



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL HORMIGÓN TRADICIONAL CON
HORMIGÓN ELABORADO CON FIBRAS DE CAUCHO RECICLADO
INCORPORADO A VOLÚMENES DE 0.50%, 0.75%, 1.00% Y 1.25%, MEDIANTE
LOS ENSAYOS A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN**

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

AUTOR: Gerson Esteban Cajas Reina
Jefferson Alexander Esquivel Reinoso
TUTOR: Daniel Armando Valverde Castillo

Quito - Ecuador
2023

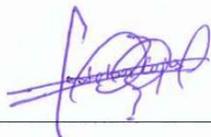
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Gerson Esteban Cajas Reina con documento de identificación N° 1723278352 y Jefferson Alexander Esquivel Reinoso con documento de identificación N° 0503515827; 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.

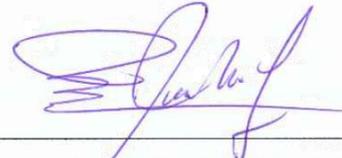
Quito, 24 de julio del 2023

Atentamente,



Gerson Esteban Cajas Reina

1723278352



Jefferson Alexander Esquivel Reinoso

0503515827

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

Nosotros, Gerson Esteban Cajas Reina con documento de identificación N° 1723278352 y Jefferson Alexander Esquivel Reinoso con documento de identificación N° 0503515827; 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: “Análisis comparativo del Hormigón tradicional con Hormigón elaborado con Fibras de Caucho reciclado incorporado a volúmenes de 0.50%, 0.75%, 1.00% y 1.25%, mediante los ensayos a compresión y tracción”, 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, 24 de julio del 2023

Atentamente,



Gerson Esteban Cajas Reina

1723278352



Jefferson Alexander Esquivel Reinoso

0503515827

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: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL HORMIGÓN TRADICIONAL CON HORMIGÓN ELABORADO CON FIBRAS DE CAUCHO RECICLADO INCORPORADO A VOLÚMENES DE 0.50%, 0.75%, 1.00% Y 1.25%, MEDIANTE LOS ENSAYOS A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN, realizado por Gerson Esteban Cajas Reina con documento de identificación N° 1723278352 y por Jefferson Alexander Esquivel Reinoso con documento de identificación N° 0503515827, 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, 24 de julio del 2023

Atentamente,



Ing. Daniel Armando Valverde Castillo, Msc.

1900467869

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL HORMIGÓN
TRADICIONAL CON HORMIGÓN ELABORADO
CON FIBRAS DE CAUCHO RECICLADO
INCORPORADO A VOLÚMENES DE 0.50%, 0.75%,
1.00% Y 1.25%, MEDIANTE LOS ENSAYOS A
COMPRESIÓN Y TRACCIÓN**
**COMPARATIVE ANALYSIS OF TRADITIONAL CONCRETE WITH
CONCRETE MADE WITH RECYCLED RUBBER FIBERS INCORPORATED
AT VOLUMES OF 0.50%, 0.75%, 1.00% AND 1.25%, THROUGH
COMPRESSION AND TENSILE TESTS**

Gerson Cajas-Reina¹, Jefferson Esquivel-Reinoso², Daniel Valverde-Castillo³

Resumen

El presente artículo presenta la comparación entre el hormigón tradicional y el hormigón con fibras de caucho reciclado incorporado a ligeros volúmenes como agregado fino. Siguiendo los procedimientos y normativas ASTM e INEN para la correcta caracterización de los materiales y componentes a fin de obtener resultados aptos para una resistencia de 24MPa, siendo evaluados a través de los ensayos de compresión y tracción indirecta. Al incorporar fibras de caucho como material reciclable se busca disminuir los residuos generados en la construcción civil e incorporar nuevas técnicas y métodos de construcción, para ello se realizaron mezclas a diferentes porcentajes y se comparó con el hormigón tradicional, con lo que se obtuvo resultados favorables siendo así un hormigón tradicional de 22.48 MPa a los 7 días y 28.85 MPa a los 14 días de sus respectivos ensayos, mientras que en su máximo porcentaje de inclusión de caucho; es decir, del

Abstract

This article presents the comparison between traditional concrete and concrete with recycled rubber fibers incorporated in light volumes as fine aggregate. Following the ASTM and INEN procedures and regulations for the correct characterization of materials and components to obtain suitable results for a resistance of 24MPa, being evaluated through compression and indirect traction tests. By incorporating rubber fibers as a recyclable material, the aim is to reduce the waste generated in civil construction and incorporate new construction techniques and methods, for which purpose mixtures were made at different percentages and compared with traditional concrete, with which favorable results were obtained. Thus, being a traditional concrete of 22.48 MPa at 7 days and 28.85 MPa at 14 days of their respective tests, while in its maximum percentage of rubber inclusion; that is, from

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

Cajas, Esquivel y Valverde / Análisis comparativo del hormigón tradicional con hormigón elaborado con fibras de caucho reciclado incorporado a volúmenes de 0.50%, 0.75%, 1.00% y 1.25%, mediante los ensayos a compresión y tracción

1.25% se obtuvo una resistencia de 18.34 MPa a los 7 días y 24.33 MPa a los 14 días de sus respectivos ensayos. Por otra parte, en los ensayos a tracción indirecta presentan valores de hasta 3.88 MPa en el hormigón tradicional y 2.95 MPa en el hormigón con incorporación de las fibras de caucho reciclado al 1.25% a los 14 días de su ensayo.

Palabras Clave: Hormigón tradicional, hormigón con fibras de caucho, resistencia, compresión, tracción indirecta, durabilidad.

1.25%, a resistance of 18.34 MPa was obtained at 7 days and 24.33 MPa at 14 days of their respective tests. On the other hand, in indirect tensile tests, they present values of up to 3.88 MPa in traditional concrete and 2.95 MPa in concrete with the incorporation of 1.25% recycled rubber fibers 14 days after the test.

Keywords: Traditional concrete, concrete with rubber fibers, resistance, compression, indirect traction, durability.

1. Introducción

De acuerdo con la investigación realizada por el autor (Bastidas & Viñán, 2017) explica que “En el Ecuador se producen anualmente 2’500.000 neumáticos y según una ley del estado, los fabricantes e importadores deben recuperar el 30% de su producción. El 70% restante, se convierte en un problema ambiental debido a la disposición final del desecho. La reutilización del caucho en mezclas de hormigón se plantea como una solución para minimizar la contaminación causada por los neumáticos desechados” [1].

Por otro lado, “anualmente a nivel mundial se producen más de 4.000 millones de toneladas de cemento, lo que representa alrededor del 8% de las emisiones mundiales de CO₂. Si la industria cementera fuera un país, ocuparía el tercer lugar como la más grande del mundo, después de China y Estados Unidos” [2]. Debido a la contaminación que produce la fabricación del cemento, surge la necesidad de buscar nuevas alternativas que enfrenten este problema.

El hormigón es considerado parte primordial al momento de hablar de obras civiles; por tal razón, es uno de los elementos más investigados e imprescindibles en la construcción debido a su factibilidad al combinarse con otros elementos que ayudan al mejoramiento, sostenibilidad económica, resistencia y durabilidad de las estructuras.

En el transcurso del tiempo se evidencian daños en las estructuras debido a agentes externos por lo que se han realizado investigaciones de nuevos elementos, métodos y combinaciones que aporten a su sostenibilidad. Esta propuesta incluye el residuo de neumático (caucho) en la elaboración del concreto, para reemplazarlo como agregado fino, y así mejorar o igualar las capacidades físicas y mecánicas del hormigón empleado en la construcción; además, minimizar el impacto ambiental generado.

Por lo que el objetivo de esta investigación fue comparar el hormigón tradicional con el hormigón reciclado de fibras de caucho al 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25% y con esto mitigar el impacto ambiental ocasionado por el creciente número de neumáticos que se desechan al final su vida útil. Estos

residuos pueden emplearse como alternativa en la fabricación de concreto, reduciendo el uso del árido fino.

De esta manera se planteó una nueva forma de fabricar hormigón ayudando a disminuir el efecto invernadero, puesto que la industria de la construcción provoca contaminación y destrucción de los ecosistemas naturales del país.

El hormigón con caucho reciclado puede llegar a ser un complemento fundamental en la industria de la construcción en un futuro cercano, debido a que la sociedad sigue avanzando con nuevas tecnologías y formas de reutilizar las materias procesadas, reduciendo así la contaminación y obteniendo estructuras resistentes y duraderas.

2. Materiales y Métodos

2.1. Materiales

2.1.1. Agregado grueso

Para el agregado grueso se utilizó el producto de la cantera de Pintag con TMN $\frac{3}{4}$ de pulgadas, el cual fue ensayado en los laboratorios de la Hormigonera Hércules para determinar las características de este, de acuerdo con la norma ecuatoriana NTE INEN 861 [3].

2.1.2. Agregado fino

Para el agregado fino se utilizó el producto obtenido de la cantera mitad del mundo (Ortiz), el mismo que se lo ensayó en los laboratorios de la Hormigonera Hércules con el fin de obtener las características del agregado.

2.1.3. Cemento

Se utilizó el cemento Chimborazo Premium Tipo HE, que es un cemento hidráulico de altas resistencias iniciales fabricado bajo la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380 [4]. Además de su alta resistencia temprana, el cemento Chimborazo tipo HE también ofrece una excelente resistencia a la compresión a largo plazo y una buena resistencia a los sulfatos. Este cemento cumple con los requisitos de las normas ASTM C 150 [5]

2.1.4. Fibras de caucho

La fibra se obtuvo de una planta procesadora de caucho de neumáticos reciclados ubicada al norte de la ciudad de Santo Domingo de los Tsáchilas. El material proporcionado fue cribado y tamizado respectivamente por la recicladora antes mencionada. El caucho reciclado es más económico que comprarlo como material nuevo, lo que redujo los costos de producción y aumentó la rentabilidad al momento de ejecutar esta propuesta.

2.2. Métodos

Diseño de una mezcla de hormigón para las siguientes condiciones y restricciones utilizando el método basado en el volumen absoluto.

El método del volumen absoluto es más preciso y envuelve el uso de las densidades (gravedad específica) de los ingredientes para calcular el volumen absoluto que cada uno de ellos ocupará en una unidad de volumen de concreto [6].

$$\text{Volumen absoluto} = \frac{\text{masa de material suelto}}{\text{densidad relativa del material} * \text{densidad del agua}} \quad (1)$$

Diseño de mezcla de hormigón de acuerdo su resistencia requerida $f'c$.

$$f'cr = f'c + 1.34s \quad (2)$$

$f'cr$: Resistencia a compresión media del concreto requerida, MPa (kg/cm²).

$f'c$: Resistencia a compresión especificada del concreto, MPa (kg/cm²).

s : Desviación estándar, MPa (kg/cm²).

2.4 Mpa (más de 30 muestras no se necesita hacer ninguna modificación).

Para mezclas con una gran desviación estándar de resistencia, el ACI ha enunciado otro criterio:

$$f'cr = f'c + 2.33s - 3.45 \quad (3)$$

El diseño de la mezcla es buscar los ingredientes necesarios como (cemento, agua y agregados) y su respectiva dosificación óptima para obtener el producto final con las características deseadas.

2.2.1. Requerimientos de diseño

- Selección del asentamiento de la mezcla.
- Selección del tamaño máximo de los agregados.
- Estimación de la inclusión de aire en la mezcla. Determinación de la resistencia de diseño. Selección de la relación agua/cemento.
- Cálculo del contenido de cemento. Estimación de la cantidad de agregados.
- Estimación de la sustitución parcial del agregado fino por el caucho.
- Dosificaciones finales por cada diseño de mezcla y porcentaje de sustituto caucho.

2.2.2. Caracterización física de los materiales

2.2.2.1. Granulometría

Para determinar el tamaño de las partículas de los agregados en el hormigón se utiliza el método granulométrico. La norma técnica utilizada en Ecuador que describe los procedimientos para realizar los ensayos de granulometría en agregados gruesos y finos es la NTE INEN 696 [7], la cual fue necesaria en la caracterización los agregados para asegurar que cumplieran con todos los requisitos técnicos en la elaboración del hormigón con fibras de caucho.

2.2.2.2. Granulometría de agregados finos.

La norma ASTM C33 [8] establece que el rango adecuado del agregado fino depende del tipo de obra que se vaya a ejecutar. Si se calcula una buena relación de agua/cemento y se selecciona la proporción correcta de agregados finos y gruesos, se obtiene una mejor compactación y trabajabilidad en el hormigón, lo que conduje a una mayor resistencia y durabilidad de este. También es importante que el rango de tamaño de los agregados sea el adecuado para reducir la cantidad de aire atrapado en el hormigón, lo que puede mejorar su calidad.

La norma AASHTO ayuda a determinar qué porcentaje es el correcto tanto como máximo y mínimo en el tamizado. La ASTM C 33 [8] explica que el agregado fino no debe de contener

>más de 45% de material retenido en los tamices consecutivos y el módulo de finura tiene que ser mayor a 2.3 e inferior a 3.1 y el rango normal no tendría que variar más de 0.2 del valor del agregado [6].

2.2.2.3. Abrasión en el agregado grueso

Se efectuó la prueba de abrasión NTE INEN 861 [3] en el agregado grueso, el cual determina la resistencia de este e indica si es el adecuado para emplearlo en la dosificación. Este ensayo consistió en introducir una muestra de masa inicial en la máquina de Los Ángeles junto con 12 esferas, con el fin de determinar el porcentaje de desgaste que resulta del impacto.

2.2.2.4. Colorimetría en el agregado fino

Esta prueba proporciona información sobre la composición orgánica y la calidad del agregado fino, lo cual es crucial en el momento que fragüe el hormigón. Ante esto, el ensayo se basa en la comparación con una tabla de colores que determina su aceptabilidad; cuanto más oscuro se encuentre el líquido de la muestra, menor es su calidad. Como resultado se determinó que el agregado fino para este proyecto cumple con los requisitos técnicos de la norma NTE INEN 855 [9] debido a que como se puede apreciar el color del líquido de la muestra es amarillenta clara siendo menor que el color estándar o patrón Gardner.



Figura.1. Colorimetría agregado fino.

Al seguir los procedimientos en la norma INEN 872 [10] para caracterizar los materiales del proyecto, se asegura que se cumplan los límites estipulados para el análisis granulométrico del agregado fino, que van desde 2.3 hasta 3.1.

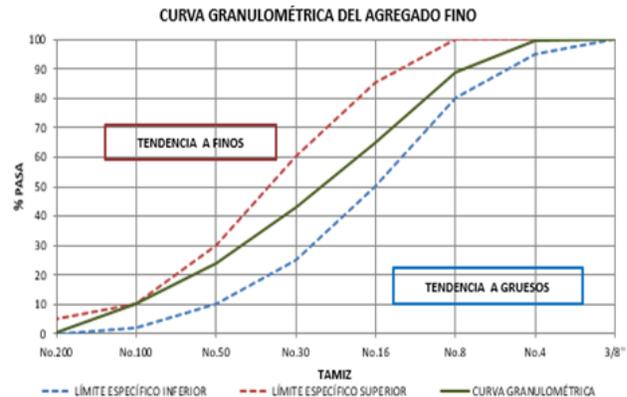


Figura. 2. Curva granulométrica del agregado fino San Antonio Ortiz.

Los resultados obtenidos fueron de 2.70 lo cual para la trabajabilidad del hormigón es buena de acuerdo con la norma INEN 872 [10]. Inmediatamente al caracterizar los materiales se continuó con el diseño del hormigón tradicional, seguido de una relación a/c de 0.60 para el desarrollo del hormigón a 24 MPa.

Tabla 1: Resultado de la caracterización de los agregados.

Ensayo	Resultados	
	A. Fino	A. Grueso
Módulo de finura	5.10	2.70
Tamaño máximo grava	-	¾
Densidad aparente	2.19	2.51
Absorción (%)	4.00	4.09
Masa unitaria compact. (kg/m ³)	2537.10	2428.10
Humedad (%)	2.22	0.93
Módulo de finura	2.70	5.10

2.3. Hormigón con fibras de caucho

Antes de diseñar la mezcla de hormigón tradicional, se llevó a cabo la caracterización de los materiales utilizados para la elaboración de cuatro tipos de mezclas de hormigón, cada una con diferentes porcentajes de partículas de caucho reciclado.

Tabla 2: Porcentajes de inclusión de fibras de caucho.

Porcentajes	Edades (días)
Inclusión de 0.50%	1, 3, 7 y 14
Inclusión de 0.75%	1, 3, 7 y 14
Inclusión de 1.00%	1, 3, 7 y 14
Inclusión de 1.25%	1, 3, 7 y 14

Se necesita un proceso previo para incluir las fibras de caucho en la mezcla de cemento, debido a que el caucho es naturalmente repelente al agua, lo que puede provocar uniones débiles con la base de cemento. Esto aumenta la posibilidad de que se produzcan fallas cuando la mezcla es sometida a tensiones externas. Además, se debe controlar el tamaño y la distribución de las fibras al agregarlas en la mezcla.

2.4. Diseño de la mezcla

Tabla 3: Mezcla de diseño de 24 MPa

Material	Procedencia	Batch 20 lt
Cemento	UCEM	5.50 kg
Agua	Planta	4.24 lt
Arena	San Antonio (Ortiz)	21.78 kg
Grava 3/4 ''	Mina de Pintag	12.77kg
Master Glenium		0.048kg

La tabla 3 representa las cantidades de los materiales que se usó para la dosificación. Por lo que, se realizaron todas las diferentes mezclas en una concretera de 20 litros con las siguientes proporciones: agregado fino 21.78 kg, agregado grueso 12.77 kg, agua 4.24 litros, cemento tipo HE 5.50 kg y aditivo Master Glenium 48.10 gr.



Figura.3. Diseño de la mezcla.

Según las observaciones realizadas en este proyecto de investigación, los asentamientos en cada batch ASTM C494 [11] varían en función de las cantidades de fibras de caucho que se utilizan en el diseño.

La tabla 4 presenta los asentamientos de las diferentes mezclas, todas con 20cm ± 2. Las siglas Hor. Trad. representan el hormigón tradicional y Hca. representa el hormigón con diferentes porcentajes de caucho reciclado añadido.

Tabla 4: Asentamientos para las diferentes mezclas

Clase	Asentamiento (cm)
Hor. Trad.	20.20
Hca 0.50%	20.17
Hca 0.75%	19.18
Hca 1.00%	19.12
Hca 1.25%	18.72



Figura. 4. Verificación del asentamiento.

2.5. Proceso de fabricación del hormigón tradicional y hormigón con fibras de caucho

Para la elaboración de los especímenes de hormigón, se emplearon moldes de 10 centímetros de diámetro y 20 centímetros de longitud, según lo establecido por la norma NTE INEN 3124 [12], se realizó la recolección de muestras de hormigón para su posterior análisis cumpliendo con lo establecido en la norma NTE INEN 1763 [13]. Es importante medir indirectamente la trabajabilidad de la mezcla fresca, por lo que se utilizó el cono de Abrams

NTE INEN 1576 [14] de acuerdo con lo determinado en el asentamiento o revenimiento.

Los especímenes de hormigón se curaron en un cuarto de humedad al 100% el cual posee rociadores para cierto tiempo dado, a una temperatura promedio de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, de acuerdo con la norma NTE INEN 2528 [15].

Se realizaron ensayos de compresión en los especímenes de hormigón a las edades de 1, 3,7 y 14 días. Para este fin, se ensayaron 3 especímenes por cada edad y mezcla, registrando la carga máxima alcanzada por cada probeta. Luego se obtuvo el esfuerzo promedio de una mezcla, ya sea tradicional o con inclusión de caucho, utilizando el procedimiento establecido en el reglamento NTE INEN 1573 [16]. De manera similar, se realizaron ensayos a tracción en probetas prismáticas por cada edad y mezcla, tanto para el hormigón tradicional como para las mezclas de hormigón con fibras de caucho. Estas probetas fueron sometidas a carga en el punto medio y ensayadas a los 7 y 14 días de edad.

2.5.1. Determinación del cambio de peso

El cambio de peso del hormigón con inclusión de caucho se utilizó como un indicador de la porosidad del hormigón y, por lo tanto, de su durabilidad y resistencia a la intemperie. En general, el peso es menor para el hormigón con inclusión de caucho que para el hormigón tradicional. Según los datos obtenidos en los ensayos, un espécimen de mezcla tradicional seco pesó alrededor de 3.67 kg, mientras que un cilindro con caucho reciclado pesa 3.55 kg.

2.5.2. Tipos de fractura

Después de realizar los ensayos de compresión, los diferentes tipos de fractura permiten explicar la resistencia entre las probetas ensayadas. En estos ensayos, se presentaron con mayor frecuencia fracturas de tipo 4, 5 y 6 debido a la madurez temprana que tenían los especímenes. Estos resultados coinciden con lo que se muestra en la figura 5, donde se presentan los tipos de fracturas por compresión de acuerdo con la norma NTE INEN 1573 [16].

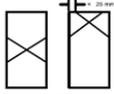
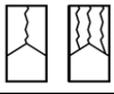
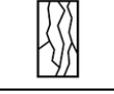
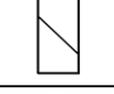
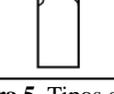
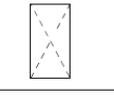
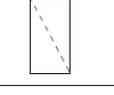
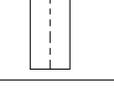
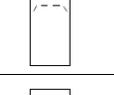
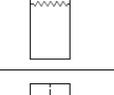
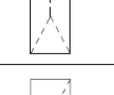
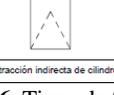
TIPOS	PROBETA	DESCRIPCIÓN
Tipo 1		Conos en ambos extremos razonablemente bien formados, fisuras a través de la cabecera menor a 25 mm.
Tipo 2		Cono bien formado en uno de los extremos, fisuras verticales que recorren a través de la cabecera, cono no muy definido en el otro extremo.
Tipo 3		Fisura vertical columnar a través de ambos extremos, conos no muy definidos.
Tipo 4		Fractura diagonal sin fisuras a través de los bordes; golpear con un martillo para distinguir del Tipo 1.
Tipo 5		Fracturas a los lados, en el extremo superior o en el fondo (ocurren comúnmente cuando se ensayó con neoprenos).
Tipo 6		Similar al Tipo 5, pero extremo del cilindro está en punta.

Figura.5. Tipos de fracturas a compresión [16].

De igual forma, durante la realización de pruebas de tracción indirecta (Método Brasileño) se identificaron principalmente fracturas de tipo 6 a los 7 días y el tipo 3 a los 14 días, tal como se muestra en la figura 6, la cual representa los tipos de fracturas por tracción indirecta.

TIPOS	PROBETA	DESCRIPCIÓN
Tipo 1		Cónica Se presenta cuando se logra una carga de compresión bien aplicada sobre un espécimen de prueba bien preparado.
Tipo 2		Transversal Se presenta comúnmente cuando las caras de aplicación de carga se encuentran en el límite de desviación (perpendicularidad) tolerada especificada de 0,5°.
Tipo 3		Columnar Se presenta en especímenes que presentan una superficie de carga convexa y deficiencia del material de refrendado; también por concavidad del plato de cabeceo o convexidad en una de las placas de carga.
Tipo 4		Se presenta en especímenes que presentan una cara de aplicación de carga cóncava y por deficiencias del material de refrendado; también por concavidad de una de las placas de carga.
Tipo 5		Se presenta cuando se producen concentraciones de esfuerzos en puntos sobresalientes de las caras de aplicación de carga y deficiencia del material de refrendado, por rugosidades en el plato en el que se realiza el refrendado o por deformación de la placa de carga.
Tipo 6		Cónica y dividida Se presenta en especímenes que presentan una cara de aplicación de carga convexa y deficiencias del material de refrendado o rugosidades del plano de refrendado.
Tipo 7		Cónica y transversal Se presenta cuando las caras de aplicación de carga del espécimen están ligeramente fuera de las tolerancias de paralelismo establecidas o por ligeras desviaciones en el centrado del espécimen con respecto al eje de carga de la máquina.

Fuente: Ensayo de resistencia a la tracción indirecta de cilindros normales de concreto.

Figura.6. Tipos de fracturas a tracción indirecta [17]

3. Resultados y Discusión

3.1. Ensayo a compresión

El experimento involucró realizar una prueba de compresión en un espécimen de hormigón para evaluar su resistencia. La dosificación requerida para las mezclas se determinó realizando el ensayo y especificando el porcentaje de fibra de caucho a utilizar.

Para cada batch se prepararon varias muestras cilíndricas de hormigón de tamaños específicos de acuerdo con la norma NTE INEN 1573 [16]. Al combinar los agregados gruesos, finos y fibras de caucho de acuerdo con la dosificación especificada se adicionó cemento tipo HE y agua con el aditivo “Glenium” para mejorar la trabajabilidad de la mezcla de acuerdo con la normatividad C494 [11]. Después se midió la deformación de la mezcla, la cual se ajustó dentro de los límites coherentes y aceptables según la dosificación estipulada.

Posteriormente, se procedió a verter la mezcla en moldes de plástico cilíndricos con una altura de 200 mm y 100 mm de diámetro, incorporando la mezcla en dos capas. Para homogeneizar la mezcla, se utilizó una varilla de punta circular para revolver 25 veces en un patrón uniforme y circular.

Con el objetivo de disminuir los espacios vacíos dentro del molde, se golpeó el molde con un martillo de goma quince veces alrededor del contorno del molde por cada capa. Se dejaron las muestras en un espacio adecuado evitando que sean perpetuadas para permitir el correcto fraguado del hormigón por 24 horas. Posteriormente, las probetas de hormigón fueron removidas de los moldes plásticos y colocadas en la cámara de curado durante un periodo de tiempo determinado para permitir que el hormigón alcance su resistencia máxima. Todo esto se realizó siguiendo el procedimiento de la norma NTE INEN 1576 [14], que especifica la elaboración y curado de especímenes de hormigón para ensayo. Finalmente, las probetas fueron ensayadas al 1, 3, 7 y 14 días de madurez.

En el análisis de compresión de los cilindros, se registró la carga máxima obtenida durante la prueba y se dividió por el área transversal del

cilindro. Además, la velocidad de la prueba se ajustó según las especificaciones de la norma NTE INEN 1573 [16] para prevenir cualquier alteración en los resultados. Tras los ensayos, el tipo de fractura fue identificado según las descripciones de la norma NTE INEN 1573 [16].



Figura. 7. Rotura a compresión.

Tabla 5: Diseño de mezcla a compresión a los 7 y 14 días de 24 MPa.

Mezcla	Resistencia a compresión f'_c (MPa)	
	7 días	14 días
H.Trad.	22.48	28.85
Hca 0.50%	21.44	26.96
Hca 0.75%	20.56	25.77
Hca 1.00%	19.09	24.35
Hca 1.25%	18.34	24.33

La información que muestra la tabla 5 corresponde a los valores de resistencia a la compresión a los 7 y 14 días de edad, tanto del hormigón tradicional, así como de las distintas mezclas de hormigón que incluyen fibras de caucho.

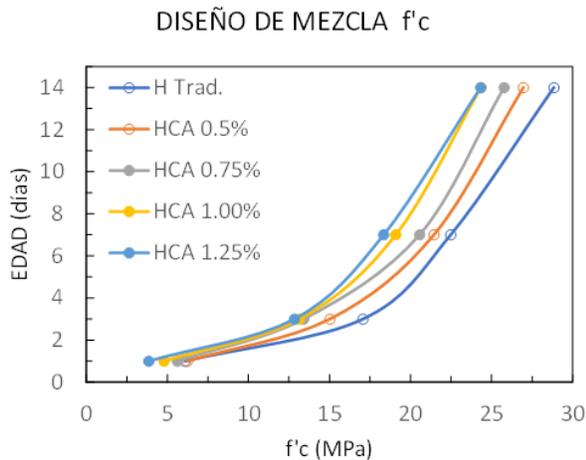


Fig. 9. Rotura a compresión.

3.2. Ensayo a tracción

Los cilindros para el ensayo a tracción del hormigón se elaboraron de la misma forma que los especímenes para compresión. Se mezclaron los componentes para crear un hormigón tradicional y también con distintos porcentajes de caucho reciclado (0.50%, 0.75%, 1.00% y 1.25%), siguiendo el siguiente orden: 1. Agregado fino, 2. Agregado grueso y 4. Porcentaje de caucho reciclado y 4. Cemento. Para obtener una mezcla homogénea y fácil de moldear, se mezcló previamente la cantidad de agua con aditivo Master Glenium. Se crearon cilindros de hormigón con un diámetro de 100 m y una altura 200m, los cuales deben compactarse adecuadamente para que el caucho se distribuya uniformemente en el hormigón.

Una vez que los especímenes han completado el proceso de curado por los días establecidos de 7 y 14 días, es necesario realizar los ensayos de tracción indirecta. Este tipo de ensayo implica la evaluación de un cilindro de hormigón con una carga axial uniforme en una prensa, a lo largo de la longitud del cilindro en una dirección perpendicular al eje. La carga axial debe aplicarse gradual y constantemente hasta que el cilindro se fracture.

Es importante registrar la cantidad máxima de carga que se aplica antes de que el cilindro se fracture durante el ensayo. Luego, se realiza el cálculo de la resistencia a la tracción indirecta

para cada porcentaje de caucho reciclado del material, siguiendo lo establecido en la norma NTE INEN 2648 [18].



Figura. 10. Rotura a tracción 1.25% de fibras de caucho



Figura. 11. Rotura a tracción de cilindro de hormigón

Al observar las fig. 10 y la fig. 11, fue evidente notar que las muestras que contienen una mayor proporción de fibras de caucho a 1.25% no sufrieron una fractura completa en comparación con los cilindros de hormigón tradicional. La propagación de las grietas fue rápida y no se requirió un aumento en la carga para ello, lo que indica que el hormigón es frágil y tiene una baja capacidad de resistencia a la tensión.

Las siguientes tablas presentan los resultados del diseño de la mezcla con una resistencia de 24 MPa., con variación mínimo en comparación al hormigón de caucho. Existieron cilindros de poco porcentaje y por tal motivo no existió marcada diferencia al momento de realizar los 10 batch. Para tener resultados más exactos es necesario la elaboración de la desviación estándar como lo indica la norma NTE INEN 1576 [14].

Tabla 6: Diseño de mezcla a tracción a los 7 y 14 días de 24 MPa.

Resistencia a tracción indirecta f_t' (MPa)		
Mezcla	7 días	14 días
H.Trad.	2.965	3.880
Hca 0.50%	2.932	3.851
Hca 0.75%	2.867	3.628
Hca 1.00%	2.739	3.016
Hca 1.25%	2.630	2.954

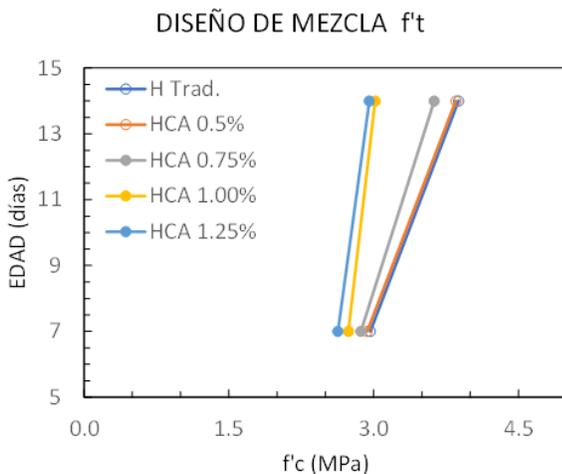


Figura. 12. Rotura a tracción

4. Conclusiones

La evaluación de los agregados utilizados en este proyecto fue exitosa, lo que garantizó la calidad del hormigón producido y el cumplimiento de los requisitos especificados por las normas ASTM e INEN, que incluyen la determinación del tamaño máximo, la graduación y la limpieza de los agregados, entre otros factores.

Después de realizar los ensayos de resistencia a la compresión, se observó que la gran mayoría de las muestras ensayadas correspondían a los tipos 2 y 5, que son los tipos de falla más frecuentes por circunstancias en las que las muestras son ensayadas a una edad temprana. La norma NTE INEN 1573[16] establece que la falla tipo 2 describe a un cono bien formado en un extremo y grietas verticales que extienden por la cabeza, mientras que la falla tipo 5 describe fracturas a los lados en el extremo superior o en

el fondo que se ven con frecuencia cuando se ensayan con neoprenos.

De acuerdo con la tabla 5, los ensayos de resistencia a la compresión a los 7 días muestran que los resultados superaron el 75%, mientras que a los 14 días superaron el 100% de los objetivos del proyecto. Esto se debió a que la sustitución del agregado fino por las fibras de caucho en las diferentes mezclas de hormigón fue del 0.50% hasta el 1.25%, adicional a esto gracias a la ayuda del cemento Chimborazo tipo HE que entre uno de sus beneficios ofrece altas resistencias iniciales y finales.

De la misma manera según los resultados de tabla 6, los ensayos de resistencia a la tracción indirecta a los 7 días muestran que los resultados superaron el 75%, mientras que a los 14 días superaron el 100% de los objetivos del proyecto. Esto se debió a que la sustitución del agregado fino por las fibras de caucho en las diferentes mezclas de hormigón fue del 0.50% hasta el 1.25%, adicional a esto gracias a la ayuda del cemento Chimborazo tipo HE que entre uno de sus beneficios ofrece altas resistencias iniciales y finales.

En la tabla 6 se puede observar que los ensayos de resistencia a la tracción indirecta a los 7 días alcanzaron los 2,96 MPa para el hormigón convencional y valores de 2,93 MPa hasta 2,63 MPa en las diferentes mezclas de hormigón que contenían caucho reciclado. Después de 14 días, se pudo notar que la resistencia del hormigón convencional se elevó a 3,88 MPa mientras que las mezclas de hormigón con fibras de caucho llegaron a valores de 3,85 MPa hasta 2,95 MPa, lo que representa solo un 13,45% en comparación con la prueba de resistencia a la tracción directa en el hormigón convencional y un 12,14% en el hormigón con fibras de caucho reciclado.

Al comparar el hormigón convencional con el hormigón con fibras de caucho, se observan diferencias mínimas en la resistencia, ya que la cantidad de caucho en la mezcla es casi imperceptible y solo se notan cambios significativos en las muestras que contienen un 1,25% de fibras de caucho.

Referencias

- [1] P. Bastidas y M. Viñán, “Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón elaborado con partículas de caucho de neumáticos reciclados” Proyecto de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. Sep. 2017 Disponible: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14667>.
- [2] P. Seguí, “El hormigón: el material más destructivo de la tierra” [online]. España: OVACEN, 2019 Disponible: <https://ovacen.com/hormigon-material-destructivo-tierra/>.
- [3] NTE INEN 861, Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas mayores a 19 mm mediante el uso de la máquina de los ángeles., Quito, 2011 Disponible: <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/ensayo-de-materiales/861-normas-nte-inen-861-para-los-ensayos-respectivos-de-los-agregados-gruesos-y/31180408>.
- [4] NTE INEN 2380, Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos., Quito, 2011 Disponible: <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/ensayo-de-materiales/nte-inen-2380-requisitos-de-desempeno-para-cementos/23206067>.
- [5] ASTM C150, Standard Specification for Portland Cement, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, 2009 Disponible: <https://es.slideshare.net/LuisCM3/astm-c150>.
- [6] Steven H. Kosmatika, B. Kerkhoff, William C. Panarese y J. Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, 1ra ed., Illinois: Portland Cement Association, 2004.
- [7] NTE INEN 696, Áridos. Análisis granulométrico en los áridos fino y grueso, Quito, 2011 Disponible: <https://ia902909.us.archive.org/25/items/ec.n.te.0696.2011/ec.n.te.0696.2011.pdf>.
- [8] ASTM C33/C33M, Standard Specification for Concrete Aggregates, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, 2018 Disponible: <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-de-el-salvador/ingenieria-de-materiales/astm-c33-03-espanol-normativa-astm-c33-de-concreto/34021568>.
- [9] NTE INEN 855, Árido. Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón, Quito, 2010 Disponible: <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-estatal-peninsula-de-santa-elena/ingenieria-economica/normas-inen-855-para-los-ensayos-respectivos-de-los-agregados-gruesos-y/31180405>.
- [10] NTE INEN 872, Áridos para hormigón. Requisitos, Quito, 2011 Disponible: <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-estatal-peninsula-de-santa-elena/ingenieria-economica/normas-inen-872-535667/6343647>.
- [11] ASTM C 494, Standard specification for chemical admixtures for concrete, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, 2004 Disponible: https://www.astm.org/c0494_c0494m-19e01.html.
- [12] NTE INEN 3124, Hormigón. Elaboración y curado de especímenes de ensayo en laboratorio, Quito, 2017 Disponible: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas23/nte_inen_3124.pdf.
- [13] NTE INEN 1763, Hormigón de cemento hidráulico. Muestreo., Quito, 2010 Disponible: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas23/1576.pdf>.
- [14] NTE INEN 1576, Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo., Quito, 2011 Disponible: <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-estatal-peninsula-de-santa-elena/ingenieria-economica/normas-inen-1576-para-los-ensayos-respectivos-de-los-agregados-gruesos-y/31180405>.

versidad-de-cuenca/hormigon-2/n-te-inen-1576-elaboracion-y-curado-para-especimenes/7844434.

- [15] NTE INEN 2528, Cámaras de curado, gabinetes húmedos, tanques para almacenamiento en agua y cuartos para elaborar mezclas, utilizados en ensayos de cemento hidráulico y hormigón. Requisito, Quito, 2010 Disponible: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas23/2528.pdf>.
- [16] INEN 1573, Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico, Quito, 2010 Disponible: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas23/1573.pdf>.
- [17] Y. Gutierrez, C. Reyes, Y. Rodriguez y D. Martinez, “Ensayo de tracción indirecta (método brasileño)”, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, 2015 Disponible: <https://es.scribd.com/document/360903081/Traccion-Indirecta-a-Concretos>.
- [18] NTE INEN 2648, Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral de especímenes cilíndricos de hormigón., Quito, 2013 Disponible: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas23/2648.pdf>.