que se optó por trabajar con un bordillo de tipo III rebajado, el cual tiene mayor demanda en el mercado. Sin embargo, se debe cumplir con los valores mínimos de dicha norma siendo su altura, ancho basal y peso teórico. Para este proyecto, se han utilizado las dimensiones que se muestran en la Figura 10.



Figura 10. Dimensiones en cm de los especímenes.

Los bordillos se fabricaron con material de la cantera de San Antonio de Pichincha, en el cual el polvo de vidrio reemplazó el agregado fino con el 25%, y de igual forma, el pigmento se utilizó el 6%, según la norma ASTM C979 [7] en relación con el

cemento. En la mezcladora se añadieron los agregados gruesos, finos, cemento; además de agua para obtener un hormigón semiseco. Para el pigmento se realizó una mezcla en seco con el cemento. Además, se utilizó una mesa vibratoria con la finalidad de distribuir uniformemente el hormigón y disminuir los vacíos.



Figura 11. Mezcla en seco del pigmento.

Después de 24 horas de fraguado, se procedió al curado rociando agua tres veces al día durante 7 días. Posteriormente, se envolvieron con papel stretch, permaneciendo así durante 21 días. Finalmente, para su movilización, se usó un camión para llevarlos al laboratorio y someterlos a los ensayos propuestos.



Figura 12. Curado de especímenes

2.5.8. Ensayo a flexión en bordillos

Los especímenes se elaboraron bajo la normativa NTE INEN 3132 [6] en donde los materiales

cumplen la mayoría de los ensayos granulométricos, los cuales se presenta como documentación para producción de bordillos.

Se eligió el bordillo rebajado tipo III (C) por sus características para delimitar una vía, así como su gran demanda en el mercado, que fue ensayado a flexión siguiendo el procedimiento del anexo C de la misma normativa.

Debido al volumen y peso del espécimen que sobrepasaba las dimensiones de una viga común, se consideraron algunas modificaciones en el equipo para continuar con el ensayo. Es importante tener en cuenta los aspectos característicos como altura y ancho en la máquina, para asegurar el cumplimiento descrito en la norma.



Figura 13. - Bordillo sobre apoyos con cuña de madera en la máquina de flexión

2.5.9. Ensayo a desgaste en bordillos

El ensayo de Böhme, contemplado en el Anexo E de la normativa NTE INEN 3132 [6], se utiliza para evaluar el desgaste en bordillos. Se realizaron tres cubos por cada espécimen de mezcla diseñada, con el objetivo de determinar las diferencias de desgaste entre las distintas sustituciones.

Seguidamente, la probeta se somete a 16 ciclos, donde cada una consta de 22 revoluciones. En resumen, después de cada ciclo, se limpia el disco y la cara de contacto, y finalmente, la probeta se gira progresivamente 90°.



Figura 14. Ensayo de Böhme

2.5.10. Ensayo de núcleos de bordillos

El propósito de este estudio fue verificar la capacidad de resistencia de los bordillos según su diseño previsto. Para ello, se siguieron las pautas establecidas por las normativas ASTM C42 [19] y ASTM C39 [20], en cuanto a la preparación y obtención de los especímenes, así como el procedimiento a seguir durante el ensayo. Los resultados son satisfactorios y demostraron el cumplimiento de los requisitos necesarios en sus propiedades físico-mecánicas.

Para extraer las muestras, se siguieron los protocolos establecidos por la normativa ASTM C42 [23], respetando las dimensiones necesarias para obtener núcleos y seleccionando un lugar en específico del bordillo. Luego, se extrajeron 3 testigos de cada uno con su correspondiente porcentaje de sustitución de árido fino reciclado, lo que resultó en un total de 12 testigos.



Figura 25. Extracción de núcleos

2.5.11. Ensayo con espectrofotómetro

Este equipo fue facilitado por la INDUSTRIA ST INNOVA S.A., donde se permite el análisis de color de los especímenes de hormigón. Las propiedades esenciales para considerar son la luminancia, colorimetría y reflectancia. Esta medida cuantifica la luz reflejada por la superficie del concreto, influenciada por una fuente externa de luz.

Para llevar a cabo este análisis, se utilizó un espectrofotómetro del modelo NS810 el cual cumple los requisitos necesarios de la Commission Internationale de l'éclairage (CIE), permitiendo obtener evaluaciones numéricas precisas de dicha propiedad. Esto posibilitó la comparación entre diversos especímenes de hormigón.

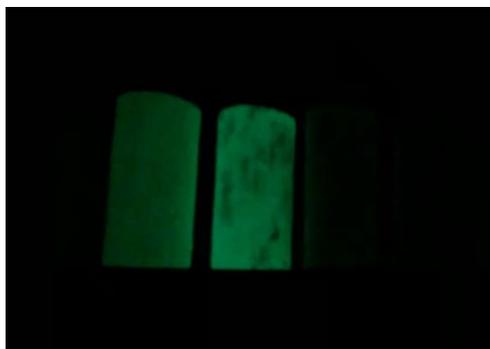


Figura 16. Especímenes para el ensayo mediante el uso del espectrofotómetro de la empresa ST INNOVA S.A.

3. Resultados y Discusión

En esta sección se expondrán los resultados de la dosificación realizada para bordillos prefabricados, con el 6% del pigmento en relación con cemento y árido reciclado al 25% con respecto al agregado fino.

3.1. Ensayo a flexión en bordillos

El ensayo de flexión en bordillos se llevó a cabo de acuerdo con la normativa NTE INEN 3132 [6], utilizando especímenes con una edad de 21 días y asegurando el cumplimiento de las condiciones de curado necesarias. Los resultados se calculados y registrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de los ensayos a flexión en bordillos.

	Bordillo de control	Bordillo con 25% de vidrio	Bordillo solo con pigmento	Bordillo con 25% de vidrio + pigmento
Carga de rotura máxima [kN]	24,0	25,6	24,2	25,4
Resistencia a la flexión [MPa]	4,3	4,6	4,3	4,5

Los datos obtenidos del ensayo a flexión cumplen de manera oportuna, mismas que establece la norma ecuatoriana NTE INEN 3132 [6] obteniendo elementos de uso industrial, en donde la resistencia a flexión en los especímenes sobrepasa la resistencia mínima de 3,5 MPa para elementos prefabricados.

Esto indica que el pigmento al 6% en relación con el cemento no afecta al hormigón, mientras que el polvo de vidrio al 25% en relación con la arena una vez integrado en el hormigón del bordillo, este contribuye con un 31.2% en resistencia a la fractura.

Según Andrés Rojas [21] menciona que: “la utilización de este material mejora las propiedades mecánicas de un concreto ya que tiene propiedades similares al cemento”, esto se ve reflejado en la figura 8 de la granulometría del polvo de vidrio ya que presenta un margen mayor en el tamiz N.º 200 de sus finos.

3.2. Ensayo de resistencia a la compresión en núcleos

La Tabla 3 presenta las resistencias a la compresión obtenidas de los bordillos mediante la extracción de testigos ensayados a los 21 días, teniendo en cuenta los diferentes especímenes. El ensayo se realizó de acuerdo con la normativa ASTM C42 [19] y ASTM C39 [20] el cual requiere como mínimo un diámetro de 10 cm y una altura 2 veces el diámetro, siguiendo las pautas establecidas para el curado y tratamiento de hormigones antes de la prueba, garantizando los resultados del laboratorio.

Los testigos pasaron por un proceso de fabricación y curado para ser extraídos. Los mismos que se colocaron en una mesa vibratoria diseñada para vibrar y compactar, garantizando así la calidad del espécimen. El séptimo día, se inició el proceso de curado utilizando papel stretch, que continuó hasta el día del ensayo.

Tabla 3. Resultados de los ensayos a compresión en bordillos.

	Bordillo de control	Bordillo con 25% de vidrio	Bordillo solo con pigmento	Bordillo con 25% de vidrio + pigmento
Carga máxima [kN]	190,5	198,9	191,1	197,5
Resistencia a la compresión [MPa]	28,7	29,9	28,7	29,7
Factor de corrección (L/D)	1	1	1	1

Se determinó que el uso de vidrio y pigmento no altera las propiedades físicas de un cemento Porlant tipo I blanco. Cabe mencionar que la inclusión del polvo vidrio requiere un 25% más de agua en comparación con un bordillo tradicional. De este modo, se abre la posibilidad de reutilizar materiales nobles en la construcción evitando así la sobreexplotación de canteras.

3.3. Ensayo de desgaste por el método Böhme

Finalmente, se llevó a cabo el ensayo de desgaste, en los cubos correspondientes de cada espécimen conforme a las dimensiones estipuladas por la normativa NTE INEN 3132 [6], ANEXO E, para ser sometidos a la máquina de desgaste.

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos del ensayo realizado mediante el método de Böhme, los cuales cumplen con la normativa previamente mencionada.

Tabla 4.- Ensayo de abrasión mediante el método Böhme

Ciclos	Bordillo de control	Bordillo con 25% de vidrio	Bordillo solo con pigmento	Bordillo con 25% de vidrio + pigmento
1 al 4	2884	2659	2955	2588
5 al 8	2720	2975	3326	2678
9 al 12	3152	2752	3160	2785
13 al 16	3474	2356	3258	2989
TOTAL	12229	10742	12698	11041

De acuerdo con la interpretación cuantitativa, los especímenes no deben superar los 20,000 mm³ de desgaste por cada 5,000 mm² al finalizar los 16 ciclos del ensayo. Los resultados muestran que los especímenes cumplen con los requisitos de la norma ecuatoriana.

Aunque el material grueso no cumple con los requisitos de desgaste según el ensayo de abrasión NTE INEN 862:2011 [15], el trabajo conjunto del agregado fino y el cemento permitió que los especímenes propuestos para el ensayo de Böhme, cumplieran satisfactoriamente con la normativa NTE INEN 3132.

3.4. Ensayo mediante espectrofotómetro

El siguiente ensayo se realizó a partir de cilindros de muestra obtenidos con las mismas características y dosificación, siendo traslado al laboratorio de la empresa ST. INNOVA S.A. Este ensayo cuantifica la luz reflejada por la superficie del concreto, influenciada por una fuente externa de luz.

Esto implica el uso de criterios y metodologías de medición de color, como las establecidas en el Manual de Señalización Vial [22] basándose en la norma ASTM D-4956. Para evaluar el color, se utilizó el espacio de color CIE XYZ, obteniendo como resultado los valores triestímulo XYZ. Posteriormente, se calcularon las coordenadas de cromaticidad xy, teniendo en cuenta el ángulo de 2° con una longitud de onda de 380 a 700 nm, teniendo 8 muestras por espécimen necesarias para determinar el color y luminosidad.



Figura 17. Uso del espectrofotómetro en empresa ST INNOVA S.A.

La Tabla 5 y 6 presenta los resultados de las mediciones de color realizadas con un espectrofotómetro (Modelo NS800) en las superficies de los cilindros donde “A” no estuvo expuesto a rayos UV y “B” tuvo una exposición de 30 min.

Tabla 5. Ensayo “A” en el espectrofotómetro (Modelo NS800)

ENSAYO "A"					
CÓDIGO	VALORES TRIESTÍMULO XYZ			CROMATICIDAD	
	X	Y	Z	x	y
CG	32,519	34,071	32,006	0,330	0,346
CG+25% V+PG	32,697	34,315	32,646	0,329	0,345
CB+25% V+PG	52,915	56,006	55,352	0,322	0,352
CB+100% V	52,915	58,256	55,354	0,322	0,361
CAPPING	55,073	61,906	62,223	0,352	0,565

Tabla 6. Ensayo “B” en el espectrofotómetro (Modelo NS800)

ENSAYO "B"					
CÓDIGO	VALORES TRIESTÍMULO XYZ			CROMATICIDAD	
	X	Y	Z	x	y
CG	30,711	32,236	30,620	0,328	0,345
CG+25% V+PG	33,791	35,129	33,326	0,330	0,346
CB+25% V+PG	53,638	57,089	56,960	0,320	0,356
CB+100% V	56,402	60,057	59,775	0,330	0,365
CAPPING	57,792	65,335	66,725	0,358	0,571

Después de un análisis exhaustivo, se concluyó que el pigmento debe utilizarse en combinación con cemento blanco para obtener una mayor intensidad de color. Los componentes tradicionales como el árido fino, debido a sus tonalidades oscuras, tienden a debilitar el pigmento, haciendo que este pierda su color natural. Por esta razón, se realizó un cilindro compuesto de cemento blanco y utilizando polvo de vidrio reciclado en un 100% como agregado fino, logrando así un mejor resultado en la colorimetría del material.

Gracias al uso del espectrofotómetro, se observa que todos los especímenes han mejorado su luminancia en un rango de 0.814 a 3.126 puntos, validando así el ensayo.

Sin embargo, para lograr una mejor luminancia y colorimetría, se recomienda la fabricación de un bordillo de doble capa con el mismo porcentaje de pigmento en relación con el volumen del cemento

utilizado en la capa visible, en donde se debe utilizar exclusivamente cemento blanco, vidrio, agregado grueso y pigmento. Esta combinación permitirá obtener una luminancia y colorimetría óptimas.

El "capping" es una alternativa eficaz, ya que permite que el 100% del pigmento con resina actúe de manera óptima en la superficie de un bordillo. Esta técnica proporciona una mayor luminancia y colorimetría, como se muestra en las Tablas 5 y 6. Además, esta metodología reduce costos, ya que permite disminuir la cantidad de pigmento necesario o incluso eliminar el uso de materiales costosos como el cemento blanco.

3.4.1. Análisis de colorimetría

La señalización vial, es fundamental que cumpla criterios de visibilidad y reflectancia, específicamente en términos de la longitud de onda ante el ojo humano. Según la Universidad de Sevilla [23] y el Manual de Señalización Vial [22] que se basan en la norma ASTM D-4956 que utiliza Diagrama Cromático CIE 1931 menciona que la reflectancia debe estar dentro del rango de 380 a 780 nanómetros como máximo, que corresponde al espectro de luz visible. Las Figuras 18 y 19 muestran la colorimetría obtenida de los ensayos "A" y "B" mediante un diagrama de temperatura de color.

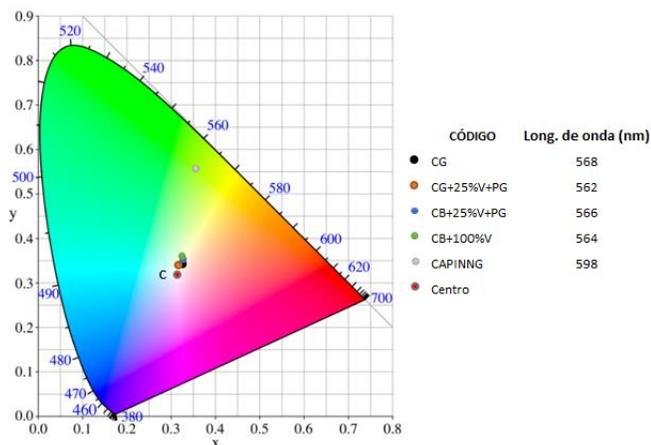


Figura 18. Ensayo "A" de colorimetría

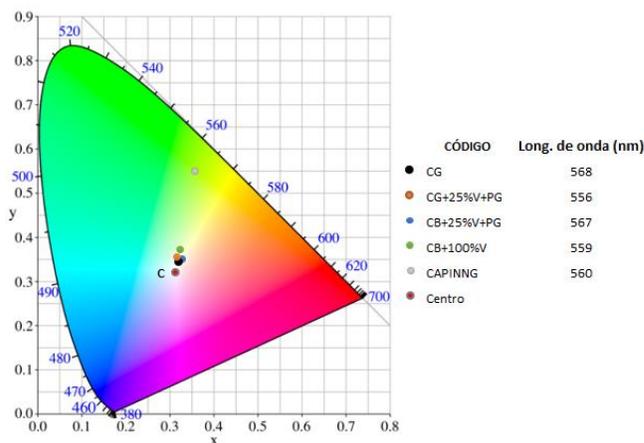


Figura 19. Ensayo "B" de colorimetría

Una vez analizados los datos, se concluye que la colorimetría no varía debido a que el equipo NS800, al ensayar el espécimen en un punto determinado, cubre todos los espacios. Como se muestra en la Figura 17, obteniendo así un color uniforme tanto en el método "A" como en el método "B".

Sin embargo, los datos obtenidos muestran que el uso del 6% del pigmento tiene una intensidad de colorimetría baja, obteniendo así un rango de visibilidad de 562 nm ante el ojo humano, situándose dentro del rango recomendado por la CIE. Sin embargo, para lograr un mayor grado de color y luminancia, se recomienda aumentar la cantidad de pigmento utilizado.

3.4.2. Análisis de Retro-reflectividad

La medición se realizó con un luxómetro en el cuarto de humedad de la UPS a 20 cm del espécimen, para determinar la iluminancia. El equipo mide la cantidad de luz, que incide en una superficie específica, obteniendo así la retro-reflectividad. Esta característica permite al ojo humano detectarlas con antelación proporcionando información sobre la calzada, garantizando así seguridad y efectividad.

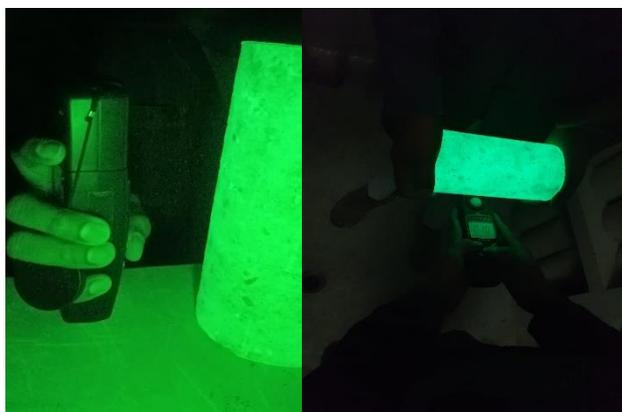


Figura 20. Especímenes con 1 hora bajo el sol

Los datos obtenidos se calcularon con respecto a 3 diferentes puntos del mismo espécimen, los mismos que serán analizados en la siguiente tabla.

Tabla 7. Retro-reflectividad obtenido del luxómetro

	RETROREFLECTIVIDAD (mdc/m ² /lx)			
	Distancia (m)	Iluminancia (lx)	Luminancia (cd/m ²)	Retroreflectividad
TACHAS	100-300
PINTURA	100-150
CG	0,2	0	0,000	0
CG+25%V+PG	0,2	2	0,080	80
CB+25%V+PG	0,2	3	0,120	120
CB+100%V+PG	0,2	4	0,160	160
CAPINNG	0,2	10	0,400	400

Una vez realizada la comparación con tachas y pintura, las cuales son señales de tránsito horizontales, los resultados son aceptables. Esto sugiere que los valores obtenidos son los mínimos preferidos para una conducción nocturna segura, de acuerdo con el U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration [24].

3.5. Análisis de factibilidad

A través de Análisis de Precios Unitarios (APUS), se determina la viabilidad a largo plazo del uso de bordillos en una vía perimetral en comparación con la pintura de los límites de la calzada y el uso de alumbrado público, considerando el mantenimiento y el consumo de energía eléctrica. Esto se demuestra en las tablas 8 y 9, en las cuales se detallan y comparan los costos.

Tabla 8. Costo de producción de diferentes tipos de bordillos

Insumos/mano de obra	TIPOS DE BORDILLO				
	Tradicional	Con vidrio	Con pigmento	Vid. + Pigm	Bi-capa
EQUIPOS	\$0,56	\$0,56	\$0,56	\$0,56	\$0,56
MANO DE OBRA en USD	\$2,13	\$2,13	\$2,13	\$2,13	\$2,55
MATERIALES en USD	\$4,43	\$12,91	\$161,84	\$170,32	\$24,81
COSTO FINAL en USD	\$8,60	\$18,90	\$198,65	\$208,90	\$33,70

Tabla 9. Costo de pintura y colocación de poste de alumbrado

Insumos/mano de obra	COSTO	COSTO EN 20m A 10 AÑOS
PINTURA REFLECTIVA	\$1,75	\$350,00
POSTE DE LUZ (und)	\$440,00	\$346,00
TACHAS (und)	\$2,50	\$10,00
COSTO FINAL en USD		\$706,00

Nota. Se tiene en cuenta 20 m lo que cubre la iluminación de un poste de 8 m de altura.

La diferencia entre un bordillo luminiscente y uno bicapa luminiscente es notable; sin embargo, el primero ofrece mejores propiedades, ya que tiene una mayor capacidad de iluminación. Por esta razón, la comparación se basará en la pintura reflectiva, tachas y el costo del alumbrado público.

La vida útil mínima de un pigmento fotoluminiscente es de 10 años. El valor total de los servicios, incluyendo la instalación de postes de alumbrado, tachas y de la colocación de pintura en calzadas, es de \$ 706.0. Este costo se traduce en \$ 70.6 anuales. Por otro lado, el bordillo bicapa luminiscente en 20 m. tiene un costo total de \$ 674, cubriendo un costo anual de \$ 67.40 obteniendo así una rentabilidad a los 10 años.

Sin embargo, debido al encapsulamiento del pigmento, el mismo no permitirá el uso óptimo de las propiedades lumínicas. Por ello, se propone el uso del “capping” en el bordillo, disminuyendo significativamente los costos y manteniendo el mismo rendimiento. La tabla 10 presenta el costo de este elemento.

Tabla 10. Costo de un bordillo con capping

Insumos/mano de obra	CAPINNG
EQUIPOS	\$0,56
MANO DE OBRA en USD	\$2,13
MATERIALES en USD	\$17,99
COSTO FINAL en USD	\$24,95

El pigmento se deberá utilizar exclusivamente en las caras visibles que permitan mejorar las propiedades de colorimetría y luminancia, mismo que representaría un costo anual de \$49.9 en una longitud de 20 m a los 10 años, generando así un ahorro significativo en comparación con el uso de alumbrado público. Por lo tanto, esta técnica representa una mejor inversión a largo plazo.

Este elemento no estructural representa una innovación, enfocándose en un mundo donde los recursos se optimicen y aprovechen adecuadamente. No solo protege los recursos no renovables, sino también mejora la distribución de la energía eléctrica, contribuyendo a evitar el desabastecimiento energético que enfrenta el país.

4. Conclusiones

El material utilizado para realizar la granulometría, tanto gruesa como fina, fue de la cantera de San Antonio de Pichincha. Aunque este material presenta problemas con sus propiedades, se decidió utilizarlo dado que los especímenes fabricados son elementos no estructurales.

El agregado grueso presentó un desgaste del 53,76%, superando el límite recomendado por la normativa ecuatoriana en el ensayo realizado con la máquina de Los Ángeles. Sin embargo, los bordillos generalmente no están expuestos a condiciones de abrasión constante, prueba de ello en el ensayo de Böhme los especímenes no superan el desgaste recomendado.

El vidrio reciclado, que reemplazó al agregado fino en un 25%, mostró excelentes resultados, demostrando que este material mejora la resistencia tanto a compresión como a flexión. Sin embargo, es importante considerar que se requiere una mayor cantidad de agua para el diseño del espécimen.

Para el uso del pigmento, se recomienda fabricar bordillos bicapa o usar técnicas como el capping para mejorar su luminosidad como se

muestra los resultados de la Tabla 7. Fabricando los bordillos bicapa, permitirá un mejor aprovechamiento del material y cumplir su función de luminiscencia.

Referencias

- [1] HORSIMA, «El 1° pavimento de hormigón con tecnología fotoluminiscente,» by atadigital, 2 Julio 2018. [En línea]. Available: [https://www.hormisa.com.ar/2018/07/02/hormigon-fotoluminiscente/#:~:text=Una%20empresa%20internacional%20especializada%20en,con%20las%20auroras%20boreales%20n%C3%B3rdicas..%20\[%C3%9Altimo%20acceso:%2020%20Octubre%202023\]..](https://www.hormisa.com.ar/2018/07/02/hormigon-fotoluminiscente/#:~:text=Una%20empresa%20internacional%20especializada%20en,con%20las%20auroras%20boreales%20n%C3%B3rdicas..%20[%C3%9Altimo%20acceso:%2020%20Octubre%202023]..) [Último acceso: 21 Febrero 2024].
- [2] RTE INEN 004-2: 2011, «TRASPORTE Y OBRAS PÚBLICAS,» [En línea]. Available: https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/03/LOTAIP2015_reglamento_tecnico_se+%C2%A6alizaci+%C2%A6n_horizonta.pdf. [Último acceso: 10 Mayo 2024]
- [3] MONOGRÁFICO, «Pavimento fotoluminiscente,» Octubre 2018. [En línea]. Available: [https://www.cleanmas.com/npficheros/Pavimento_fotoluminiscente_del_Cami_de_les_Guixeres_Igualada_\(Barcelona\).pdf](https://www.cleanmas.com/npficheros/Pavimento_fotoluminiscente_del_Cami_de_les_Guixeres_Igualada_(Barcelona).pdf).
- [4] G. MERCEDES, «La tecnología de la arquitectura proporciona nuevos materiales como el hormigón luminiscente,» 5 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://arquitecturayempresa.es/noticia/la-tecnologia-de-la-arquitectura-proporciona-nuevos-materiales-como-el-hormigon-luminiscente>. [Último acceso: 25 Octubre 2023].

- [5] NEC-HS-VD, «VIDRIO,» 1 Diciembre 2014. [En línea]. Available: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/1.-NEC-HS-VD-Vidrio.pdf>. [Último acceso: 2 Marzo 2024].
- [6] NTE INEN 3132, «BORDILLOS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN. REQUISITOS Y MÉTODOS DE ENSAYO.,» 2017. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/64990835-Bordillos-prefabricados-de-hormigon-requisitos-y-metodos-de-ensayo.html>. [Último acceso: 26 Febrero 2024].
- [7] ASTM C979, «Standard Specification for Pigments for Integrally Colored Concrete,» 2016. [En línea]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/93670/0801309551b54c06b5caea57e843d357/ASTM-C979-C979M-16.pdf>. [Último acceso: 10 Febrero 2024].
- [8] ASTM C139, «Método de prueba estándar para análisis por tamizado de agregados finos y gruesos,» ASTM, 23 Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-tecnica-del-norte/fundamento-de-cienca-de-los-materiales/astm-c136-norma-astm-c136/78873334>. [Último acceso: 21 Febrero 2024].
- [9] ASTM C 33, «Especificación estándar para AGREGADOS PARA CONCRETO,» ASTM, 10 Junio 2003. [En línea]. Available: <https://www.scribd.com/document/363156459/ASTM-C33-03-Espanol>. [Último acceso: 13 Febrero 2024]
- [10] NTE INEN 2 566:2010, «ÁRIDOS REDUCCIÓN DE MUESTRAS A TAMAÑO DE ENSAYO,» INEN, 1 DICIEMBRE 2010. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/7184187/INSTITUTO_ECUATORIANO_DE_NORMALIZACION_NORMA_TECNICA_ECUATORIANA_NTE_INEN_2_566_2010_%C3%81RIDOS_REDUCION_DE_MUESTRAS_A_TAMAÑO_DE_ENSAYO. [Último acceso: 5 Febrero 2024].
- [11] NTE INEN 696:2011, «ÁRIDOS. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS EN LOS ÁRIDOS, FINOS Y GRUESOS,» INEN, 1 Mayo 2011. [En línea]. Available: <https://ia802909.us.archive.org/25/items/ec.nte.0696.2011/ec.nte.0696.2011.pdf>. [Último acceso: 27 Febrero 2024].
- [12] ASTM C127, «Método estándar para determinar la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado grueso,» ASTM, 3 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://pdfcoffee.com/astm-c-127-4-pdf-free.html>. [Último acceso: 25 Febrero 2024].
- [13] ASTM C128, «Método de prueba estándar para Densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino,» ASTM, 1 Enero 2015. [En línea]. Available: <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-tecnologica-de-el-salvador/disen/norma-astm-128/61142701>. [Último acceso: 16 Febrero 2024].
- [14] ASTM C29, «Método de Ensayo Normalizado para determinar la densidad aparente ("peso unitario") e Índice de Huecos en los Áridos,» ASTM, 10 Julio 1997. [En línea]. Available: <https://www.scribd.com/document/362029309/ASTM-C29-Peso-Unitario>. [Último acceso: 5 Marzo 2024].
- [15] NTE INEN 862:2011, «ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO TOTAL DE

- HUMEDAD.,» INEN, 12 Mayo 2011. [En línea]. Available: <https://www.scribd.com/document/427734426/862-1>. [Último acceso: 8 Marzo 2024].
- [16] ASTM C566, «Método de Ensayo Normalizado para Determinar el Contenido de Humedad Total Evaporable de los Áridos por Secado,» ASTM , 10 Enero 1997. [En línea]. Available: <https://pdfcoffee.com/astm-c-566-97-5-pdf-free.html>. [Último acceso: 11 Marzo 2024].
- [17] NTE INEN 860:2011, «ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE LA DEGRADACIÓN DEL ÁRIDO GRUESO DE PARTÍCULAS MENORES A 37.5mm MEDIANTE EL USO DE LA MAQUINA DE LOS ANGELES,» INEN, 15 Junio 2011. [En línea]. Available: <https://archive.org/details/ec.nte.0860.2011/page/n3/mode/2up>. [Último acceso: 18 Marzo 2024].
- [18] M. Arévalo, «Características de los materiales,» pp. 12-13, 5 Enero 2022.
- [19] ASTM C42, «La obtención de pruebas y Perforados Núcleos y aserradas vigas de hormigón,» ASTM, 1 Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://www.studocu.com/row/document/unity-university/mathe/astm-c-42-extraccion-de-nucleos/3196998>. [Último acceso: 25 Marzo 2024].
- [20] ASTM C39 , «Método de ensayo estándar para Esfuerzo de Compresión en Especímenes Cilíndricos de Concreto,» ASTM , 1 Febrero 2001. [En línea]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/1504/c51b44b19f354c549e5d988fa24cebc1/ASTM-C39-C39M-01.pdf>. [Último acceso: 23 Marzo 2024].
- [21] R. Andrés, «Vidrio molido como tecnología sostenible en el concreto hidráulico,» *Tecnología en Marcha*, vol. I, n° 34, pp. 17-18, 1 Octubre 2021.
- [22] Ministerio de Transporte, «Gov.co,» 17 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://mintransporte.gov.co/documentos/29/manuales-de-senalizacion-vial/>. [Último acceso: 27 Mayo 2024].
- [23] UNIVERSIDAD DE SEVILLA, «GENERALIDADES SOBRE LA LUZ,» Biblus, España..
- [24] U.S. Department of transportation Federal Highway Administration, «Retroreflectividad del marcado de pavimento seco,» Administración Federal de Carreteras, [En línea]. Available: <https://highways.dot.gov/safety/other/visibility/synthesis-pavement-marking-research/chapter-4-dry-pavement-marking>. [Último acceso: 30 Mayo 2024].