



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i5.2283>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de investigación

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

Comparative study on the mechanical behavior of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) fiber and concrete with steel fiber

Estudo comparativo do comportamento mecânico do concreto com fibra reciclada de tereftalato de polietileno (PET) e do concreto com fibra de aço

Linda Alexandra Cobos-Sáenz de Viteri ^I

lindaacoboss@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9264-2753>

Alexis Wladimir Valle-Benítez ^{II}

avalleb@ulvr.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-9274-3738>

Correspondencia: lindaacoboss@gmail.com

***Recibido:** 25 de julio 2021 ***Aceptado:** 06 de septiembre de 2021 *** Publicado:** 20 de septiembre de 2021

- I. Egresada Ingeniera civil de la Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil e investigadora independiente.
- II. Ingeniero Civil, Magíster en Sistemas Integrados de Gestión, Docente Investigador, Catedrático en la Universidad Laica Vicente Rocafuerte en Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

Resumen

El objetivo general de la investigación se concentra en presentar un estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero, para la obtención de una ficha comparativa que mejore los procesos constructivos. Debido a que la investigación nace de un apartado ambiental que involucra darles un segundo uso a envases PET, por su responsabilidad en el daño medioambiental y teniendo en consideración que la industria de la construcción es conocida como una de las más contaminantes en el mundo, el estudio de opciones que permitan minimizar impactos ambientales y mejoren el desempeño del concreto es importante. El estudio comprende un enfoque cuantitativo, con diseño de investigación descriptiva por tratarse de una comparación, y experimental debido a los distintos ensayos realizados a especímenes de hormigón que permiten obtener información experimental sobre el concreto con fibras de PET reciclado y concreto con fibras de acero. Asimismo, es de nivel explicativo, ya que al manipular las variables de resistencia a la compresión y tracción indirecta del hormigón reforzado con fibras, como estudio empírico para medir los efectos en los resultados obtenidos en laboratorio, permiten conocer el comportamiento mecánico del concreto. Los resultados de la investigación revelan distintos niveles de mejora frente al hormigón tradicional según la fibra y el porcentaje añadido.

Palabras clave: Concreto; fibra; polietileno; tereftalato; acero; resistencia.

Abstract

The general objective of the research is focused on presenting a comparative study on the mechanical behavior of concrete with recycled polyethylene terephthalate fiber (PET) and concrete with steel fiber, in order to obtain a comparative sheet that improves construction processes. Because the investigation arises from an environmental section that involves giving a second use to PET containers, due to its responsibility in environmental damage and taking into consideration that the construction industry is known as one of the most polluting in the world, the Study of options that minimize environmental impacts and improve concrete performance is important. The study comprises a quantitative approach, with a descriptive research design because it is a comparison, and an experimental one due to the different tests carried out on concrete specimens that allow obtaining experimental information on concrete with recycled PET fibers and concrete with steel fibers.

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

Likewise, it is explanatory, since by manipulating the variables of resistance to compression and indirect traction of fiber-reinforced concrete, as an empirical study to measure the effects on the results obtained in the laboratory, they allow to know the mechanical behavior of concrete. The results of the research reveal different levels of improvement compared to traditional concrete depending on the fiber and the percentage added.

Keywords: Concrete; fiber; polyethylene; terephthalate; steel; endurance.

Resumo

O objetivo geral da pesquisa é apresentar um estudo comparativo sobre o comportamento mecânico do concreto com fibra reciclada de polietileno tereftalato (PET) e do concreto com fibra de aço, a fim de obter uma lâmina comparativa que melhore os processos construtivos. Porque a investigação decorre de um setor ambiental que envolve dar uma segunda utilização aos contentores PET, devido à sua responsabilidade nos danos ambientais e tendo em consideração que a indústria da construção é reconhecida como uma das mais poluentes do mundo, o Estudo de opções que minimizar os impactos ambientais e melhorar o desempenho do concreto é importante. O estudo compreende uma abordagem quantitativa, com um desenho de pesquisa descritivo por se tratar de uma comparação, e experimental devido aos diferentes ensaios realizados em corpos de prova de concreto que permitem a obtenção de informações experimentais em concreto com fibras PET recicladas e concreto com fibras de aço. Da mesma forma, é explicativo, pois ao manipular as variáveis de resistência à compressão e tração indireta do concreto reforçado com fibras, como estudo empírico para medir os efeitos nos resultados obtidos em laboratório, permitem conhecer o comportamento mecânico do concreto. Os resultados da pesquisa revelam diferentes níveis de melhoria em relação ao concreto tradicional, dependendo da fibra e da porcentagem adicionada.

Palavras-chave: Concreto; fibra; polietileno; tereftalato; aço; resistência.

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

Introducción

En la industria de la construcción el hormigón es el material con mayor uso debido a sus propiedades físicas y mecánicas, sin embargo, dentro de estas últimas su resistencia a la flexión, la presencia de fisuras siempre ha representado un problema, es por esto que el reforzamiento del hormigón es algo sumamente necesario para distintas construcciones civiles. Para su refuerzo es universal hacer uso del acero en varillas, mallas y fibras, sin embargo, en Ecuador el uso de fibras de acero para reforzar el hormigón no es algo común, es por esto que este estudio a más de ahondar en el rendimiento que adquiere el hormigón luego de ser reforzado con dichas fibras, se realiza un estudio sobre los resultados obtenidos con fibras de polietileno tereftalato (PET), especialmente de envases, ya que representan una preocupante cantidad de desechos a nivel mundial, donde una forma de mitigar su impacto ambiental se encuentra en el aprovechamiento de su aplicabilidad en una matriz de hormigón. La forma en la que se desarrolla la investigación es fundamentado en metodologías, métodos y tipos de investigación como descriptiva, explicativa, bibliográfica, comparativa y experimental, haciendo uso de resultados de laboratorio para la realización de un análisis sobre el comportamiento del hormigón con adición de fibras de PET reciclado y fibras de acero, haciendo referencia al estudio que ha recibido el hormigón con adición con fibras recicladas de PET y fibras de acero con distintos métodos para los diseños de hormigones, diferentes porcentajes de fibras añadidas.

El hormigón es un elemento del que se ha realizado múltiples estudios ya que es uno de los más utilizados en el mundo de la construcción, con el fin de ampliar el conocimiento sobre la tecnología del hormigón, existen investigaciones respecto al concreto reforzado con fibras. Sin embargo, pese a sus favorables resultados en el mejoramiento de sus propiedades, su aplicación en el país es escasa, debido a la falta de puesta en práctica de nuevas técnicas y conocimiento de opciones ecológicas que tengan la misma utilidad con mayores beneficios; por lo que se aborda este problema sintetizando los resultados por medio de ficha comparativa entre fibras de PET reciclado y fibras de acero, y así llegar a constructores y permitir un punto de partida para futuras investigaciones referente al comportamiento del hormigón con adición de fibras.

Por tanto, el objetivo general que persigue la investigación es: presentar un estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero, dando respuesta a la problemática sobre: ¿cuáles son las diferencias sobre

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero?

En este contexto, el estudio se plantea en la línea de investigación de la Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil (2020), sobre: Urbanismo y ordenamiento territorial aplicando tecnología de construcción eco-amigable, industria y desarrollo de energías

Renovables, de la Facultad de Ingeniería Industrial y Construcción (FIIC) de Materiales de construcción y sub-línea sobre: Materiales innovadores en la construcción.

Por tanto, se justifica la investigación dado que se agregan materiales tradicionales para la fabricación de hormigón, cumpliendo con uno de los objetivos del Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021, relacionado con: el impulso a la productividad y competitividad, y garantizando los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones, al hacer uso de las fibras de PET reciclado como reemplazo de fibras de acero, e incluso el armado tradicional de varillas de acero en conjunto con el hormigón.

Desarrollo

Como fundamento teórico para reforzar la investigación, se toma en consideración puntos importantes, tales como: concreto e importancia, componentes del hormigón, fibras de acero, fibras de PET reciclado y concreto reforzado con fibras.

Concreto e Importancia

El concreto es el resultado de la unión de cemento, agua, grava y arena, también puede incluir aditivos. El concreto u hormigón es una mezcla, apenas el 15% de este es el cemento, en relación a su volumen, no obstante, su presencia es importante, según Holcim.

Respecto a los aditivos, estos poseen diferentes funciones entre ellas permitir que el agua que se agregue a la mezcla sea menor que la que normalmente se necesite, también mejora la resistencia y aumenta la trabajabilidad de la misma. (Sarta y Silva, 2017).

En la actualidad, el hormigón es el material más utilizado en el país. Su calidad final depende de la calidad de sus componentes y del profesionalismo del ingeniero encargado, su puesta en obra, el control de calidad. (Rivva, 2000). Radica allí la importancia del estudio de sus materiales, su manejo, y su mantenimiento (Carrillo y Rojas, 2017).

Componentes del hormigón

Para elaborar la mezcla se requiere de: cemento, agua y agregados (finos y gruesos).

Cemento

Es producido por la pulverización del Clinker, que está compuesto por silicatos de calcio hidráulico, conteniendo varias formas de sulfato de calcio. Tiene algunos elementos mineralógicos y otros secundarios, según la NTP 334.009 (Carrillo y Rojas, 2017). En la figura 1, se muestran los tipos de cemento según la NTE.

Figura 1: Tipos de cemento de acuerdo a la NTE

4.1 Esta norma cubre ocho tipos de cemento portland, enumerados a continuación (ver nota 2)

4.1.1 Tipo I. Para usarse cuando no se requieren las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo.

4.1.2 Tipo IA. Cemento con incorporador de aire para los mismos usos del Tipo I, donde se desea incorporación de aire.

4.1.3 Tipo II. Para uso general, especialmente cuando se desea una moderada resistencia a los sulfatos o moderado calor de hidratación.

4.1.4 Tipo IIA. Cemento con incorporador de aire para los mismos usos del Tipo II, donde se desea incorporación de aire.

4.15 Tipo III. Para usarse cuando se desea alta resistencia inicial o temprana.

4.16 Tipo IIIA. Cemento con incorporador de aire para el mismo uso que el Tipo III, donde se desea incorporación de aire.

4.1.7 Tipo IV. Para usarse cuando se desea bajo calor de hidratación.

4.1.8 Tipo V. Para usarse cuando se desea alta resistencia a la acción de los sulfatos.

Nota: La figura muestra los ocho tipos de cemento de acuerdo a la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE). Fuente: Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), NTE, 2010.

Agua

Este elemento para ser utilizado en el hormigón no debe de contener impurezas y limpia para poder ser empleada en la mezcla del hormigón y su reacción sea favorable. Su uso y manipulación a la hora de ser usada en el concreto debe usarse en las proporciones correctas para que este pueda llegar a su resistencia máxima (Cristhian y Zavala, 2020).

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

El agua representa entre 10% y 25% del volumen del concreto al ser mezclado. Cualquier sustancia dañina que posea el agua al momento de la mezcla influirá negativamente en las propiedades del producto final. Muchas veces el que el agua sea potable no basta, debe cumplir con requisitos de calidad ya que podría incluir citratos o incluso azúcares que no son aptas para la elaboración del hormigón sin embargo no compromete su potabilidad, (Corcino, 2007).

Agregados

Los agregados representan desde el 65% al 80% del volumen total del concreto según (Rivva, 2000), son unas partículas de un material estudiado, el cual debe cumplir una serie de ensayos para conocer su comportamiento y el que obtendrá junto con la pasta de cemento con agua. El agregado influye sobre las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. Su origen puede ser de rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas (Carrillo y Rojas, 2017). Para la elaboración del hormigón es necesario cumplir con la norma NTE INEN 872, según los requisitos para áridos.

- Agregado fino. Es el material que se denomina Arena y sus partículas en su mayoría pasan el tamiz #4 (4.75mm) y se retienen por el tamiz #200 (75 μ m), (Silva, 2014).
- Agregado grueso. También conocido con el nombre de Ripio y este material es retenido mayoritariamente por el tamiz #4 (4.75mm) (Silva, 2014).

Fibras de acero

Una opción a la hora de reforzar el hormigón siempre serán las fibras de acero debido a su capacidad de mejora al comportamiento estructural del hormigón armado elaborado tradicionalmente. La distribución homogénea y distribución de las fibras en la mezcla del concreto permite la reducción de la fragilidad presente en el concreto, dando paso a la mejora de sus propiedades mecánicas.

La forma en la que las fibras se distribuyen en la matriz de hormigón tiene mucha influencia, ya que cuando esta tiene una sola dirección y es paralela al esfuerzo de tracción que se le aplica es cuando se obtiene una mejora máxima y tiene menor impacto cuando estas son orientadas al azar y en las tres dimensiones. Sus formas más comunes son las que presentan ondulación y ganchos, elaboradas con acero inoxidable. (Corcino, 2007)

Fibras de PET reciclado

El PET en forma de fibra, añadido a la matriz de hormigón posee beneficios desde su origen reciclado que comprende un bajo costo y un beneficio para el medio ambiente, dando un segundo uso a materiales de desecho también es conocido por su alto rendimiento al ser adicionado al concreto.

En la investigación se elabora de forma semejante a las fibras comerciales. El PET luego de su utilización es mayoritariamente utilizado para producir piezas automóbiles. En el reciclaje, al disminuir los residuos, se utiliza tan solo 30% de la energía que se exige para producir resina virgen. Los componentes con refuerza de fibra de polímeros se caracterizan por fácil fabricación, bajo costo y superiores propiedades mecánicas. (Baldebro, 2015).

Dentro de sus propiedades mecánicas se encuentra su alta resistencia al desgaste debido a su estructura cristalina, esta aumenta la rigidez mucho más de la que resulta por simple orientación molecular, permite estabilidad dimensional del mismo incluso luego del procesamiento. (Guamán y Pinenla, 2019).

Concreto reforzado con fibras

Su implementación dentro del concreto tiene como objetivo que se forme un material tan diverso que puede ser considerado diferente por su esqueleto lítico que es disperso en la pasta de cemento en conjunto con el agente que refuerza siendo este un material fibroso de distinta constitución. (Macafferri, 2007, p. 9).

De igual manera dotar al concreto con fibras con una adecuada resistencia a la tracción, homogéneamente distribuida dentro del concreto, hace que constituya una micro-armadura la cual muestra una extremada eficacia al contrarrestar el fenómeno de figuración por retracción y a la par brinda al concreto una ductilidad que puede llegar a ser considerada en la medida que la resistencia y la cantidad de las fibras sea elevado, confiriendo así al concreto una gran tenacidad. (Macafferri, 2007, p. 9). Se conoce que muchas veces no se considera la resistencia a la tracción en los códigos de diseño puesto a que es de comportamiento frágil, sin embargo, al presentarse una mezcla fibroreforzada la tracción incrementa considerable para fines de diseño. Con ensayos sobre vigas se efectúa esta evaluación a lo largo del desarrollo de la presente investigación. (Carrillo y Rojas, 2017).

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

Materiales y métodos

El enfoque del presente estudio es de tipo cuantitativo, debido a que se fundamenta en el análisis de datos que se obtienen a partir de ensayos de los diversos materiales para determinar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero y su influencia en las propiedades mecánicas (Silva, 2014).

Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), la investigación es experimental y descriptiva, debido a que se recopila la información de estos dos tipos de fibra y se realizan ensayos de dichos agregados para elaborar ficha comparativa. El trabajo contiene cuatro importantes pasos a seguir, los cuales son:

- Recolectar la información proveniente de investigaciones realizadas por distintos autores respecto al hormigón fibro-reforzado con fibras PET recicladas y fibras de acero para acceder a datos relacionados con el comportamiento mecánico del mismo.
- Obtención de resultados experimentales mediante ensayos de laboratorio que amplíen la información recopilada, sometiendo así a los especímenes de hormigón a condiciones similares para obtener comparaciones fieles del comportamiento de este bajo los dos tipos de fibras.
- Análisis y evaluación de datos hallados.
- Elaboración de una ficha comparativa, sintetizando la información obtenida durante el desarrollo de la investigación.

El nivel del estudio es descriptivo comparativo, considerando que el tema de reforzar al hormigón con fibras dispersas de acero y PET reciclado, utilizando los agregados de nuestro medio ha sido poco analizado, pero que con el sustento técnico de los ensayos que se realizaran se logrará determinar la influencia que tendrá sobre las propiedades mecánicas del hormigón.

Es descriptivo, porque además de tener conocimiento acerca de la calidad de los diferentes agregados propios utilizados para la fabricación de concreto, se contará con una amplia información acerca del comportamiento que tendrá el hormigón al incorporar en su preparación diferentes porcentajes de fibra de acero y fibras de PET reciclado (Silva, 2014). Es fundamental conocer el estado y condiciones reales del tema a tratar, es por ello que se hace uso de la investigación de tipo descriptiva que permite vincularse con la investigación de tipo analítica con el objetivo de permitir comprensión y aclaración a profundidad sobre el comportamiento mecánico del hormigón.

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

Según el diseño para responder al problema planteado es de una investigación documental, ya que será un proceso basado el análisis de datos que se obtendrán a partir de ensayos de los diversos materiales, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. Asimismo, la investigación es desarrollada bajo los lineamientos de una investigación experimental, elaborando especímenes de hormigón cilíndricos, así como vigas con la adición de fibras de acero y fibras de PET, para conocer las características mecánicas del hormigón con la finalidad de elaborar una ficha comparativa como propuesta.

Las técnicas utilizadas en la presente investigación tienen como objeto recopilar información para su posterior análisis mediante los instrumentos que se ajusten al estudio. Los ensayos son realizados bajo los lineamientos de la norma ASTM (American Society for Testing and Materials), como el: ensayo al hormigón de resistencia a la compresión ASTM C39 y el ensayo al hormigón de resistencia a la tracción indirecta ASTM C496. Los instrumentos con los que se realizarán las mencionadas técnicas de recolección de datos son: los equipos del laboratorio como la prensa para rotura de cilindros, balanzas, horno y tamices que permitan la realización de los ensayos como recolección de datos experimentales.

Haciendo uso de la información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) en el 2018, los resultados de la Encuesta Nacional de Edificaciones (ENED) dan a conocer la variable: permisos de construcción. Por lo que, se identifica como población a las empresas y al grupo de profesionales que se dedican a la construcción, focalizando los permisos de construcción generados en el cantón Guayaquil en dicha fecha. Así, la población corresponde a 5.233 permisos en edificaciones y la muestra se tomó con un nivel de confianza de 95%, una desviación estándar de 1,96 y un error de 5%, dando como resultado 358 permisos.

Análisis y discusión de los resultados

Como aporte al conocimiento sobre la tecnología del hormigón, teniendo como antecedente datos de los trabajos previos realizados por investigadores sobre las fibras de PET reciclado y de acero, en este capítulo se plasma los pasos realizados para conseguir los datos experimentales, sometiendo el hormigón tradicional, hormigón con fibras de acero y hormigón con fibras de PET reciclado a las mismas condiciones para así lograr tener una justa comparación para finalizar la propuesta con una ficha comparativa que permita conocer el comportamiento del hormigón de manera sintetizada.

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

Para la realización de los ensayos de laboratorio, fundamentales para la obtención de datos experimentales, se parte de la caracterización de los agregados puesto que, el hormigón, siendo un material compuesto, influyen los tipos de componentes añadidos a la mezcla en sus diversas características.

Se inicia con la caracterización de los agregados del hormigón, es por esto por lo que mediante un ensayo granulométrico realizado en el laboratorio: Ing. Arnoldo Rufilli, de la Universidad de Guayaquil, donde también se realizaron los ensayos de resistencia a la compresión normalizado de especímenes cilíndricos de hormigón bajo la norma ASTM C39 y ensayos para resistencia a la tracción indirecta bajo la norma ASTM C496.

Se inicia con los ensayos del agregado fino y agregado grueso utilizados para la realización de los especímenes de hormigón para determinar sus características físicas y mecánicas.

Por otro lado, para la selección de la fibra de acero, se conoce que según la ACI 544 1R-96 la capacidad que posee el filamento de adherirse con el hormigón está sujeto a la relación de esbeltez, ya que, mientras sea mayor se consigue mejor adherencia de las fibras al concreto. Dentro de estos se tiene conocimiento de los valores más usados dentro del acero que se encuentran de 20 a 100, mientras que la longitud de las fibras está comprendida entre 0.25 y 3 pulgadas (6.4 mm – 76 mm), (Silva, 2014).

Es importante conocer que para seleccionar la longitud de los filamentos se aconseja comprender mínimo el doble del árido mayor en tamaño, la longitud de esta debe ser la necesaria para proveer de la adherencia justa para la matriz de hormigón y así evitar arrancamientos, es por esto por lo que normalmente utilizar longitudes de 2,5 a 3 veces el tamaño del árido.

En cuanto a la elaboración con fibras de PET reciclado, se considera que para su obtención el primer paso es recolectar una buena cantidad de botellas de PET reciclado, envases sin superficie corrugada del cuerpo de la botella para obtener las fibras de forma eficiente. Luego de adquirir los envases se retiran las etiquetas (figura 2). Se procede a cortar las bases de las botellas para obtener el cuerpo de esta, luego se las pasó por un cortador artesanal que permite obtener cuerdas del cuerpo de la botella de 7mm para cortar secciones de 40mm con espesor constante. Una vez realizado esto, se procede a lavarlas en agua para retirar impurezas orgánicas. Para las dimensiones de la fibra de plástico se consideró el estudio de Shamskia (2012), donde concluye que las fibras con 40mm obtienen la mejor

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

estabilidad en el concreto fresco y las fibras largas conducen a un hormigón inestable en estado fresco (figura 3).

Figura 2
 Plástico PET reciclado sin etiqueta



Nota: Material PET previamente seleccionada.

Fuente: Cobos Sáenz (2021)

Figura 3
 Plástico PET



Nota: Material PET cortado en secciones.

Fuente: Cobos Sáenz (2021)

El peso específico del PET, afirma Guamán y Pinenla (2019), se muestran en la figura 4 luego de ser ensayadas con gasolina, debido a que con el agua no se pueden utilizar, por tratarse de fibras PET, se obtuvo 1.342gr/cm³.

Figura 4: Tabla sobre el ensayo de peso para fibras de PET

Fibras PET			
Peso Específico			
Descripción	Ensayo N° 1	Ensayo N° 2	Ensayo N° 3
Masa del recipiente + fibras recicladas PET	440.1	450.5	708.7
Masa del recipiente (gr)	289.9	289.9	289.9
Masa de las fibras recicladas (gr)	150.2	160.6	418.8
Masa canastilla sumergida en gasolina (gr)	718.2	718.2	718.2
Masa canastilla + fibras sumergida en gasolina	786.5	789.5	905.5
Masa de las fibras recicladas PET en gasolina	68.3	71.3	187.3
Volumen desalojado (gr)	110.676	120.676	312.838
Peso específico (gr/cm ³)	1.357	1.331	1.339
Peso específico promedio (gr/cm ³)	1.342		

Nota: Se describe una tabla que se realizó en un estudio de análisis de las propiedades físico-mecánicas de un hormigón elaborado con fibras recicladas de envases PET, con y sin aditivo plastificante. Fuente: Guamán y Pinenla (2019).

En cuanto a la mezcla de hormigón, se requiere cumplir principios de ingeniería civil como la resistencia, seguridad y durabilidad, es por ello por lo que es necesario seguir el diseño de mezcla de

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

hormigón. Se debe escoger los elementos que conforman la matriz de hormigón, de acuerdo con sus características y propiedades que sean acorde al diseño especificado. Para la resistencia que se elabora en la presente investigación es de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, con dosificación de 1:2:3.

Para la selección de porcentajes óptimos de fibras para especímenes de hormigón, en los porcentajes de fibra de PET a analizar se considera el estudio de Shamskia (2012), donde se evidencia que la mayor resistencia a la compresión que se obtuvo fue con la adición de 0.5%.

Respecto a las fibras de acero, según Silva (2014), el porcentaje óptimo de adición de estas fibras de acero para la resistencia a compresión es de 0.62%, estos dos porcentajes de fibras se hallan dentro de la norma ACI 544.1R-32 (Report on Fiber Reinforced Concrete), lo que significa que se encuentra de acuerdo con las delimitaciones establecidas para la misma. Con base a la bibliografía mencionada se seleccionan porcentajes de 0.5% y 1% reemplazando parcialmente el agregado grueso.

Para la selección de fibras de acero, en el estudio experimental se utilizan grapas de 25 x 3,80mm de acero para alambre de púas, tal como se muestra en la figura 5, para reforzamiento de hormigón al ser estas de forma similar a las fibras de acero comerciales y con dimensiones análogas a las de las fibras elaboradas de PET reciclado.

Figura 5: Grapas de acero



Nota: Grapas previamente seleccionadas. Fuente: Cobos Sáenz (2021)

En relación a la elaboración de especímenes cilíndricos de concreto y luego de establecer su dosificación se elaboran los cilindros de hormigón con las mezclas establecidas donde se realiza un muestreo con los porcentajes 0.5% y 1% de fibras de acero y de PET, para posteriormente proceder a realizar las roturas de estos en los días 7, 14 y 28 en un total de 35 cilindros con moldes de 10x20cm.

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

Se utilizan moldes bajo las normas NTE INEN 1576 y la norma internacional ASTM C31, con dimensiones de 100 mm x 200 mm, donde fue vertido hormigón con fibras de acero en porcentajes de 0.5% y 1% así mismo hormigón con fibras de PET reciclado con porcentajes de 0.5% y 1% y por último un hormigón sin fibras de acero añadidas.

Dentro del proceso se procede a obtener los datos de asentamiento, regido bajo la norma INEN 1578 para la determinación del revenimiento, la cual consta de colocar la muestra de hormigón recién mezclado dentro de un molde de cono trocado y compactar con varilla en tres capas. Luego se levanta el molde dejando así que la mezcla de hormigón se asiente. Por último, se mide la distancia entre la superficie de este, con la que obtuvo la mezcla originalmente, este desplazamiento se conoce como el revenimiento del hormigón (figura 6).

Figura 6: Mezcla en el molde de cono trocado



Nota: Mezcla reciente de hormigón en el cono trocado. Fuente: Cobos Sáenz (2021)

El promedio de los resultados obtenidos del ensayo de los diferentes diseños se presenta en la tabla 1, a saber.

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

Tabla 1: Resultados de asentamientos de los hormigones

Tipo de hormigón $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$	Asentamiento (cm)
Hormigón convencional sin fibras	5
Hormigón con fibras de PET reciclado 0.5%	2.5
Hormigón con fibras de PET reciclado 1%	1.5
Hormigón con fibras de acero 0.5%	2
Hormigón con fibras de acero 1%	1.5

Nota: Resultados con diferentes fibras en diferentes porcentajes. Fuente: Cobos Sáenz (2021)

El revenimiento o asentamiento tiene relación con la trabajabilidad de la mezcla de hormigón, lo que significa la facilidad y homogeneidad con la que se coloca el concreto en una estructura, sin vacíos, fácil de cubrir la armadura y de fácil compactación.

El proceso de elaboración de los especímenes cilíndricos inicia con el llenado de concreto fresco previamente elaborado y posteriormente compactar en capas con 25 golpes con la varilla de compactación de diámetro 10 + 2 mm. Luego, se procede a golpear ligeramente con el mazo de goma para eliminar burbujas de aire de la mezcla y se termina enrasando con la varilla de 3/8". Después de su fraguado, se desencofran los cilindros para situarlos en la cámara de curado en agua potable que obedece a la norma NTE INEN 2528 y la norma internacional ASTM C 511. El revenimiento o asentamiento tiene relación con la trabajabilidad de la mezcla de hormigón, lo que significa la facilidad y homogeneidad con la que se coloca el concreto en una estructura, sin vacíos, fácil de cubrir la armadura y de fácil compactación.

El proceso de elaboración de los especímenes cilíndricos inicia con el llenado de concreto fresco previamente elaborado y posteriormente compactar en capas con 25 golpes con la varilla de compactación de diámetro 10 + 2 mm. Luego, se procede a golpear ligeramente con el mazo de goma para eliminar burbujas de aire de la mezcla y se termina enrasando con la varilla de 3/8" (figura 7). Luego de su fraguado se desencofran los cilindros para situarlos en la cámara de curado en agua potable que obedece a la norma NTE INEN 2528 y la norma internacional ASTM C 511. Luego de 24 horas del hormigonado, las probetas se desmoldan con cuidado para evitar daños tanto del molde como del cilindro de hormigón, luego se procede a limpiar la superficie para escribir el tipo de hormigón para su fácil identificación. Después del proceso descrito se transportan con cuidado a la

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

cámara de curado a una temperatura de 20°C de forma que eviten el contacto entre sí (figura 8). Los especímenes se mantienen dentro hasta su utilización para el ensayo respectivo.

Figura 7

Elaboración de cilindros con fibras



Nota: Elaboración de especímenes cilíndricos.

Fuente: Cobos Sáenz (2021)

Figura 8

Curado de cilindros de hormigón



Nota: Cámara de curado en agua potable e identificación.

Fuente: Cobos Sáenz (2021)

En cuanto a la ejecución y resultados de ensayos, se tiene que, el ensayo de compresión simple de los especímenes de hormigón para conocer la resistencia del hormigón según el porcentaje y el tipo de fibra tiene como objetivo de conocer el comportamiento mecánico del hormigón según su diseño para una resistencia de 210 kg/cm².

Las roturas deben obedecer a la normativa NTE INEN1573 y la norma internacional ASTM C 39, que trata de ejercer fuerza axial sobre el espécimen de hormigón hasta que este falle. Cada uno de los cilindros tienen dimensiones de 100 mm de diámetro y con altura de 200 mm, con dosificaciones de 0.5% y 1% de fibras de PET reciclado y fibras de acero para los días 7, 14 y 28, lo que resultan 28 cilindros con fibras y 7 de hormigón tradicional.

El ensayo de tracción indirecta, también conocido como ensayo brasileño (figura 9) se realizó en la prensa hidráulica para conocer la resistencia de los hormigones reforzados con fibras, el mismo que consiste en someter los especímenes de 28 días de edad a compresión diametral generando así una carga uniforme por líneas generatrices opuestas hasta la falla de la probeta cilíndrica. Respecto al

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

ensayo a compresión simple (figura 10), la prensa hidráulica ejerce la carga axial en cada cilindro sobre el área circular de 78.54 cm² a velocidad constante de 0.25 MPa/s teniendo una curva de esfuerzo-deformación sin contar con variaciones que puedan alterar los resultados del ensayo (tabla 2).

Figura 9
 Ensayo brasileño



Nota: Prensa hidráulica para conocer la resistencia de los hormigones.

Fuente: Cobos Sáenz (2021)

Figura 10
 Ensayo de compresión simple



Nota: Prensa hidráulica donde se ejerce carga axial a los cilindros.

Fuente: Cobos Sáenz (2021)

Tabla 2: Ficha comparativa

Ficha Comparativa															
	Hormigón con fibras de PET reciclado						Hormigón con fibras de acero						Hórmigón sin fibras		
Ensayo Compresión Simple															
%	0.5%			0.1%			0.5%			0.1%					
Días	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28
Kg	8.500	9.750	12.000	6.700	7.450	9.700	12.050	14.250	18.500	11.950	13.950	16.100	11.050	14.050	17.900
Kg/cm ²	108,2	124,1	152,8	85,3	94,9	123,5	153,4	181,4	235,5	152,2	177,6	205	140,7	178,9	228
Tracción Indirecta															
Kg			8.000			7.500			6.100			8.000			9.450
Kg/cm ²			25,5			23,9			19,41			25,5			30,1

Nota: Ficha en la que se especifica los resultados del hormigón con fibras PET reciclado, el hormigón con fibras de acero y el hormigón sin fibras, todos a los 7, 14 y 28 días. Fuente: Cobos Sáenz (2021)

Como resultado, se evidencia un aumento o disminución de resistencia a la compresión no solo según el tipo de fibra, sino además por el porcentaje que se incluya en la matriz de hormigón. Un claro ejemplo de ello resulta en la adición de fibras PET con adición de 1.0% y 0.5%, donde este último porcentaje representa un aumento de 30% de resistencia a compresión en comparación con el

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

porcentaje más alto, es por ello, que la adición de fibras luego de alcanzar su porcentaje óptimo, este empieza su resistencia empieza a disminuir.

Los resultados demuestran que el hormigón que alcanza mayor resistencia es el hormigón reforzado con 0.5% de fibras de hacer, a diferencia de lo alcanzado por el concreto con el 1.0% de fibras de PET que resultó estar muy por debajo de lo esperado con un 108 kg/cm².

De los resultados mostrados se logra observar que el hormigón sin fibras obtiene la mayor resistencia a tracción indirecta seguido del hormigón con el 0.5% de fibras de PET recicladas y el hormigón con el 1.0% de fibras de acero. Siendo estos dos porcentajes y tipos de fibras con mejores resultados y no tan lejos del hormigón sin fibras, no se presenta una mejora dentro de esta propiedad.

La resistencia a tracción indirecta del hormigón está estrechamente relacionada al análisis de fisuras, torsión y evidentemente la flexión. Dentro de los estudios de distintos autores, referenciados en la presente investigación se muestra la mejora del hormigón frente a esfuerzos de flexión, torsión y tracción indirecta, donde esta última resulta ser la mayor y sin embargo dentro de los estudios obtenidos de la investigación experimental se obtiene nula mejora en este campo. Sin embargo, al tratarse resistencia a la compresión este si presenta mejora con la presencia de fibras de acero, lo que permite notar la importancia las variables a considerar en la adición de fibras al concreto como el porcentaje óptimo, forma, dimensiones y tipo de fibra.

Conclusiones

El hormigón es conocido por su buena resistencia a la compresión, no obstante, tiene falencias como su capacidad de soportar esfuerzos de torsión, flexión y tracción y es por ello que se adicionan fibras que permitan reforzarlo para estos esfuerzos y así evitar fisuras generadas por estos. Existen muchos tipos de fibras, y dentro de las más comercializadas están las de acero que comprenden un máximo control de grietas, el cual se logró evidenciar con las vinchas de acero adicionadas a la matriz de hormigón. Por otra parte, el utilizar fibras de PET parte de una necesidad con el medio ambiente de mitigar la contaminación que los desperdicios de este producen, siendo una forma para aprovechar sus buenas propiedades mecánicas, gran resistencia al desgaste y lo ligero que resulta ser.

En los resultados a compresión obtenidos mediante los ensayos de laboratorio se pudo mostrar la mejora que representaba adicionar las fibras de acero con el 0.5% , sin embargo el desempeño de las

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

fibras de PET reciclado estuvo muy por debajo de lo esperado. Por otro lado, en el ensayo de tracción indirecta el hormigón reforzado con fibras no adquirió aumento de resistencia a los esfuerzos.

A pesar de no valorar experimentalmente, los esfuerzos a flexión en la presente investigación, con el bajo desempeño de las fibras de acero y fibras de PET en los especímenes sometidos a la prensa hidráulica se concluye que tampoco presentarían correcto refuerzo ya que en caso de presentar mejoras estas serían inapreciables en la resistencia del hormigón al ser estas evaluadas bajo las mismas condiciones.

Por otro lado, debido a las distintas variables que comprenden las fibras para reforzamiento de hormigón, se sugiere realizar estudios profundizados para la determinación de las dimensiones y porcentaje óptimo de fibras para alcanzar los resultados deseados en el concreto. Asimismo, añadir variables como el direccionamiento de las fibras dentro de la matriz de hormigón realizando un análisis de su relación con la resistencia de este. Por último, se sugiere, en caso de obtener resultados positivos en cuanto a la mejora de las propiedades del hormigón realizar un análisis de costos que se presente como opción al hormigón tradicional.

Referencias

1. American concrete institute (ACI) Committee. (s.f.). ACI 544.1R-32. concrete.org/
2. American concrete institute (ACI) Committee. (s.f.). ACI 544.1R-96. concrete.org/
3. Baldenebro, F. (2015). Estudio numérico-experimental de fibras de pet y su comportamiento en una matriz de concreto. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/34>
4. Carrillo, J., y Rojas, J. (2017). Universidad Andina de Cusco.
5. Corcino, V. (2007). Estudio comparativo de concreto simple reforzado con fibras de acero dramix y wirand empleando cemento andino tipo V. <https://cutt.ly/6Etz4ju>
6. Cristhian, P., y Zavala, J. (2020). Mejoramiento del comportamiento mecánico a compresión y flexión del concreto f_c 210 kg/cm² con la adición de fibras de acero dramix 3D.
7. Ecuador, R. d. (2017). Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021. Quito: Secretaria Nacional de Desarrollo. <https://n9.cl/znx4>
8. Guamán, C., y Pinenla, J. (2019). Análisis de las propiedades Físico-Mecánicas de un hormigón elaborado con fibras recicladas de envases PET, con y sin aditivo plastificante. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/18579>

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero

9. Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la Investigación.
10. Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2018). Buenas cifras. Mejores vidas. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas/>
11. Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2010). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1573. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1573.pdf>
12. Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2010). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1578. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1578.pdf>
13. Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2010). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2528. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2528.pdf>
14. Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2011). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 872. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/872-1.pdf>
15. Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2011). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1576. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1576.pdf>
16. Macafferri (2007). Algunos tipos de fibras usados en el mercado. <https://cutt.ly/PEtxtXZ>
17. Norma ASTM C31. (s.f.). Práctica Normalizada para preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra. <https://es.scribd.com/document/251078240/ASTM-C-31>
18. Norma ASTM C39. (s.f.). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. <https://cutt.ly/dEtxuDH>
19. Norma ASTM C496. (s.f.). Método de prueba estándar para Determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral de especímenes cilíndricos de hormigón. <https://www.astm.org/Standards/C496C496M-SP.htm>
20. Norma ASTM C511. (s.f.). Estándar especificación de las habitaciones de mezcla, húmeda Armarios, humidificadores, y tanques de almacenamiento de agua utilizados en el ensayo de cementos hidráulicos y hormigones. <https://cutt.ly/tEtxdc4>
21. Norma Técnica Peruana (NTP 334.009). (2005). Cementos. Cementos Portland. Requisitos. <https://fdocuments.in/document/ntp-334009.html>
22. Rivva, E. (2000). Naturaleza y materiales del concreto. <https://cutt.ly/zEtxodR>
23. Sarta, H., y Silva, J. (2017). Análisis comparativo entre el concreto simple y el concreto con adición de fibra de acero al 4% y 6%. <https://cutt.ly/7EtxpFy>

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET)
reciclado y concreto con fibra de acero

24. Shamskia, N. (2012). The Influence of Pet Fibers on the Properties of Fresh and Hardened Concrete. http://www.qjseg.ir/article_729_6a953df5e2b565160d24653320863eb1.pdf
25. Silva, L. (2014). Comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero y su influencia en sus propiedades mecánicas en el cantón Ambato, provincia de Tungurahua. Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/8337>
26. Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil (2020). Descripción de proyecto de investigación. <https://n9.cl/6nuu3>

©2021 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).