

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

Decanatura de Ingeniería Industrial



**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO**

VIGILADA MINEDUCACIÓN

**Elaboración y caracterización de morteros de cemento portland
reforzados con fibras de polipropileno provenientes de residuos
sólidos industriales**

TRABAJO DIRIGIDO

Para obtener el énfasis en
Materiales y Manufactura

PRESENTA

Juan Camilo Guerra

Julián Andrés Eljach

DIRECTOR

Ing. Johanna Esguerra Arce, Ph.D

CO-DIRECTOR

Ing. Adriana Esguerra Arce, Ph.D

Santa Fe de Bogotá, 2020

Elaboración y caracterización de morteros de cemento portland (PC) reforzados con fibras de Polipropileno provenientes de residuos sólidos industriales

Juan Camilo Guerra (2104415), Julián Andrés Eljach (2110629), Programa de Ingeniería Industrial, Johanna Esguerra Arce, Adriana Esguerra Arce.
Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito
Bogotá, Colombia

juan.guerra@mail.escuelaing.edu.co; julian.eljach@mail.escuelaing.edu.co; johanna.esguerra@escuelaing.edu.co; adriana.esguerra@escuelaing.edu.co

Resumen— En el presente documento se encuentra un análisis de la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión de morteros de cemento portland reforzados con fibras de polipropileno obtenidas de zunchos de polipropileno, se obtuvo zunchos de polipropileno mediante el aprovechamiento de desechos de operaciones logísticas y embalaje. Los zunchos son el producto más utilizado tanto para el sellado de cajas como para el amarrado de estibas para transporte nacional e internacional en Colombia. Posterior a la obtención de los zunchos se procedió a la extracción de las fibras, las cuales se obtuvieron mediante la agrupación de varios zunchos en una prensa, donde se ajustaba la altura de la mordaza para una adecuada profundidad de corte y ser posteriormente cortadas por una cuchilla delgada. Para llevar a cabo el estudio se utilizaron 3 tipos de moldes para probeta en las cuales fue vertida la mezcla de mortero con fibra de zunchos de polipropileno. Se elaboraron, además, muestras de mortero sin fibra para hacer las respectivas comparaciones. Las muestras contaron con 28 días de curado bajo agua y se evaluaron con la guía de la norma NSR-10, obteniendo resultados de resistencia a la compresión de 9,06 MPa y resistencia a la flexión de 3,04 MPa, para los morteros con 0,9% de fibra de PP. A pesar de que el mortero que contiene 0,9% de agregado de fibra de polipropileno tiene propiedades mecánicas inferiores a las del mortero sin fibra, clasifica dentro de la norma NSR-10 debido a que ésta pide como mínimo 8,9 MPa de resistencia a la compresión. Bajo condiciones de flexión, el material se fractura al llegar a una carga cercana a los 3 MPa, sin embargo, se observa que el material sigue soportando carga por acción de las fibras de PP que actúan como un seguro que evita una falla abrupta.

Palabras clave— Mortero, fibras de polipropileno, reciclaje de zunchos, residuos sólidos de polipropileno, cemento portland, construcción sostenible

I. INTRODUCCIÓN.

El mundo y el medio ambiente

Un informe reciente reveló que China consumió 6,6 Gt (Gigatoneladas) de cemento entre 2011 y 2013 [1], las cuales

fueron superiores a las 4,5 Gt consumidas por EE.UU entre los años 1901 y 1994 [2]. La producción de cemento en china genera emisiones que ascienden a 6,6 Gt de CO₂ [3].

El desarrollo infraestructural en China ha generado una acelerada producción de cemento, la cual representa el 73% de la producción mundial, marcando un crecimiento de la producción de cemento desde 1990 [4].

Este desarrollo exponencial incontrolado de la industria del cemento no mide consecuencias ambientales, tampoco se ha visto que éste muestre interés por reducir su contribución a las crisis ambientales globales generadas por el nivel de contaminación, lo cual causa un gran riesgo para la sostenibilidad del planeta [5].

Debido a la enorme renovación urbana y a la acelerada urbanización que tiene lugar en China, ha habido un aumento astronómico en los desechos de construcción y demolición, los cuales aumentaron a 3.9 mil millones de toneladas en 2015, contra los 88 mil millones de toneladas en 2000, con menos del 5% de los desechos de construcción y demolición reciclados, y 5 mil millones de toneladas de agregados naturales que se explotan anualmente [6].

Estas desagradables estadísticas han convertido a China en el principal responsable del calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono y el colapso ecológico mundial.

La toma de conciencia, tanto del problema del calentamiento global como del agotamiento de la capa de ozono, ha evidenciado la urgencia de la utilización de materiales reciclados para hacer la actividad de la construcción una industria más sostenible. La utilización y reciclaje de estos materiales ha llevado a que se exploren agregados reciclados mixtos (MRA) que comprenden agregados finos reciclados (RFA) y agregados gruesos reciclados (RCA).

Por otro lado, alrededor del mundo existen diferentes condiciones bastante variables que impactan la necesidad de tener construcciones más elásticas debido a su alta actividad sísmica.

Un ejemplo de esta es la costa occidental de América, desde el sur de Alaska, hasta el sur de Chile y Argentina, donde se encuentra una de las zonas más afectadas acá año por la alta actividad sísmica producida por la actividad de las placas tectónicas. Por otro lado, también tenemos el sur de Europa y Asia, que destacan por tener sismos frecuentemente. En la Ilustración 1, se observa un mapa que representa la actividad sísmica mencionada en los últimos 35 años.

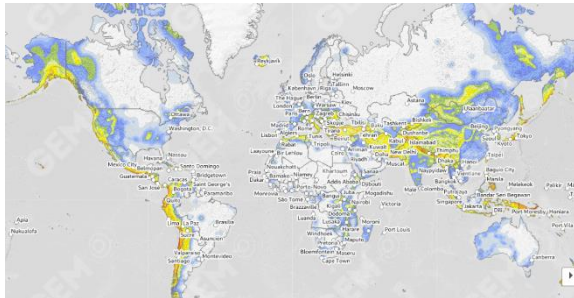


Ilustración 1 Mapa de riesgo de actividad sísmica [7].

El cemento y el mortero

Los concretos, cementos y morteros hacen parte de los materiales de uso más común alrededor del mundo. Han probado su versatilidad en diferentes ambientes y aplicaciones, demostrando gran resistencia y una alta flexibilidad para conseguir las especificaciones deseadas. Son materiales frágiles con una muy baja resistencia a la tensión. Por otro lado, poseen una muy alta resistencia a la compresión, aunque debido a su alta dureza fácilmente se agrietan cuando son deformados. Las grietas en las estructuras de concreto reducen en gran medida su vida útil debido a que estas se propagan rápidamente en el material debido a las propiedades mecánicas de los cerámicos, actuando como concentradores de esfuerzos.

El mortero es un compuesto de diferentes materiales inorgánicos y agregados finos al cual se le adiciona agua y en ocasiones diferentes aditivos para mejorar sus propiedades, dependiendo de la aplicación deseada. Su función es permitir uniones de construcción tales como ladrillos, piedras y bloques de hormigón; permite rellenar espacios que quedan entre bloques estructurales e incluso es utilizado para el revestimiento de paredes. Los morteros más comunes en la actualidad están fabricados con cemento, aunque históricamente han sido hechos de cal, tierra y yeso. Generalmente, se utilizan como material de agarre para diferentes enchapes, revestimiento de paredes, etc.

Existen diferentes tipos de morteros comercializados en Colombia, los cuales son clasificados según su resistencia mínima a la compresión, como se observa en la Tabla 1. Es importante entender la clasificación de la norma que rige estos productos, para poder clasificar correctamente el material estudiado y así evitar posibles errores de uso.

Mortero tipo	Especificación de los morteros por propiedad ⁽¹⁾			Especificación de los morteros por proporción				
	Resistencia mínima a la Compresión f'_{cp} MPa ⁽²⁾	Flujo en (%) ⁽³⁾	Retención Mínima de Agua	Cemento Portland	Cal hidratada ⁽⁴⁾	Cemento para Mampostería ⁽⁷⁾	Arena/Material Cementante ⁽⁵⁾	
							Min.	Máx.
H	22.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.00	2.5
M	17.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.25	3.0
				1	no aplica	1	2.25	2.5
S	12.5	110-120	75%	1	0.25 a 0.50	no aplica	2.50	3.5
				0.5	no aplica	1	2.50	3.0
N ⁽⁶⁾	7.5	105-115	75%	1	0.50 a 1.25	no aplica	3.00	4.5
				0	no aplica	1	3.00	4.0

Tabla 1 Clasificación de los morteros en la NSR-10

Dentro del proceso de fabricación de un elemento estructural o decorativo empleando morteros, es importante recordar que éste está presente en dos posibles estados físicos de la materia. El primero es el estado líquido también llamado fresco, y el otro es un estado sólido también conocido como endurecido. Es importante recordar que solo se puede dar la geometría deseada a estos materiales cuando se encuentran frescos, pues sus propiedades mecánicas al estar endurecido no permiten deformaciones plásticas por lo que estos materiales se agrietan y se fragmentan con gran facilidad a pesar de estar diseñados para soportar grandes cantidades de esfuerzo de compresión, no manejan muy bien cargas que generen flexión.

La consistencia de un mortero define la manejabilidad o trabajabilidad de éste. En algunos manuales se denomina plasticidad, pero ésta es un grado de consistencia como veremos. La consistencia adecuada se consigue en obra mediante la adición de cierta cantidad de agua que varía en función de la granulometría del mortero, cantidad de finos, empleo de aditivos, absorción de agua de la base sobre la que se aplica, así como de las condiciones ambientales, gusto de los operarios que lo utilizan, etc. La trabajabilidad mejora con la adición de cal, plastificantes o aireantes.

El mortero en la mayor parte de sus aplicaciones debe actuar como elemento de unión resistente, ofreciendo propiedades mecánicas iguales o superiores a los elementos adyacentes que conforman la estructura. El mortero utilizado en juntas debe soportar inicialmente las sucesivas hiladas de ladrillos o bloques; por lo que la resistencia del mortero influirá, por ejemplo, en la cantidad de personas que puede soportar una terraza cuyos ladrillos se han unido con mortero. Otras aplicaciones frecuentes de los morteros, es hacer recubrimiento de superficies irregulares donde debe cumplir de forma costo-eficiente el objetivo de mejorar la estética de un muro o incluso de algunos pisos, por lo que, en estas aplicaciones ornamentales, que son bastante frecuentes, no se requiere de una resistencia a la compresión o a la flexión demasiado alta.

Todos los morteros sufren de un fenómeno de contracción volumétrica que ocurre entre el proceso de fraguado y principios del endurecimiento. Dicha retracción es provocada por la pérdida de agua sobrante tras la hidratación del mortero, por lo que es de gran importancia para quien lo utiliza, tener en cuenta la posibilidad de evidenciar diversas deformaciones en las superficies donde es aplicado.

Para diseñar cualquier mortero, es indispensable conocer las propiedades de los componentes y aditivos empleados. Esta

información la provee el fabricante del cemento y el proveedor de la arena, y los otros aditivos.

Contexto colombiano de posible uso para el mortero

En colombiano, la actividad sísmica es mayor a otros lugares del mundo como Europa del Norte, el centro y costa este de Canadá o el norte de los Estados Unidos, por lo que es importante encontrar diferentes formas de evitar dicha formación y propagación de grietas, y en el caso de que estén presentes, que no logren impactar significativamente la vida útil de una estructura de estos materiales tan comunes [7].

Los plásticos en Colombia

En Colombia la utilización de zunchos de polipropileno es muy común en todo tipo de industrias ya que son utilizados para amarrar cargas, cajas, rollos de tela, entre otros. Sin embargo, estos plásticos son de un solo uso y en promedio los zunchos de polipropileno tienen un periodo de degradación superior a 500 años. En un país como Colombia, la industria plástica creció un 2,5% en la producción de productos plásticos en 2018 en comparación con los años anteriores, esto es debido al alto consumo de la nación y a las pocas regulaciones del gobierno [8].

El mortero y los plásticos (PP)

El mortero reforzado con fibra clasifica como material compuestos heterogéneos, debido a sus agregados como la arena y la fibra de polipropileno. Ya que la fibra de polipropileno tiene propiedades mecánicas favorables para su uso en la industria, mezclar las fibras de PP con mortero de cemento portland mejora las propiedades mecánicas del éste, ampliando su rango de uso en la industria y mejorando su rendimiento en otros sectores donde es aplicado, mejora también la durabilidad del mortero [11]. De hecho, la empresa SIKA® ya comercializa un mortero adicionado con fibra de PP. El objetivo de este trabajo es obtener fibra de PP a partir de zunchos y utilizarlos para reforzar morteros de cemento Pórtland. Al poder usar fibras de polipropileno extraídas de zunchos reciclados de la industria, se estaría contribuyendo con el medio ambiente, ya que los zunchos que se consideran desechos se utilizarían en morteros, sustituyendo pequeños porcentajes de los otros agregados que lleva el mortero y mejorando algunas propiedades mecánicas como la deformación elástica

II. Metodología

Extracción de fibra de zunchos

El proceso de fabricación inicia con la extracción de fibras de polipropileno a partir de zunchos que han sido utilizado anteriormente en procesos de empaque y ya han cumplido su función, los cuales se han convertido en un residuo sólido. Estos zunchos inicialmente cuentan con un ancho cercano a los 9 mm y un largo que varía debido a que depende de su función anterior. Es por esto, que es necesario cortarlos empleando tijeras o bisturí con el fin de obtener las dimensiones deseadas para este estudio, las cuales son un ancho de 1 mm y un largo

de 10 mm. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observan los zunchos que fueron utilizados para este estudio. Se contaba con material de diferente color y textura, por lo que se decide utilizar los de color blanco sólido y se descartan los verdes y los translucidos debido a que se busca uniformidad en el experimento, y se desconocen las diferencias o similitudes en las propiedades mecánicas de dichos zunchos y tampoco se tiene certeza de que sea el mismo material.



Ilustración 2 zunchos de polipropileno

De forma manual se cortan fibras de 1mm de espesor y longitud indefinida de los zunchos de polipropileno, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Ilustración 3 fibras

Se emplea un bisturí para cortar las fibras extraídas y posteriormente, se utiliza un calibrador para obtener la longitud deseada de la fibra (10mm) y se redimensionan las fibras hasta obtener la cantidad y longitud deseada como se observa en la Ilustración 4



Ilustración 4 Fibra de zuncho lista para el mortero

Se recomienda marcar el material antes de darle la longitud final empleando un marcador o algún tipo de señalización que indique la longitud deseada, ya que esto puede afectar el resultado final del estudio. Es de gran importancia mantener el espesor deseado a lo largo de toda la fibra que se extrae con el fin de mantener la homogeneidad de la prueba, ya que, si se extrae de forma inadecuada, se obtendrán fibras de espesores diferentes a 1mm lo cual puede afectar el desarrollo de la prueba. Para este estudio. Se decide emplear un porcentaje en volumen del **0,9%** de fibra de PP extraída de los zunchos utilizados anteriormente en industria y dispuestos como residuos sólidos luego de su disposición final, lo que corresponde a 25,57 gr de fibra de polipropileno Ilustración 5. Para medir la preparación del mortero con fibra de polipropileno, se utilizan proporciones de forma volumétrica. Para esto, se emplea una báscula convencional, con una precisión de 0.01 gramos. Utilizamos un recipiente plástico que es utilizado para situar el cero de la báscula como también se puede observar en la Ilustración 5.

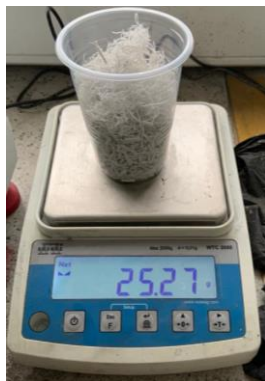


Ilustración 5 fibra en Báscula

Cemento

Se emplea cemento portland de la marca Fortecem cuya densidad es, $\rho_c = 2910 \frac{Kg}{m^3}$ de tipo UG, manufacturado bajo la norma NTC 121 en el cual se observa un alto grado de pureza y una textura bastante fina y se muestra en la Ilustración 6; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**



Ilustración 6 Cemento Portland [15]

en el caso de este experimento se van a emplear 450 gr de material cementante como se puede ver en la Ilustración 7



Ilustración 7 cemento portland utilizado

Agua

Un elemento de gran importancia al trabajar con materiales cementantes es el agua. En esta ocasión, se emplea agua de grifo en una cantidad de 300g, equivalente a 300 mililitros, como se muestra en la Ilustración 8.

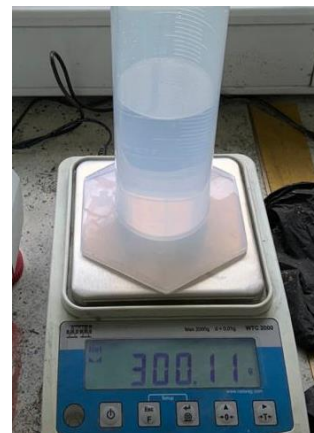


Ilustración 8 masa de agua empleada en la mezcla

restante para luego terminar el proceso de mezclado durante otros 30 segundos.

Arena

Se emplea 1350g de arena de río procesada para cemento Portland, la cual es pesada como se muestra en la Ilustración 9.



Ilustración 9 arena para cemento portland

Mezcla

Para elaborar la mezcla se emplea una mezcladora mecánica de velocidad variable, la cual es empleada para realizar la mezcla agua, cemento portland, arena tamizada y fibra de polipropileno hasta tener una consistencia homogénea y se muestra en la Ilustración 10; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Se mezcla todo de forma homogénea, empleando un mezclador mecánico a una velocidad media-baja. Para este estudio fue empleada una mezcladora común, donde durante 4 minutos y 30 segundos; siguiendo la recomendación de agregar $\frac{3}{4}$ del agua requerida y $\frac{1}{2}$ de la arena y todo el cemento, mezclar por 2 minutos 30 segundos y luego agregar el resto de los materiales, ya que es el necesario para obtener uniformidad sin segregación en la mezcla. Se agrega de forma continua los 300 gramos de agua a la mezcla. Es posible que, durante el proceso de vertido de agua y absorción de esta, se pierda tanto arena que queda suspendida en el aire como cemento e incluso agua que se seca, por lo que es recomendable emplear una bayetilla humedecida con agua para mantener una atmosfera húmeda y que además impida la pérdida de material de la mezcla. En la Ilustración 10, se observa el momento en que se agrega agua a la mezcla mientras esta se está preparando en la máquina. Se agregan 250gr de agua en la mezcladora, luego de esto se enciende la mezcladora y se agrega 450 gr de cemento portland y se deja mezclar por un minuto y medio, luego se le agrega 1350 gr de arena y se deja mezclar por 2 minutos y medio, posteriormente se le agrega 25,26 gr de fibra de zuncho de polipropileno de 1 mm de espesor y 10mm de longitud y se deja mezclar por 3,5 minutos. Se agregan los 50g de agua



Ilustración 10 agregado de agua a la mezcla

Mesa de flujo

Para evaluar el grado de fluidez del mortero se utiliza la mesa de flujo mecánica que se muestra en la Ilustración 11, la cual; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** emplea un motor eléctrico junto con un contador de revoluciones y golpea la mezcla formando una geometría circular que aumenta de diámetro a medida que aumenta el número de golpes.



Ilustración 11 mesa de flujo mecánica.

Es importante permitirle al sistema electrónico de la mesa de flujo iniciar antes de situar la mezcla. Para esto, se debe configurar el número de golpes antes de situar la mezcla en la mesa, como se observa en la Ilustración 12; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Ilustración 12 Mezcla lista para ser evaluada en la mesa de flujo

Se procede a evaluar la consistencia de la mezcla. Para esto, es llevada a la mesa de flujo mostrada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde es evaluada la consistencia de la mezcla por medio de los límites de Aterberg con el fin de verificar el comportamiento en estado fresco de la mezcla. Se configura la máquina en 25 golpes y posteriormente se deposita la mezcla en un molde de geometría estándar, el cual se evidencia en la Ilustración 13**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**



Ilustración 13 Mortero fibroreforzado en la mesa de flujo

Una vez la máquina a finalizado los golpes, se procede a medir 6 diámetros diferentes de la mezcla evaluada, la cual habrá fluido de forma circular luego de los 25 golpes. Se realiza este proceso para el material patrón (mortero sin fibra) como se muestra en la Ilustración 14 y para el material evaluado (mortero con 0,9% de volumen agregado en fibra de PP) como es evidenciado en la Ilustración 13.



Ilustración 14 Material patrón en la mesa de flujo

Lubricación de moldes

Para facilitar el desmoldeo de las probetas, es necesario emplear un lubricante para evitar que el mortero se adhiera a las paredes del molde, por lo que se utiliza aceite de motor reciclado el cual se muestra en la Ilustración 15**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, ya que suele emplearse en obras públicas debido a que es fácil de encontrar, por lo general es gratis o muy barato. Este se utiliza directamente en el molde donde se realiza el vaciado de mezcla de mortero con fibras de polipropileno y mortero corriente para la construcción de probetas de tensión, compresión y flexión.



Ilustración 15 Aceite de motor utilizado como lubricante para el molde

Fabricación de probetas: posterior a la mezcla, se procedió a fabricar 3 tipos de probetas, cada una en un molde diferente, las cuales son:

Probeta para ensayo de tensión: se fabricaron probetas para el ensayo de tensión (vigas de sulfato), vaciando mezcla de mortero con 0,9% de fibra en volumen y mortero virgen en un

molde de acero mecanizado con dimensiones 25,4 x 25,4 x 287 mm, como se puede observar en la Ilustración 16.



Ilustración 16 Molde para prueba de tensión

Probeta para ensayo de flexión: el mortero virgen y el mortero con 0,9% de fibra en volumen son vaciados en moldes hechos en acero mecanizado de dimensiones 40x40x160mm, con sujeción de pernos para llave Allen para brindar mayor soporte y seguridad, como se puede observar en la Ilustración 17.



Ilustración 17 molde para flexión

Probeta para ensayo de compresión: en la Ilustración 18; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra el molde utilizado para la fabricación de las probetas cúbicas de 50x50x50mm, haciendo el vertido de mortero regular y mortero con 0.9% de fibras de polipropileno en el molde para la construcción de las probetas. Este molde está fabricado en bronce mecanizado, de tal forma que se garantice su resistencia a la abrasión y se minimicen posibles deformaciones que puedan generar defectos en la geometría de las probetas. Cuenta con sujeción tipo mariposa para fácil desmontaje y de esta manera evitar que se rompa la probeta durante su proceso de extracción del molde.



Ilustración 18 Molde para probetas de compresión

Curado

Una vez la mezcla está en estado endurecido, debe desencofrarse con cuidado para luego llevar las probetas a un proceso de curado, el cual se lleva a cabo durante 28 días, completamente sumergidas bajo el agua, como se muestra en la Ilustración 19; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**



Ilustración 19 Probetas en proceso de curado

Pruebas de las probetas

Luego del proceso de curado, se extraen las probetas y se ejecutan las pruebas de flexión y compresión, las cuales fueron llevadas a cabo utilizando una máquina de compresión y una máquina universal de ensayos para flexión. Las cuales estaban disponibles en los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería y son empleadas actualmente para diferentes pruebas.

Máquina de compresión

Para evaluar la resistencia a la compresión, se emplea la Máquina de compresión usada en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito para fallar probetas destinadas a experimentos relacionados con la resistencia de cargas constantes, en este caso, se destinó la probeta cúbica a fallar en esta máquina, cómo se puede observar en la Ilustración 20.



Ilustración 20 Máquina hidráulica para prueba de compresión

Máquina de prueba universal

Para evaluar la resistencia a la flexión y evidenciar el comportamiento que tienen los diferentes materiales en esta propiedad, se emplea una máquina de prueba universal de ensayos electromecánica, la cual se muestra en la Ilustración 21. Modelo de sobremesa de dos columnas Shimadzu AGS-X, empleando una distancia entre apoyos de 14cm como se puede observar en la Ilustración 22, esto es para evaluar la resistencia a la flexión de los materiales por medio de la curva esfuerzo vs deformación que estos materiales poseen y la resistencia máxima a ambos tipos de esfuerzo.



Ilustración 21 Máquina universal de ensayos[12]

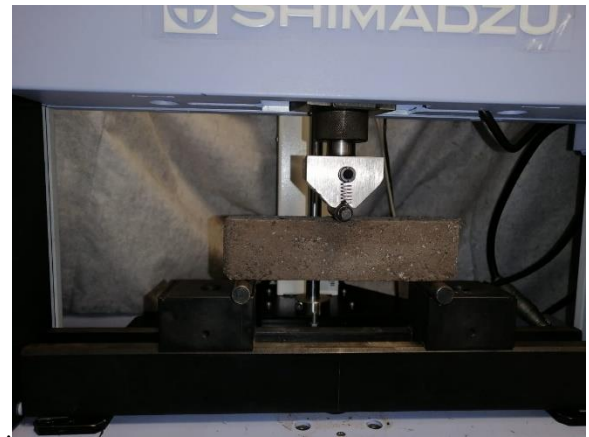
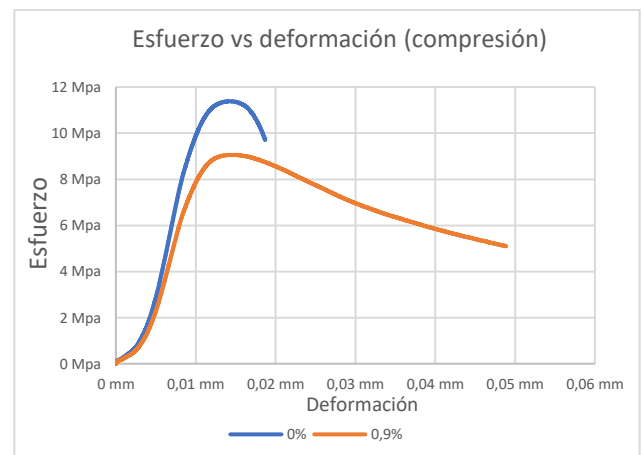


Ilustración 22 ensayo de flexión.

III. Resultados y discusión

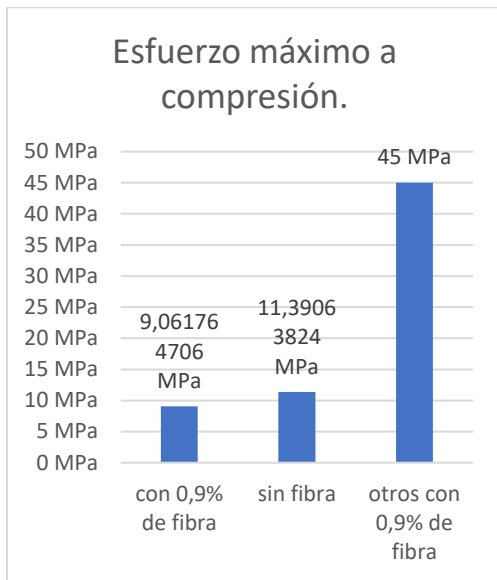
La Gráfica 1 muestra las curvas esfuerzo-deformación en compresión de los morteros con 0 y 0,9% de fibra de PP obtenida de zuncho.



Gráfica 1 Comparación de resistencia a la compresión (con y sin fibras de PP)

Se puede evidenciar que el mayor valor de esfuerzo resistido a compresión es de 11,4 MPa para el mortero sin adición de fibra y de 9,1 MPa para el mortero con 0,9% de fibra de zuncho, lo cual nos permite observar que el mortero que contiene 0,9% de fibra de zuncho presenta menor resistencia que el mortero normal. Sin embargo, después de que el material ya ha fallado, presenta una mayor deflexión (mayor deformación antes de la falla) otorgándole una mayor tenacidad al material debido al efecto puenteo que generan las fibras en el mortero. Los módulos elásticos hallados en la prueba de compresión fueron de 1525,2 MPa para el mortero normal y 1043,1MPa para el mortero con fibra de zunchos, donde también se observa una reducción en las propiedades mecánicas del material. Sin embargo, se obtiene una mayor deformación del material, con la cual evita un posible agrietamiento temprano de una estructura o recubrimiento (en caso de un sismo). Es fundamental para quien diseña una estructura evaluar hasta qué punto desea sacrificar propiedades de resistencia a la

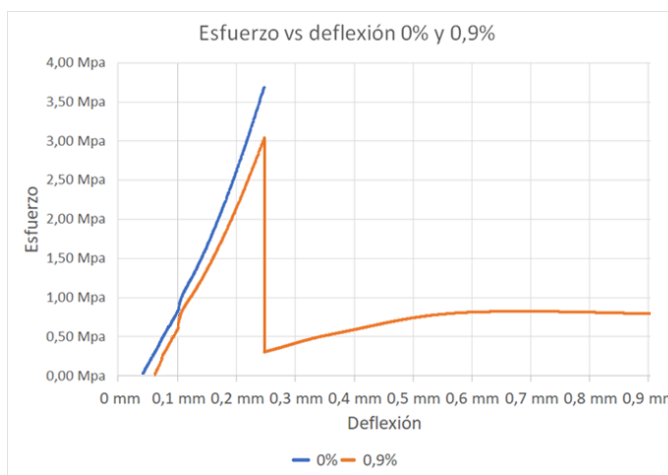
compresión para obtener mayor elongación que evite una falla abrupta. Se considera de gran importancia evaluar diferentes proporciones de fibra donde se minimice la pérdida en resistencia a la compresión y se mantenga las propiedades plásticas que se adquieren y se pueden observar en la gráfica 1 al agregar fibra de PP al cemento portland.



Gráfica 2 esfuerzo máximo en MPa a compresión.

En la Gráfica 2 podemos observar que otros autores obtienen resultados de esfuerzo máximo a compresión de 45 MPa, superiores a los obtenidos en el experimento realizado en este artículo, los cuales son de 19,22 Mpa para el caso de 0,9% en volumen de fibra y de 24,03 MPa para el caso de mortero virgen, lo cual se debe a que el otro autor usa fibras micrométricas en su experimento [17].

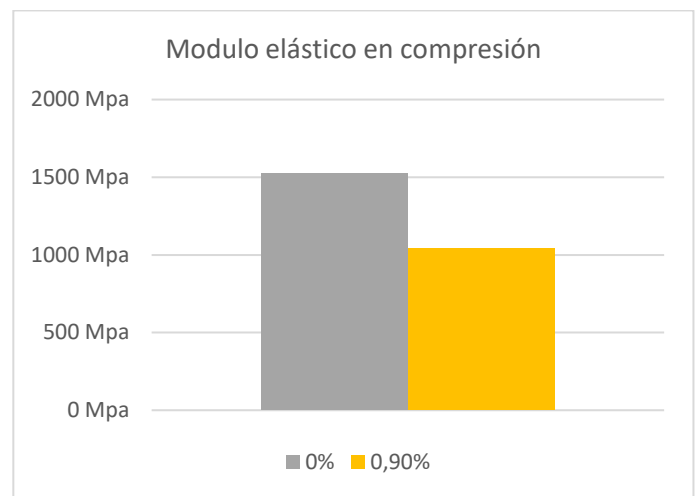
En la Gráfica 3 se muestran las curvas esfuerzo-deformación en flexión del mortero de cemento portland con 0% y 0,9% de fibra de PP de zuncho.



Gráfica 3 Comparación de resistencia a la flexión (0,9% vs 0% de fibra de PP)

Se puede evidenciar que el mortero sin adición de fibra presenta un mayor módulo de rotura que el mortero con fibra de zuncho con valores de 3,7 MPa y 3,0 MPa, respectivamente. Sin embargo, en el mortero con 0,9% de fibra se observa una nueva etapa de menor resistencia, pero de mayor deformación antes de la falla, lo que garantiza que no se presente una falla abrupta del material. En el caso del mortero sin fibra, en cambio, se observa falla abrupta. Por lo que luego de la prueba la pieza se ha fraccionado y el comportamiento esperado en una estructura o un recubrimiento es que esta se desmorone. Los módulos elásticos hallados en la prueba de flexión fueron de 20,51 MPa para el mortero normal y 18,87 para el mortero con fibra de zunchos como se muestra en la Gráfica 4.

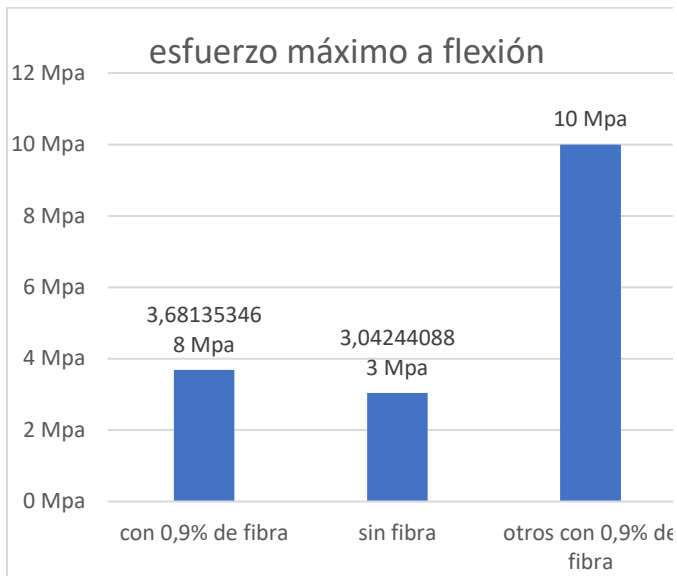
Comparando los módulos elásticos expuestos en la Gráfica 4, podemos observar que el mortero sin fibra tiene el mayor valor de módulo elástico por 482,09 unidades, por lo cual es un material más rígido y va a fallar de forma más frágil, mientras que el mortero reforzado con fibra es menos rígido y más elástico.



Gráfica 4 Comparación modulo elástico bajo compresión (0.9% de Fibra de PP vs 0% de PP)

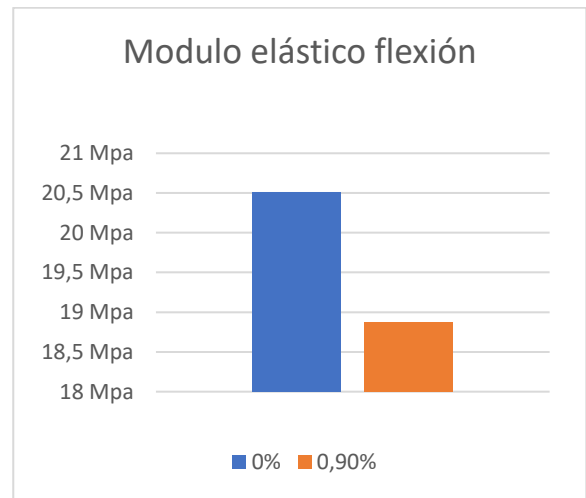
Las fibras de zuncho también le otorgan a la probeta un comportamiento mixto, ya que en la Gráfica 1 podemos observar que la probeta que contiene fibra de zuncho se puede deforma más que la probeta que no contiene fibra de zuncho, esto es debido a que una vez falla el mortero, los fragmentos que fallaron de forma frágil quedan unidos entre ellos por la fibra de zuncho cómo único soporte, brindándoles un comportamiento similar al de un polímero en la curva esfuerzo vs deflexión.

Los resultados obtenidos en el ensayo de flexión realizado a la probeta prismática se obtuvieron que el mortero normal tiene un valor de límite carga máxima mayor que la que tiene fibra de zuncho, dando resultados de 3,68 MPa contra 3,04MPa, lo que nos da una diferencia de 0,63 MPa, cómo lo podemos observar en la Gráfica 5, también podemos observar a otros autores, usando fibras micrométricas les da un valor de 10 MPa, lo cual tiene explicación en el tamaño de la fibra usada [16].



Gráfica 5 Comparación de esfuerzos máximos bajo flexión (0,9% de PP vs 0% de PP)

Lo cual nos indica que, en flexión, el mortero normal es más rígido que el mortero que tiene fibras de zunchos. Esto es debido a que la geometría de las fibras de zunchos hace que estas actúen como concentradores de esfuerzo, causando que la probeta que las contiene falle a menor carga. Comparando los módulos elásticos podemos observar que el mortero sin zunchos tiene el mayor valor de módulo elástico por 1,63 unidades, por lo cual es un material más rígido y va a fallar de forma más frágil, mientras que el mortero reforzado con fibra es menos rígido y más elástico. Analizando la gráfica de esfuerzo deformación para ensayo de flexión podemos observar que una vez falla el material, este sigue presentando resistencia y es debido a que las fibras están entrelazadas y siguen unidas al mortero, por lo cual el comportamiento de la curva es parecido a la de un polímero, aumentando su resistencia a medida que se sigue deformando hasta encontrar la falla en el punto donde la unión entre fibra de zuncho y mortero colapsa y termina de fallar todo el material. El valor del módulo elástico de flexión para el mortero normal es 1,63 unidades superior que el mortero que tiene fibra de zuncho, debido a que tiene un comportamiento más rígido [13].



Gráfica 6 Comparación modulo elástico bajo Flexión (0,9% de Fibra de PP vs 0% de PP)

IV. CONCLUSIONES

- La resistencia a la compresión de los morteros con 0,9% en volumen de fibra de polipropileno los hace aptos para usarse en Colombia, debido a que, en compresión, superan el mínimo requerido por la norma NSR-10, con 0,13 MPa, a pesar de que sus propiedades mecánicas fueron reducidas por la inserción de 0,9% en volumen de fibra de polipropileno.
- se observa que después de haber fallado, el material sigue soportando carga por acción de las fibras de PP que actúan como un seguro que evita que el material se separe (efecto de puenteo), lo cual abre la posibilidad de utilizar este material para recubrimientos donde sea necesario que el material no desprenda fragmentos que puedan generar lesiones o accidentes; como es el caso de los túneles ya que de desprenderse un fragmento del techo, podría generar una obstrucción, la cual puede ser evitada si se logra que en caso de que el material falle, este permanezca en su lugar mientras es reparado.
- A pesar de no haber obtenido un incremento en la resistencia a la compresión y a la flexión, se observa un incremento en la deformación que puede soportar el material sin fallar. Esto permite utilizar este producto en aplicaciones relacionadas a la necesidad de soportar vibraciones y deformaciones bastante altas sin que el material se fracture.
- Debido a las fibras de PP el material cambia sus propiedades mecánicas, adquiriendo un comportamiento cuasi-plástico que le proporciona mayor ductilidad, haciendo de este material un candidato sugerible para aplicaciones donde se requiera resistencia a fatiga, como lo es la unión de las losas usadas en el sistema integrado de transporte público de Bogotá, la unión entre baldosas cerámicas de exteriores que se encuentren expuestas a la radiación solar y unión

de ladrillos en zonas cercanas a puntos donde se emitan vibraciones como autopistas concurridas.

- Dados los importantes cambios que se generan en el comportamiento mecánico del material, es de gran importancia continuar con investigaciones variando el porcentaje en peso de fibras de PP en el mortero, con el fin de intentar incrementar dichas propiedades elásticas y plásticas que se obtienen en el material, determinando la proporción ideal que agregue la mayor cantidad de elasticidad y plasticidad, minimizando la reducción en la resistencia a la compresión y flexión del mortero.

V. REFERENCIAS

- [1] Gates, B. (2014). A Stunning Statistic About China and Concrete. Retrieved 31 January 2021, from <https://www.gatesnotes.com/about-bill-gates/concrete-in-china>
- [2] impacto del calentamiento global en las industrias de cemento y agregados. (2021). Consultado el 30 de diciembre de 2020 en https://www.researchgate.net/publication/236503901_Global_Warming_Impact_on_the_Cement_and_Aggregates_Industries.
- [3] Smil, V. Haciendo el mundo moderno (1ª ed., P. 156). Manitoba, Canadá: Wiley.
- [4] C. Schuyler Anderson, 2016. Tin. [online] S3-us-west-2.amazonaws.com. Disponible en: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/tin/myb1-2014-tin.pdf> [Accessed 30 January 2021].
- [5] Lopez Gutierrez, J., 2017. The Gigantism of Public Works in China in the Twenty-First Century. Sustainability, [online] 9(9), p.1581. Available at: https://www.researchgate.net/publication/320059092_The_Gigantism_of_Public_Works_in_China_in_the_Twenty-First_Century [Accessed 31 January 2021].
- [6] Akbar A, Liew KM, Assessing recycling potential of carbon fiber reinforced plastic waste in production of eco-efficient cement-based materials, Journal of Cleaner Production, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123001>.
- [7] Foundation, G., n.d. OpenQuake Map Viewer - Global Seismic Hazard Map. [online] Maps.openquake.org. Available at: <https://maps.openquake.org/map/global-seismic-hazard-map/#3/-5.53/-64.69> [Accessed 31 January 2021].
- [8] Universidad de los Andes, 2019. Situación de los plásticos en Colombia | Uniandes. [online] Derecho.uniandes.edu.co. Available at: <https://derecho.uniandes.edu.co/es/informe-situacion-actual-de-los-plasticos-en-colombia> [Accessed 4 February 2021].
- [9] Vidal, C., 2008. Degradación del plástico – Blog sobre medio ambiente y ecología. [online] Ecoclimatico.com. Disponible en: <https://www.ecoclimatico.com/archives/degradacion-del-plastico-137> [Accessed 4 February 2021].
- [10] Cementos Argos, 2021. Morteros para mampostería. [online] Comunidad 360. Disponible en: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/morteros/morteros-para-mamposteria> [Accessed 4 February 2021].
- [11] L. Basheer, J. Kropp, D.J. Cleland, Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review, Constr. Build. Mater. 15 (2001) 93–103.
- [12] Industry, D., n.d. Shimadzu. [online] Direct Industry. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/shimadzu-europa/product-25210-355433.htm> [Accessed 4 February 2021].
- [13] Zhang, H., Liu, Y., Sun, H. and Wu, S., 2016. Transient dynamic behavior of polypropylene fiber reinforced mortar under compressive impact loading.
- [14] Wygocka-Domagała, A. and Garbalińska, H., 2020. The effect of pore structure on the water sorption coefficient of cement mortars reinforced with 12 mm polypropylene fibres. Construction and Building Materials, 248, p.118606.
- [15] Fortecem. (2020). Cemento Uso General. Retrieved 4 February 2021, disponible en <https://fortecem.co/servicios/cemento-uso-general>
- [16] *Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries*. ResearchGate. (2021). Retrieved 30 December 2020, from https://www.researchgate.net/publication/236503901_Global_Warming_Impact_on_the_Cement_and_Aggregates_Industries
- [17] *Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries*. ResearchGate. (2021). Retrieved 30 December 2020, from https://www.researchgate.net/publication/236503901_Global_Warming_Impact_on_the_Cement_and_Aggregates_Industries.