



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN MECÁNICA DE BORDILLOS PREFABRICADOS
ELABORADOS CON HORMIGÓN QUE CONTIENE ÁRIDOS RECICLADOS
PROVENIENTES DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES USADOS COMO
SUSTITUTO PARCIAL DEL ÁRIDO NATURAL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTOR: Kevin Fabricio Haro González
TUTOR: Francisco Roberto Ortiz Navas

Quito - Ecuador
2022

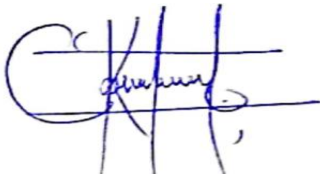
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Kevin Fabricio Haro González con documento de identificación N° 1724674153 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 01 de septiembre del 2022

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Kevin Fabricio Haro González', written over a horizontal line.

Kevin Fabricio Haro González

1724674153

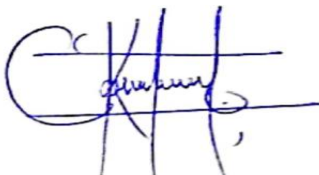
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Kevin Fabricio Haro González con documento de identificación N° 1724674153, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Evaluación mecánica de Bordillos prefabricados elaborados con Hormigón que contiene Áridos reciclados provenientes de Elementos Estructurales usados como sustituto parcial del Árido natural”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 01 de septiembre del 2022

Atentamente,



Kevin Fabricio Haro González

1724674153

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Francisco Roberto Ortiz Navas con documento de identificación N° 1717631244, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **EVALUACIÓN MECÁNICA DE BORDILLOS PREFABRICADOS ELABORADOS CON HORMIGÓN QUE CONTIENE ÁRIDOS RECICLADOS PROVENIENTES DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES USADOS COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL ÁRIDO NATURAL**, realizado por Kevin Fabricio Haro González con documento de identificación N° 1724674153, 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, 01 de septiembre del 2022

Atentamente,



Ing. Francisco Roberto Ortiz Navas, PhD.

1717631244

EVALUACIÓN MECÁNICA DE BORDILLOS PREFABRICADOS ELABORADOS CON HORMIGÓN QUE CONTIENE ÁRIDOS RECICLADOS PROVENIENTES DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES USADOS COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL ÁRIDO NATURAL

MECHANICAL EVALUATION OF PRECAST CURBS MADE OF CONCRETE CONTAINING RECYCLED AGGREGATES FROM STRUCTURAL ELEMENTS USED AS A PARTIAL SUBSTITUTE FOR NATURAL AGGREGATES

Kevin Fabricio Haro González¹

Resumen

El presente proyecto investigativo tiene por objetivo realizar un estudio comparativo de las propiedades tanto físicas como mecánicas del hormigón convencional frente al hormigón reciclado (HR). El hormigón reciclado estará fabricado en base de residuos de elementos estructurales en demolición.

Por tal motivo este trabajo tiene como fin avanzar en el campo investigativo, técnico y experimental en base a las normativas INEN, ACI y ASTM con el propósito de plantear una normativa en el Ecuador para el uso de AR en el diseño de hormigón y así contribuir al cuidado del ambiente, reduciendo la degradación de las tierras.

Para el presente desarrollo se toma como base una dosificación inicial con ciertas especificaciones y luego se irá variando en el porcentaje de sustitución en el árido grueso natural por árido grueso reciclado teniendo así 5 dosificaciones diferentes las cuales servirán para llegar a esta comparación y se procederá a evaluar el desempeño del hormigón reciclado en

Abstract

The objective of this research project is to carry out a comparative study of the physical and mechanical properties of conventional concrete versus recycled concrete (HR). The recycled concrete will be manufactured based on waste from demolished structural elements. For this reason, the purpose of this work is to advance in the research, technical and experimental field based on INEN, ACI and ASTM standards to propose a standard in Ecuador for the use of RA in the design of concrete and thus contribute to the care of the environment, reducing land degradation.

For the present development, an initial dosage with certain specifications is taken as a base and then the percentage of substitution of the natural coarse aggregate for recycled coarse aggregate will be varied, thus having 5 different dosages which will serve to arrive at this comparison, and we will proceed to evaluate the performance of the recycled concrete in laboratory tests to flexion and compression at 28 days of curing.

With the tests carried out at the final product level, it was verified that, in the manufacture

¹ Estudiante Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana Quito – Ecuador,
Autor para correspondencia ✉: kharog@est.ups.edu.ec.

ensayos de laboratorio a flexión, y compresión a los 28 días de curado.

Con los ensayos realizados a nivel de producto final se comprobó que, en la fabricación de bordillos si es apto la sustitución del árido grueso natural por el árido grueso reciclado los cuales cumplen con los requisitos y demanda de uso que rige la normativa NTE INEN 3132 dentro del país.

De todos los bordillos ensayados se obtuvo resultados positivos tanto a nivel de resistencia a la compresión, flexión y desgaste; planteando así una posible solución e implementación de los áridos reciclados como nuevo material para constitución de hormigones transformándose esto en una idea renovable y eco amigable con el medio ambiente.

Palabras clave: Árido natural, árido reciclado, Hormigón de control, Hormigón de árido reciclado, bordillos, Elementos estructurales.

of curbs, the substitution of the natural coarse aggregate for recycled coarse aggregate is suitable and complies with the requirements and demand for use governed by NTE INEN 3132 regulations in the country.

Of all the curbs tested, positive results were obtained both in terms of compressive strength, bending and wear, thus proposing a possible solution and implementation of recycled aggregates as a new material for the constitution of concrete, thus becoming a renewable and eco-friendly idea for the environment.

Keywords: Natural aggregate, recycled aggregate, control concrete, recycled aggregate concrete, curbs, structural elements.

Simbología

AN	Árido natural
AR	Árido Reciclado
HAR	Hormigón con árido reciclado
HC	Hormigón de control
f ^c	Resistencia a la compresión del hormigón
TMN	Tamaño máximo nominal
a/c	Relación agua cemento
MF	Módulo de finura
MPa	Mega Pascales
kN	Kilo Newtons

1. Introducción

Para la fabricación del hormigón se requiere una gran cantidad de áridos triturados que demandan una explotación desmesurada en las canteras de materiales no renovables. En este contexto el sector de la construcción es una de las industrias menos amigables con el medio ambiente por su alto impacto ambiental para la obtención de la materia prima que influye en la elaboración de hormigón.

Según los autores Andrade y Sono [1] manifiestan que el hormigón es uno de los materiales pétreo-artificiales más utilizados en el mundo, presentando una gran versatilidad en cuanto a su manejo y compatibilidad con el acero.

Desde la creación del hormigón, ha alcanzado un uso generalizado dentro de la industria de la construcción por su desempeño de trabajabilidad y serviciabilidad, gracias a sus características físico mecánicas y la obtención de altas resistencias a la compresión [2].

Una de las alternativas que se ha estudiado en los últimos años es el poder sustituir los componentes tradicionales para fabricar hormigón por nuevos componentes que generen menos impacto ambiental durante su explotación y fabricación, siendo la revalorización de residuos una de las alternativas que mayor interés ha generado en la comunidad científica.

Uno de los residuos que genera gran impacto al momento de disponerlos ya sea por la gran cantidad de volumen que emplean en vertederos, así como también por lo difícil de gestionarlos tradicionalmente, son los desechos provenientes de las demoliciones.

La revalorización de desechos de demoliciones ha encontrado una aplicación dentro de la misma industria de la construcción pudiendo ser empleados como áridos reciclado que se emplean como sustituto del árido natural en la fabricación de hormigones tradicionales. Es así que varios países ya cuentan con normativa para el uso de áridos reciclados en la realización de infraestructura. Ejemplo de esto es la Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición [3], en la cual dentro de la misma considera y establece los criterios y las condiciones de los áridos reciclados para ser aprovechados como material en la realización de obras civiles.

En Sudamérica, aunque no existen reglamentos específicos que regulen el uso de áridos reciclados en el hormigón, existen guías que recomiendan la clasificación, disposición y posibles usos de residuos de la construcción. En este contexto la Norma Técnica Peruana NTP 400.050.1999 [4] y NTP 400.053.1999 [5], buscan establecer el manejo adecuado de los residuos de demolición y las técnicas de su uso en la fabricación e implementación de nuevas infraestructuras bajo el marco de una política eco amigable con la reducción de residuos contaminantes.

En el Ecuador la competencia de la gestión de residuos esta otorgada a cada municipio de país, siendo estas las entidades obligadas a indicar los procedimientos para una correcta gestión de residuos de construcción, también conocidos en el país como escombros. Sin embargo, hasta la fecha no existe en el país un procedimiento que regule la revalorización de este tipo de residuos, y menos aún, para que puedan ser empleados como componentes del

hormigón, a pesar de que este tema es de bastante interés dentro de la comunidad académica nacional existiendo ya investigaciones sobre el tema.

Arias Rómulo [2] evidenció que el esfuerzo final a la compresión a los 7 días en hormigones que incorporan áridos reciclados que sustituyen en 30 y 50% al árido natural fueron alcanzaron un 84% al 93% de la resistencia a la compresión de un hormigón que no incorpora sustitución de áridos reciclados. Es importante indicar que en esta investigación los AR fueron obtenidos de probetas cilíndricas previamente ensayadas.

Bolaños Josué [6], realizó un estudio de caracterización de hormigones elaborados con sustitución de materiales tradicionales, por materiales reciclados obtenidos de restos de escombros de hormigón. Se encontró que los áridos de hormigón reciclado al cumplir con las especificaciones físico-mecánicas para su uso, son aptos para elaborar hormigones de 20 MPa con la presencia de ellos hasta un 30% de sustitución del árido grueso natural.

Así mismo Contreras Carlos [7], desarrolló hormigón con áridos reciclados proveniente de pavimentos de hormigón alcanzando por lo menos 21 MPa de resistencia a la compresión, buscando como resultado un producto alternativo que ayude a minimizar el consumo de los recursos naturales no renovables. Los resultados de los ensayos de compresión y flexión demuestran que el remplazo de árido reciclado por el natural en un 40% alcanzan niveles altos de resistencia incluso superando al hormigón de áridos naturales.

Campaña Daniel [8], logró alcanzar exitosamente un hormigón con desempeño

de 25 MPa elaborado con áridos reciclados provenientes de elementos estructurales de las edificaciones colapsadas por el terremoto en Pedernales, llegando a la conclusión que el hormigón elaborado con áridos reciclados es técnicamente factible para la construcción de obras civiles que estén sometidas a cargas de compresión.

Por otro lado los autores Ayala e Iñiguez [9], en su propuesta experimental de realizar bloques utilizando escombros provenientes de restos de hormigón triturado, como sustituto del árido grueso y fino, lograron desarrollar con éxito un mampuesto prefabricado técnicamente funcional, y aunque el proceso de trituración no fue el más adecuado ya que se realizó a mano con ayuda de un combo el bloque cumple satisfactoriamente con las solicitaciones técnicas que requiere el país.

Hay que resaltar que la mayoría de las investigaciones sobre sustitución de áridos en el país obtienen el material de sustitución de fuentes que no representan la realidad de la procedencia, o no han sido triturados de manera industrializada, quedando en su mayoría a aplicaciones a nivel de laboratorio.

A nivel internacional la investigación del uso de áridos reciclados se encuentra mucho más avanzada, existiendo aplicaciones que se encuentran ya ejecutadas.

Tenemos el caso de Verdecora y Cizaña, obras importantes de construcción urbanística realizadas por las constructoras españolas Inicia Siglo XXI y Avintia; ejecutadas en las provincias de Málaga y Altamira, España; Verdecora, construida con 11 400 toneladas de material reciclado; de igual manera las vías del paseo marítimo

de Torremolinos realizada con 80 000 toneladas de material reciclado provisto por la empresa Agreca [10].

Así también Sánchez Zoraida [11], en su tesis doctoral realizó la elaboración de piezas de hormigón prefabricado para mobiliario urbano con la utilización de árido reciclado, logrando la fabricación de bancos de hormigón prefabricados que previamente luego de alcanzar con éxito su investigación fueron instalados en el campus de Fuentenueva de la Universidad de Granada.

Dentro de este marco del conocimiento, el presente trabajo tiene como finalidad la obtención de áridos reciclados que provengan de fuentes reales de demolición, el procesamiento correcto de estos áridos reciclados y el uso de estos en una aplicación real, de esta manera se intenta escalar a un nivel más profundo la investigación de este tema en el país.

Para esto inicialmente se obtiene el material reciclado de una demolición real que provengan de elementos de hormigón armado y que no se encuentre contaminados. Para el procesamiento el material reciclado es reducido en su tamaño en una trituradora de cono que arroja material correctamente graduado en su tamaño para ser empleado en hormigones.

Finalmente se elaboran hormigones que tengan resistencias a la compresión objetivo de 28 MPa para ser aplicados en bordillos prefabricados que cumplan con normativa nacional. Los hormigones incorporarán sustituciones de áridos naturales por áridos reciclados en proporciones de 5%, 15%, 30% y 50%.

2. Materiales y Métodos

2.1. Procedimiento de obtención de material reciclado

El árido reciclado se obtuvo de una vivienda de 30 años de hormigón armado que fue construida en dos fases que tuvo una vida útil de 50 años y que fue derrocada en el 2020.

La demolición de la vivienda se llevó a cabo en dos etapas, en la primera etapa se demolió la mampostería por completo y en la segunda etapa se dejó los elementos estructurales para llevar a cabo la demolición de las columnas, losas y vigas, de estos elementos estructurales se obtuvo las muestras de material que se utilizó para el presente trabajo investigativo.

A continuación, las muestras fueron transportadas y almacenadas en un terreno para posteriormente ser reducidos para extracción del hierro con un roto martillo, inmediatamente se procedió a reducir los escombros a volúmenes aproximadamente de entre 20 y 30cm.

Finalmente fueron trasladadas a una cantera, estos fueron introducidos a una trituradora en forma de cono, de la trituradora se obtuvo el material del árido grueso reciclado. Estos materiales fueron almacenados en costales para su fácil movilización hacia la Universidad Politécnica Salesiana, donde se realizaron los ensayos de caracterización.



Figura 1.- Procesos para la obtención del árido grueso reciclado. a) Extracción de las varillas, b) Almacenado y transporte de escombros y c) Proceso de trituración y obtención del AR

2.1.1. Prueba de la fenolftaleína

La carbonatación consiste en la neutralización de la matriz de cemento como consecuencia de su interacción con el CO₂ atmosférico, puede inclusive causar problemas de corrosión aún en hormigones de alta resistencia [12].

La solución de fenolftaleína al 1% es una prueba general que se le hace al hormigón para saber si está carbonatado. La fenolftaleína es un indicador de alcalinidad. Al aplicarlo con un rociador, el hormigón que protege toma una coloración rosa, en caso contrario el hormigón no toma color alguno. Con esta prueba se determina si el PH del hormigón ha descendido y ya no protege [12].

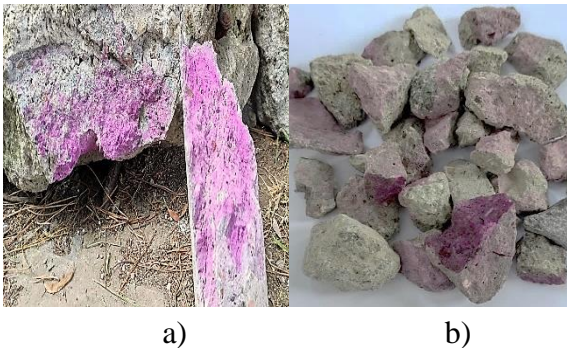


Figura 2.- a) Escombros de demolición y espécimen cilíndrico, b) Árido grueso reciclado, rociados con fenolftaleína

Se realizó únicamente para determinar visualmente el nivel de carbonatación del hormigón debido a la exposición a la intemperie, verificar el comportamiento del árido reciclado y observar si se presentó carbonatación ya que el material utilizado tiene un tiempo de 50 años.

2.1.2. Ensayo de esclerómetro en hormigón

Este ensayo se realizó con el fin de estimar la resistencia a la compresión del hormigón del cual procede el material reciclado a utilizarse en la mezcla. El ensayo consiste en medir la energía absorbida por el hormigón, influye la capacidad de reacción del material por lo tanto se puede decir que la energía absorbida se relaciona a la resistencia y rigidez del hormigón [13], el cual dio como resultado la resistencia el índice de rebote de 44 y una resistencia promedio de 45 MPa.

Se debe tener en cuenta el procedimiento para la realización tal como indica la normativa momento ASTM C 805 [13], marcar en la zona a ensayarse 12 cuadros, limar con la piedra pulidora la zona a impactar y proceder.

Los resultados de las clases de materiales presentados nos muestran la representación gráfica de la medición del de las partículas de los áridos que tamaño conformaran nuestro diseño de mezcla; así pues, se nota una distribución equilibrada entre todos los tamaños de partículas del material muestreado [14], además se está cumpliendo con los procedimientos de la normativa INEN.

2.2. Áridos

Se elaboró 2 diseños de mezcla de hormigón para conseguir una resistencia de 30MPa, se realizó mediante una guía de diseño de mezcla propuesto por Huanca Samuel [15], misma que se basa en el ACI 211. La primera mezcla se realizó para un hormigón de control, y la segunda mezcla en base al hormigón de control donde parcialmente el árido grueso se sustituyó por árido grueso reciclado en fracciones de (5%, 15%, 30% y 50%).

Se utilizaron 3 clases de áridos, 2 para áridos gruesos y uno para el árido fino, usados en la fabricación del hormigón con el fin de aplicar en el bordillo prefabricado.

Tipo I corresponde al material grueso triturado de la mina de Pifo, con un TMN de $\frac{3}{4}$ ". Está caracterizado bajo cumplimiento de la norma NTE INEN 872 [16], equivalente a la norma ASTM C33 [17].

Tipo II corresponde al material reciclado obtenido del proceso de trituración en la cantera de San Antonio de Pichincha con un TMN de 1". Este árido grueso es producto de elementos estructurales de demoliciones.

Tipo III corresponde al árido fino procedente de la cantera de Pintag, con un módulo de finura de 2.77.

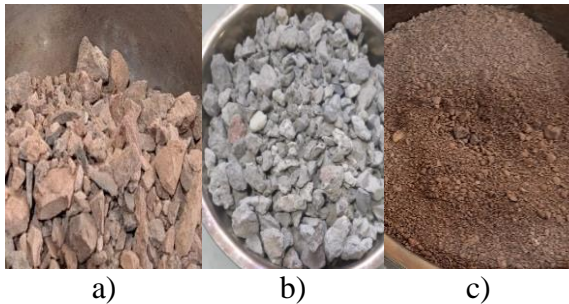


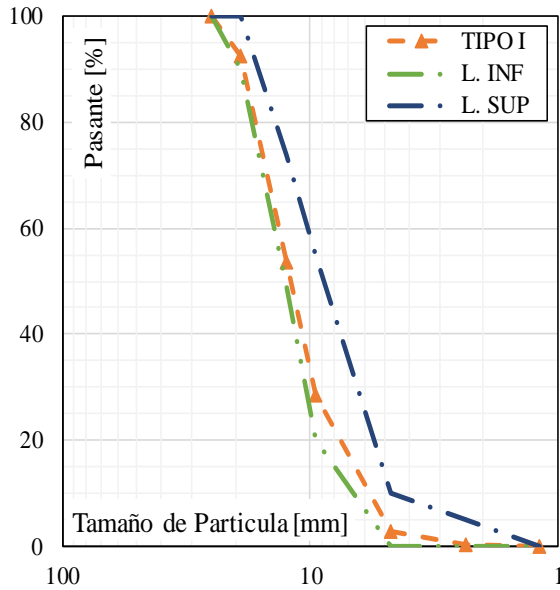
Figura 3.- Fotografías de los áridos empleados: a) Tipo I, b) Tipo II y c) Tipo III

Se procedió con los ensayos pertinentes para la caracterización de los materiales siguiendo la normativa INEN y ASTM. Por tanto, el árido fino y árido grueso fueron ensayados para conocer las características mecánicas del material para el diseño de mezcla.

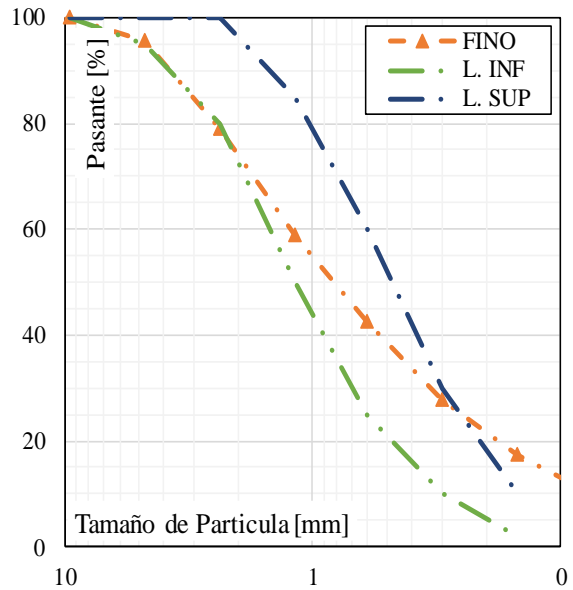
Se inició con ensayos de muestreo de áridos con el propósito de investigar, control del producto y aceptación o rechazo de los materiales, NTE INEN 695:2010 [18], reducción de muestras a tamaño de ensayo de

los áridos NTE INEN 2 566:2010 [19] por el método B de cuarteo que nos permite reducir de muestras grandes a un tamaño conveniente para la realización de la serie de ensayos donde se describirá el material y su calidad, granulometría en áridos grueso y fino NTE INEN 696:2011 [20], para determinar la graduación de los materiales con la intención de utilizar como áridos para hormigón, pesos específicos del árido grueso y fino ASTM C127 [21] Y ASTM C128 [22] , masas unitarias ASTM C 29 [23], contenidos de humedad nos permite el ajuste de cantidades para el amasada de hormigón NTE INEN 862:2011 [24] y abrasión NTE INEN 860:2011 [25] establece el valor de degradación del árido grueso mediante el desgaste.

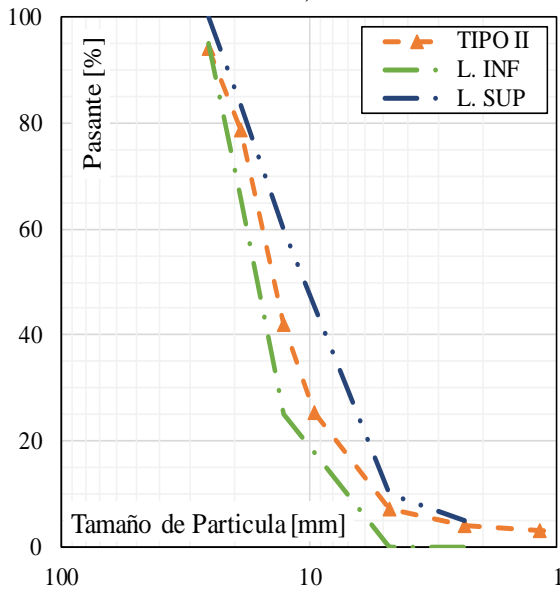
Se incorporó las granulometrías y fajas granulométricas en la Figura 3 los tipo de áridos: Tipo I corresponde al número 67, cubre los tamices con aberturas de (19.0 a 4.75mm), por otra parte la granulometría cumple parcialmente con el límite inferior; Tipo II corresponde al número 57 el cual cubre tamices con aberturas de (25.0 a 4.75mm), en cuanto a la granulometría se encuentra dentro de la faja 57; finalmente la faja del árido fino es estándar, un aspecto clave es asegurar que en ningún tamiz pase más del 45%, y dio como resultado final áridos aptos para el diseño de mezclas.



a)



c)



b)

Figura 4.- Curvas granulométricas y fajas de los materiales según ASTM C33 [26]: a) Tipo I, b) Tipo II y c) Tipo III

En la

Tabla 1 se presenta el resumen de los ensayos de caracterización de material realizados para los distintos tipos de áridos que los resultados obtenidos nos servirán para el diseño de mezcla.

Tabla 1.- Resultados de laboratorio para los tipos de áridos

	Áridos caracterizados		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Peso específico [g/cm ³]	2.66	2.33	2.68
Peso unitario suelto [g/cm ³]	1.23	1.26	1.51
Peso unitario varillado [g/cm ³]	1.31	1.31	1.65
Absorción [%]	2.7	8.22	4.53
TMN [mm]	19.05	25.40	-
Equivalente de arena [%]	-	-	82.2
Desgaste a la abrasión [%]	26.1	36	-
Módulo de finura	-	-	2.77

En este punto se puede apreciar los resultados de la caracterización de los diferentes materiales, podemos notar que en los pesos unitarios y específicos para los dos áridos gruesos se asimilan cuantitativamente. Con respecto a la absorción se puede distinguir que el tipo II correspondiente para el AR posee mayor absorción que el AN esto refleja que es un material que se encuentra menos húmedo y también puede ser porque contiene cemento antiguo envuelto en su conformación.

Es preciso enfatizar que las humedades del material fueron corregidas para cada diseño de mezcla, pues, no todas las mezclas son iguales y cada una contiene diferente sustitución de árido grueso reciclado.

Se logró determinar que el AN y el AR son aptos y cumplen con el requerimiento que indica la norma INEN 872 [16] que el valor de la degradación del material no exceda el 50%, por lo tanto, se puede elaborar hormigón con dichos materiales seleccionados.

El resultado del proporcionamiento de la mezcla se presenta en Tabla 2 en donde se puede apreciar los valores calculados para el diseño de hormigones de control así también para los sustitutos parciales que contienen árido grueso reciclado.

Tabla 2.- Peso por metro cúbico y resistencia a la compresión por mezcla.

Áridos por (m³) de hormigón (Kg)					
Diseños de Mezclas					
	Control	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III	Mezcla IV
Agua	216.10	216.89	217.03	218.27	218.97
Cemento			435.78		
Arena			883.53		
Árido grueso natural	851.39	808.82	723.68	545.97	425.69

Árido grueso reciclado	0	42.57	127.71	255.42	425.69
a/c				0.44	

3. Diseño de mezcla para bordillos

Al finalizar la caracterización de los materiales y haber realizado el diseño de hormigón requerido para elaborar bordillos prefabricados con el método ACI 211 se obtuvo un diseño patrón al cual se lo reemplazo parcialmente el 5% 15% 30% 50 % de árido grueso reciclado y verificar la influencia de esta sustitución con respecto a los hormigones de control.

4. Metodología de los ensayos.

Para llevar a cabo los ensayos en bordillos estos se han fabricado con dimensiones solicitadas para el mercado; cabe recalcar que, aunque existe la normativa para la elaboración de bordillos prefabricados está no impone valores obligatorios para la elaboración de estos; sin embargo, hay que respetar los valores mínimos que estipula la norma y el tipo de bordillo para su empleo.

En consecuente a esto el bordillo seleccionado para llevar a cabo la ejecución del proyecto es de tipo rebajado, de forma trapezoidal con las medidas que se indica en la Figura 5.

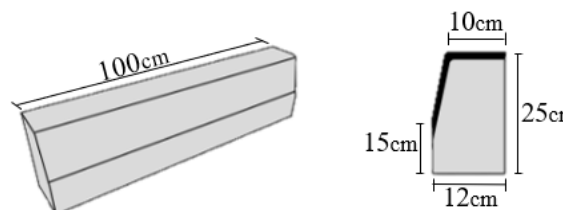


Figura 5.- Dimensiones técnicas de un bordillo tipo rebajado de hormigón

Los bordillos fueron elaborados con áridos naturales en donde se fue sustituyendo parcialmente al árido grueso reciclado en fracciones de (5%, 15%, 30% y 50%), dentro de la olla mezcladora se mezclaron con cemento y agua para obtener una mezcla semi seca, dicha mezcla se colocó en un molde de bordillo con las dimensiones especificadas en la figura 5, posteriormente se colocó en la mesa vibradora para reducir los vacíos, y distribuir uniformemente la mezcla para darle forma al mismo.

Luego de 24 horas de fraguado se procedió al curado de los bordillos utilizando agua durante 4 días, posteriormente se los envolvió con papel stretch permaneciendo 28 días finalmente para la movilización de estos, se usó un montacarga a medida que se iba ubicando adecuadamente cada bordillo en un camión para llevarlos al laboratorio y someterlos a los ensayos propuestos.



Figura 6.- Bordillos envueltos en papel stretch para 28 días de curado

4.1.1. Flexión en bordillos

Los especímenes de bordillos se elaboraron bajo la normativa NTE INEN 3132 [27], en la fabricación de bordillos de hormigón solamente se deben utilizar materiales cuyas propiedades y características sean las adecuadas para ello. Los requisitos de

idoneidad de los materiales utilizados deben recogerse en la documentación de control de producción del fabricante.

Ahora bien, se eligió un bordillo tipo rebajado que es el bordillo característico que se usa para delimitar la acera de la calzada y fueron ensayados a flexión siguiendo el procedimiento del anexo C de la misma normativa.

Para la ejecución del ensayo en los bordillos se tuvo que realizar ciertas adaptaciones al equipo y tener en cuenta ciertos aspectos característicos tales como, el peso mismo del bordillo, la longitud, y la adaptación del equipo, para cumplir con el correcto procedimiento que describe la norma; esto se dio debido a que las dimensiones de las probetas sobrepasaban las características físicas de una viga común, pues los bordillos eran más voluminosos.

Vale la pena señalar que para aplicar la carga puntual progresivamente a $\pm 5\text{mm}$ del centro de gravedad del bordillo, la distancia entre apoyos y los extremos fueron de 32 cm, se colocó horizontalmente la dimensión más grande de la sección transversal y finalmente se colocó una lámina de madera contrachapada de $4 \pm 1\text{mm}$ de espesor bajo el disco de acero para la realización del ensayo.



Figura 7.- Señalización de apoyos



Figura 8.- Colocación de bordillo



Figura 9.- Bordillo sobre apoyos, cuña y centro de bordillo en máquina de flexión

4.1.2. Desgaste en bordillos

Considerando la normativa NTE INEN 3132 [27] se llevó a cabo el desgaste por abrasión de los bordillos se determina mediante el ensayo de Böhme, en especímenes cúbicos obtenidos de los bordillos, esto se realizó para cada diseño de mezcla con el fin de ver la diferencia de desgaste producido entre las distintas sustituciones de árido grueso reciclado empleando 20g de abrasivo denominado aluminio fundido (corindón artificial).

Seguidamente se ensaya la probeta con 16 ciclos y cada ciclo consiste en 22 revoluciones, en síntesis, después de cada ciclo se limpia el disco y la cara de contacto

y por último se gira progresivamente la probeta de 90°.



Figura 10.- Aluminio fundido para ensayo de desgaste Böhme



Figura 11.- Material abrasivo en pista de ensayo

4.1.3. Ensayo de núcleos de bordillos

Este ensayo se realizó con la finalidad de corroborar la resistencia de diseño en los bordillos, se tomó en consideración la normativa ASTM C42 [28] Y ASTM C39 [29] para la obtención y preparación de los especímenes, así mismo como el procedimiento a realizarse; los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios y cumplen con los requerimientos solicitados a nivel de serviciabilidad y características físico-mecánicas.



Figura 12.- Máquina cortadora para extracción de núcleos

Para la extracción de las muestras se procedió según estipula la norma ASTM C42 [28], teniendo en consideración las dimensiones para la obtención de núcleos y considerando la sección del bordillo a ensayar. Posteriormente se tomó 2 testigos de cada bordillo con su respectivo porcentaje de sustitución de árido grueso reciclado, dando un total de 10 testigos.



Figura 13.- Núcleos extraídos de bordillos

3. Resultados y discusión

En este apartado se mostrarán los resultados finales obtenidos después de los ensayos realizados en laboratorio tales como la dosificación de los hormigones de control en bordillos, dosificación con árido grueso reciclado, resistencia a la compresión de hormigones con los porcentajes de

sustitución respectivos, resistencia a la flexión y desgaste de bordillos que contienen áridos gruesos reciclados.

3.1. Ensayo de resistencia a la compresión

En la Tabla 3 se puede observar los resultados obtenidos del ensayo de compresión a los 28 días con su respectiva sustitución de árido grueso reciclado, el ensayo se llevó a cabo bajo la normativa ASTM C39 [29] tomando en cuenta las solicitaciones de curado y tratamiento de hormigones para posteriormente ser ensayados.

Durante el proceso de elaboración de los especímenes cilíndricos se llevó el control del procedimiento de manera rigurosa, ejecutando el varillado de cilindros y moldeo con una técnica adecuada y respetando las indicaciones de la norma establecida para garantizar condiciones adecuadas de laboratorio

Tabla 3.- Resultados del ensayo a compresión a 28 días en especímenes de laboratorio

	Hormigón control	Hormigón con sustitución			
		5%	15%	30%	50%
f_c	0%	5%	15%	30%	50%
[MPa]	47.58	35.50	37.96	32.14	35.11
CV	(0.017)	(0.025)	(0.028)	(0.02)	(0.012)

Nota: Coeficiente de variación en paréntesis

Se logra apreciar la variación entre la resistencia a la compresión de los distintos especímenes, obteniendo entre uno de ellos el de control 47.58 MPa el valor más alto, así mismo se comprueba la variación que existe entre los hormigones sustituidos parcialmente con AR para poder realizar una comparación cuantitativa de la variación de

resistencia a la compresión entre las distintas sustituciones con árido grueso reciclado.

3.2. Ensayo de flexión en bordillos

Se realizó el ensayo de flexión en bordillos siguiendo la normativa NTE INEN 3132 con una edad de 28 días y considerando las condiciones de curado de los especímenes a ensayar, posteriormente se calculó y registró los resultados en la Tabla 4.

Tabla 4.- Resultados obtenidos después de realizar el ensayo de flexión

	Bordillos control	Bordillos con sustitución de árido grueso reciclado			
		5%	15%	30%	50%
Resistencia a la flexión [MPa]	6.9	6.2	6.7	6.7	6.6
Carga de rotura máx. [kN]	24.9	22.3	24	24	23.8

Se puede observar que la resistencia a flexión en los bordillos cumple satisfactoriamente con la sollicitación estipulada en la norma para que se consideren como elementos prefabricados. Se aprecia que la diferencia de resistencia a flexión entre los distintos bordillos que contienen AR no es exagerada por el contrario se asimilan lo que nos da un indicativo que el nuevo material estudiado una vez que conforma la matriz de hormigón del bordillo ayuda a la resistencia a la rotura del espécimen.



Figura 14.- Bordillo ensayado a flexión

3.3. Resultados obtenidos después de realizar el ensayo de desgaste por el método Böhme.

Finalmente se realizó el ensayo de desgaste de bordillos usando la normativa NTE INEN 3132 [27], ANEXO E, método de Böhme, para la cual se cumplió con todos los lineamientos estipulados en la norma y respetando los requerimientos de los cubos para realizarlos en la máquina de desgaste.

En la Tabla 5 se muestra los resultados obtenidos del ensayo por el método de Böhme en los que cumple satisfactoriamente el requerimiento de desgaste que solicita la normativa antes mencionada.

Tabla 5.- Valores de volumen de desgaste por abrasión (Método Böhme)

Ciclos	Desgaste (20 000mm ³ /5 000mm ²)				
	Control mm ³	5% mm ³	15% mm ³	30% mm ³	50% mm ³
1-4	2135	2403	2314	2380	2616
5-8	2243	2301	2430	2403	2582
9-12	2007	2190	2379	2454	2496
13-16	1992	2447	2420	2380	2203
Total [mm ³]	8377	9341	9543	9618	9867

Se puede apreciar que los valores obtenidos después de la ejecución del ensayo son eficaces alcanzando con éxito el requerimiento que estipula la norma NTE INEN 3132, la interpretación cuantitativa quiere decir que no debe sobrepasar 20 000 mm³ por cada 5 000mm² de desgaste al finalizar los 16 ciclos de ensayo por probeta, observando así que nuestros especímenes pasan satisfactoriamente la prueba requerida.

3.4. Resultados obtenidos al realizar el ensayo de núcleos de los bordillos

En la Tabla 6 podemos observar las resistencias obtenidas de los bordillos mediante la extracción de testigos, alcanzado la resistencia a la compresión requerida para dar por valido al espécimen cilíndrico ensayado.

Es pertinente mencionar que los testigos extraídos provienen de un proceso de curado y moldeado distinto que al de los especímenes cilíndricos que se emplearon para determinar la resistencia a la compresión presentados en la Tabla 3, pues estos a diferencia de ser varillados fueron vibrados en una mesa industrial de una fábrica de bordillos, así mismo el curado se lo realizó asemejando el curado para columnas, envuelto en papel stretch, por su volumen y peso considerables como para ser sumergidos en piscinas como se hace típicamente con cilindros y vigas elaboradas en laboratorio.

Tabla 6.- Valores de esfuerzo a la compresión en núcleos

	Resistencia f'c en núcleos de bordillos				
	Control	5%	15%	30%	50%
MPa	32.2	31.7	33.3	30.4	30.7
kg/cm ²	328.9	323.8	339.6	310.2	313.1

4. Conclusiones

Los resultados de los ensayos realizados arrojaron los siguientes resultados:

El material reciclado que se utilizó en el estudio principalmente el árido grueso reciclado es apto para realizar cualquier tipo de hormigón pues cumple con la resistencia a la abrasión por desgaste presentando un valor de 36% y cumple los requerimientos de la normativa ASTM C33.

En cuanto al diseño de mezclas para hormigones de control y hormigones que contienen el 5% 15% 30% 50% de sustituto parcial de árido grueso reciclado alcanzó la resistencia a la compresión, requerida de manera exitosa, arrojando valores que se detallan a continuación: 47.58MPa - 35.50MPa - 37.96MPa - 31.52MPa - 35.11MPa respectivamente siendo el de control el valor más alto obtenido.

Los valores de resistencia a flexión en bordillos cumplieron, satisfactoriamente con lo requerido en la normativa NTE INEN 3132, por lo que el producto final de la investigación se encuentra bajo los estándares establecidos, es decir posee un buen desempeño en cuanto a las solicitaciones físico-mecánicas para la aplicación real del proyecto.

En cuanto al desgaste producido en los bordillos que fue de 9 349 mm³/5 000 mm² en promedio, se puede deducir que, para cada sustitución parcial, se cumple satisfactoriamente con el requerimiento de desgaste 20 000 mm³/5 000 mm² todas nuestras probetas pasaron por debajo de este valor por lo que le convierte al producto final en un material de buenas características de serviciabilidad y durabilidad.

Finalmente se evidencia que el árido reciclado es un buen sustituto de agregado natural y puede ser usado satisfactoriamente para la fabricación de hormigones no estructurales como los bordillos, sin embargo, en un futuro se puede realizar investigaciones que permitan optimizar el diseño de mezcla a fin de poder sustituir en mayor proporción el árido reciclado.

Agradecimientos

El autor realiza un agradecimiento formal a la empresa Angos e hijos Construcciones S.A, por el apoyo y la apertura para el uso de su trituradora, a Holcim Ecuador S.A, principalmente a la Ing. Tatiana Viracucha jefe de planta RMX Quito, por proveer el material pétreo en esta investigación.

5. Referencias

- [1] A. Andrade and J. Sono, “Aplicación del ensayo de curado acelerado en cilindros de hormigón sometidos a compresión simple,” Disertación de grado previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador, 2014.
- [2] Arias Cabezas Rómulo Alejandro, “Propiedades físico - mecánicas del hormigón elaborado con áridos reciclados,” Universidad Central del Ecuador, 2017.
- [3] Organismo de normalización española UNE, “Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD),” Madrid, España, 2010.
- [4] Norma Técnica Peruana, “Manejo de Residuos de la Actividad de la Construcción. Generalidades,” Lima, Perú, 1999.
- [5] Norma Técnica Peruana, “Manejo de Residuos de la Actividad de la Construcción. Reciclaje de Concreto de Demolición,” Lima, Perú, 1999.
- [6] J. S. Bolaños Noboa, “Estudio del uso de materiales reciclados como hormigones, cerámicas y otros productos de derrocamiento o desperdicio de obra como agregados para un hormigón.,” Disertación previa a la obtención del título de Ingeniero Civil, Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador, 2016.
- [7] Carlos Eesteban Contreras Lojano, “Concreto con áridos reciclados: adaptación de esta tecnología, alcanzando por lo menos 210kg/cm² de resistencia a la compresión,” Universidad de Cuenca, 2012.
- [8] D. Campaña, “Elaboración de concreto utilizando agregado grueso reciclado de los elementos estructurales de las edificaciones colapsadas por el terremoto en Pedernales,” Requisito para obtención del título de Magíster en Gestión Ambiental, Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador, 2017.
- [9] E. B. Ayala and L. E. Iñiguez, “Elaboración de bloque a base de escombros de hormigón, cal y puzolana para viviendas del cantón Durán,” Proyecto de investigación previo a la obtención del título de Arquitecto, Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2019.
- [10] F. Editores, “Nuevas obras en Málaga ejecutadas con áridos reciclados,” Madrid, España, p. 2, Oct. 18, 2016.
- [11] Z. Sánchez Roldán, “Utilización de árido reciclado para la fabricación de piezas de hormigón prefabricado de mobiliario urbano,” Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada, España, 2019.

- [12] L. Santalla, “La prueba de la fenolftaleína - Teoría de construcción,” 2012. <https://teoriadeconstruccion.net/blog/la-prueba-de-la-fenolftaleina/>.
- [13] G. Realpe, “Metodos de ensayo in situ utilizados en la evaluación de estructuras de hormigón armado,” Quito, Ecuador, pp. 17–20, Nov. 2016.
- [14] A. Moreno, “Qué es la curva granulométrica de los agregados y cómo asegurarte de que sea la correcta para tu proyecto,” *360 en concreto*, 2022. <https://360enconcreto.com/blog/detalle/que-es-la-curva-granulometrica-de-los-agregados-y-como-asegurarte-de-que-sea-la-correcta-para-tu-proyecto-1/>.
- [15] S. L. Huanca, “Diseño de mezclas de concreto,” Puno, Perú, 2006.
- [16] Norma Técnica Ecuatoriana, “Áridos para hormigón requisitos,” Quito, Ecuador, 2011. [Online]. Available: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/872-1.pdf>.
- [17] American Society for Testing and Materials, “Especificación Normalizada de Agregados para Concreto,” California, Estados Unidos, 2009.
- [18] Norma Técnica Ecuatoriana, “Áridos. Muestreo.,” Quito, Ecuador, 2010. [Online]. Available: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_695-1.pdf.
- [19] Norma Técnica Ecuatoriana, “Áridos. Reducción de muestras a tamaño de ensayo,” Quito, Ecuador, 2010. [Online]. Available: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2566.pdf>.
- [20] Norma Técnica Ecuatoriana, “Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso,” Quito, 2011. [Online]. Available: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/696.pdf>.
- [21] American Society for Testing and Materials, “Método de prueba estándar para la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica), y absorción de agregado grueso,” California, Estados Unidos, 2007.
- [22] American Society for Testing and Materials, “Método de prueba estándar para Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica), y Absorción del Agregado Fino,” California, Estados Unidos, 2001.
- [23] American Society for Testing and Materials, “Método de Ensayo Normalizado para determinar la densidad aparente (“peso unitario”) e Índice de Huecos en los Áridos,” California, Estados Unidos, 1997.
- [24] Norma Técnica Ecuatoriana, “Determinación del contenido total de humedad,” Quito, 2011. [Online]. Available: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/862.pdf>.
- [25] Norma Técnica Ecuatoriana, “Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5mm mediante el uso de la máquina de los ángeles,” Quito, 2011. [Online]. Available: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/860.pdf>.
- [26] ASTM C33/C33M – 18, “Standard Specification for Concrete Aggregates,” United States, 2018.
- [27] Norma Técnica Ecuatoriana, “Bordillos prefabricados de hormigon. requisitos y métodos de ensayo,” Quito, Ecuador, 2017. [Online]. Available: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_3132.pdf.
- [28] American Society for Testing and Materials, “Método de prueba

estándar para Obtención y Ensayo de Núcleos Perforados y Vigas Aserradas de Concreto,” California, 2008. doi: 10.1520/mnl10913m.

- [29] American Society for Testing and Materials, “Determinación del Esfuerzo de Compresión en Especímenes Cilíndricos de Concreto,” California, 2001. [Online]. Available: <https://normanray.files.wordpress.com/2010/10/kuliah-7b-beton-segar-astm-c39.pdf>.