

Evaluación de las propiedades mecánicas de concretos modificados con microesferas de vidrio y residuos de llantas

Evaluation of the mechanical properties of modified concretes with glass microspheres and tire debris

Juan Pablo Valencia Villegas*
Ana María González Mesa**
Oscar Felipe Arbeláez Pérez***

(Recibido el 22-01-2019. Aprobado el 20-05-2019)

Estilo de citación de artículo:

J. P. Valencia Villegas, A. M. González Mesa, y O. F. Arbeláez Pérez, "Evaluación de las propiedades mecánicas de concretos modificados con microesferas de vidrios y residuos de llantas", *Lámpsakos*, (22), pp. 16-26 (julio-diciembre, 2019). doi: 10.21501/21454086.3283

Resumen

El efecto combinado de residuos de llantas y microesferas como sustitutos de la materia prima utilizada en la elaboración convencional de concretos fue explorada en este trabajo. Se diseñaron y prepararon mezclas de concreto tradicional, con modificaciones del 15% en masa de los agregados finos con relaciones de residuos de llantas, microesferas de vidrio de 0:1, 1:1, 1:3, 3:1 y 1:0. A partir de las mezclas preparadas se elaboraron especímenes cilíndricos de 150 mm x 300 mm. La evaluación de las propiedades mecánicas y físicas de los especímenes cilíndricos mostró que los materiales con mayor contenido de residuos de llantas presentaron una menor densidad, mientras que los de mayor contenido de microesferas presentaron la mayor resistencia a la compresión; de hecho, las mezclas 0:1 y 1:3 presentaron resistencias a la compresión de 22.4 y 19.1 MPa, respectivamente. Los resultados encontrados muestran que la adición conjunta de microesferas y residuos de llantas presentan un efecto sinérgico combinado entre los dos materiales con potencial uso en la industria de la construcción, en reemplazo de los materiales tradicionales utilizados en la elaboración de concretos, en particular, se espera que el uso de estos materiales se convierta en una alternativa para la utilización de estos residuos, los cuales no cuentan actualmente con un plan de disposición.

Palabras clave: Residuos de llantas; Concretos modificados; Microesferas de vidrio; Resistencia a compresión; Módulo de elasticidad; Propiedades mecánicas; Trabajabilidad; Asentamiento; Propiedades mecánicas; materiales ecológicos.

* Estudiante de último semestre de Ingeniería Civil, Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín-Colombia. Contacto: juan.valenciav@campusucc.edu.co

** Magíster en Ingeniería, profesor instructor, Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín-Colombia. Contacto: ana.gonzalezme@campusucc.edu.co

*** Doctor en Ingeniería, profesor investigador, Universidad Cooperativa de Colombia. Integrante del grupo de investigación Termomec, Medellín-Colombia. Contacto: oscar.arbelaez@campusucc.edu.co

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3283>

Abstract

The combined effect of tire wastes and microspheres as substitutes of the raw material used in the conventional process of concrete making was explored in this study. Mixes of conventional concretes with modifications of 15% in mass of fine additions of tire wastes and glass microspheres of 0:1, 1:1, 1:3, 3:1 and 1:0 were designed and prepared. Cylindrical samples of 150 mm x 300 mm were made from such mixes. The evaluation of the mechanical and physical properties of the cylindrical samples made evident that the materials with the higher content of tires wastes presented lower densities, whereas the ones with a higher content of microspheres showed higher compression resistance; in fact, the 0:1, and 1:3 mixes showed resistance to compression values of 22.4 and 19.1 MPa, respectively. The results found showed that the joint addition of microspheres and tire wastes presented a synergic effect between the two materials with a potential use in the construction sector, substituting traditional materials used in concretes production. Particularly, it is expected that the use of such materials becomes an alternative to the use of these wastes, which do not have a waste arrangement nowadays.

Keywords: Tire wastes; Modified concretes; Glass microspheres; Compression resistance; Modulus of elasticity; Mechanical properties; Workability; Settlement; Mechanical properties; Ecological materials.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población, la urbanización de las ciudades y el crecimiento de la clase media está asociado con requerimientos de nueva infraestructura civil que demanda una mayor cantidad de materias primas, especialmente aquellas que conforman el concreto (agua, cemento y agregados) [1]; gran parte de ellas se encuentran en la naturaleza, por lo cual, su explotación genera un impacto negativo que va en detrimento del medio ambiente. Se requiere generar nuevas políticas sobre la limitación en la explotación de los recursos naturales y estrategias para la búsqueda de nuevos materiales, especialmente aquellos que permitan el aprovechamiento de residuos de uso potencial en la industria de la construcción. Diversas investigaciones enfocadas en la elaboración de concretos modificados con ceniza volante [2], residuos de demolición [3], vidrio triturado [4] y polímeros como el tereftalato de polietileno (PET) [5] en sustitución parcial del cemento, agregados finos y/o agregados gruesos han permitido mejorar las propiedades fisicoquímicas del concreto y generar alternativas de materiales potenciales para el reemplazo de los materiales tradicionales.

Entre los diferentes sustitutos, los residuos de polímeros, específicamente de llantas en desuso como reemplazo de los agregados, permiten modificar las propiedades del concreto. Rashid et al. [6] estudiaron el efecto de la modificación del 10%, 20% y 30% de los finos por residuos de llantas con tamaños de partícula de 4.75 mm a 0.15 mm; y de los agregados gruesos con residuos de llantas con tamaño de partícula de 12.5 mm a 9.5 mm; se encontró que existe una disminución en la resistencia a compresión directamente proporcional al aumento en el contenido de residuos de llantas, siendo más significativo cuando se reemplazan los agregados gruesos. De hecho, se reportó que un reemplazo del 30% de los agregados gruesos genera una disminución (al día 28) del 74% de la resistencia con respecto al concreto tradicional. Khaloo y colaboradores [7] y Ospina et al. [8] reportaron que la modificación de los agregados gruesos por residuos de llantas modifica la resistencia a la compresión, de hecho, los autores concluyeron que los porcentajes

de reemplazo deben ser menores del 25% y del 10%, respectivamente, para concretos de uso estructural. Lijuan et al. [9], evaluaron el efecto del tamaño de las partículas de caucho en la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, y mostraron que el reemplazo de los agregados finos por partículas de caucho con diferentes tamaños de partícula (4 mm, 2 mm, 0.864 mm, 0.535 mm, 0.381 mm, 0.221 mm y 0.173 mm) y diferentes porcentajes de reemplazo de agregado fino (2%, 4%, 6%, 8% y 10%) modifican las propiedades del concreto.

Las microesferas de vidrio también han sido evaluadas favorablemente como material de reemplazo de compuestos cementantes y de los agregados, de manera que modifican la resistencia a la compresión, la densidad y el módulo de elasticidad de los concretos preparados. Shahidan et al. [10], evaluaron el efecto de reemplazar el 3%, 6% y 9% del cemento por microesferas de vidrio en la elaboración de concreto celular ligero, se halló que el 3% es el porcentaje más adecuado de microesferas para generar concretos con aplicaciones estructurales; de hecho, este contenido de microesferas genera un aumento del 22 % de la resistencia a la compresión. Así mismo, Brooks et al. [11], realizaron un estudio comparativo de las propiedades mecánicas de concretos ligeros al realizar una sustitución del 7%, 14%, 21% y 28% de volumen de los agregados finos por microesferas de diferentes tamaños. La densidad de los materiales preparados disminuye a medida que aumenta la concentración de microesferas, generando reducciones en la densidad de 2.4%, 12%, 22.1%, y 31.9% respectivamente. Además, los autores reportaron que, a una edad de 28 días, se genera un aumento en la resistencia a la compresión cuando el reemplazo es menor al 15%; adicionalmente, los autores reportaron que la resistencia del concreto ligero es mucho mayor cuando se usan microesferas de menor tamaño. Estudios adicionales [12] reportaron el uso de microesferas de vidrio con densidades de 150 Kg/m³ y 380 Kg/m³ en la elaboración de concretos livianos con reemplazos del 10%, 20% y 30% en masa de los agregados finos. Para un reemplazo del 30%, se observó una disminución en el módulo de elasticidad del 91.6% y 82.6% con microesferas de 150 Kg/m³ y 380 Kg/m³ de densidad,

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3283>

respectivamente. Los autores concluyeron que la gran reducción en el módulo de elasticidad se debe a la baja densidad de las microesferas utilizadas.

Los resultados reportados hasta el momento muestran la versatilidad de las microesferas para aumentar la resistencia a la compresión y disminuir el módulo de elasticidad de los concretos, así como de los residuos de llantas en desuso, para disminuir la densidad de concretos modificados. Por tanto, se espera que el uso combinado de microesferas de vidrio y residuos de llantas presente un efecto sinérgico en la elaboración de concretos modificados con propiedades mecánicas superiores o similares al concreto tradicional. En este trabajo se presentan los resultados del diseño, preparación y evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de concreto tradicional con reemplazos del 15% en masa de los agregados finos por residuos de llantas y microesferas, en relaciones residuos de llantas: microesferas de vidrio de 0:1, 1:1, 1:3, 3:1 y 1:0.

2. METODOLOGÍA

Caracterización de materiales

Para la preparación de las mezclas se utilizó cemento portland de uso general con una densidad específica de 3050 Kg/m³ acorde a la NTC 121 (Norma Técnica Colombiana) y agua de acueducto. Para los agregados se determinó la masa unitaria compacta NTC 92 [13], la densidad aparente del agregado fino NTC 237 [14], la densidad aparente del agregado grueso NTC 176 [15], la densidad del cemento NTC 221 [16] y la granulometría de los agregados acorde con la NTC 77 [17]. Para todas las mezclas se usó una relación agua/cemento de 0.58. Las microesferas con diámetro de 200 micras y una densidad de 2400 Kg/m³ fueron proporcionadas por FABCOM SAS. Los residuos de llantas en desuso fueron suministrados por la empresa 4R Soluciones Ambientales SAS, la densidad del material es de 1109 Kg/m³.

Diseño de la mezcla

El diseño de mezcla de concreto tradicional fue llevado a cabo usando los métodos ACI 211.18 (American Concrete Institute) [18] y RNL (Road Note Laboratory). Las cantidades de cada uno de los materiales se muestran en la Tabla 1. Se prepararon en total 6 mezclas, una mezcla de referencia y 5 mezclas con un reemplazo del 15% en masa de la arena, dos de ellas para estudiar el efecto individual del caucho y las microesferas y tres mezclas para analizar el efecto combinado de los residuos de llantas y las microesferas en relaciones de masa 1:1, 3:1 y 1:3 caucho: microesferas de vidrio como se muestra en la Tabla 2. La mezcla de referencia fue diseñada para alcanzar una resistencia promedio a la compresión de 28 MPa a la edad de 28 días.

Preparación de las mezclas de concreto

Para la preparación de las mezclas, el agregado grueso fue humedecido para alcanzar la condición SSS (Saturado Superficialmente Seco). Antes de la incorporación de los materiales, se humedeció el interior de la mezcladora. Durante la elaboración de las mezclas, en primer lugar, se mezclaron el agregado grueso, la arena y el residuo de llantas hasta obtener una mezcla homogénea. Después se adicionó el cemento, 75% del agua y se mezcló durante 4 minutos. Cuando se visualizaba una pasta cohesiva y fluida se agregaban las microesferas de vidrio (en el caso de mezclas con microesferas) y el 25% de agua restante. Para analizar las propiedades del concreto fresco se llevó a cabo la prueba de asentamiento según los requerimientos de la NTC 396 [19].

Preparación de los especímenes de concreto tradicional y modificado

Se prepararon en total 12 especímenes cilíndricos de 150 mm x 300 mm (diámetro y altura), de acuerdo con la metodología NTC 550 [20]. Antes de preparar los especímenes, el interior de los moldes fue cubierto por una capa fina de desmoldante para prevenir que el con-

creto se adhiera al molde. Todos los moldes de concreto se llenaron en tres capas iguales, cada una compactada con 25 golpes distribuidos en toda la superficie con una varilla de 16 mm de diámetro. Posteriormente, se golpeó el molde 15 veces con un martillo de goma con el fin de eliminar las burbujas de aire de cada capa. La última capa se enrasó con la varilla. La superficie de los moldes se cubrió con láminas de polietileno con el fin de mantener la humedad de los especímenes.

Curado de los especímenes cilíndricos

Después de 24 horas se retiró el molde de los cilindros y se colocaron en agua saturada con óxido de calcio a temperatura ambiente durante 28 días según NTC 550.

Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los concretos elaborados

Apoyados en el reglamento colombiano de construcción sismo resistente nsr-10, capítulo C.5 sección C.5.6.2.4, la resistencia a compresión se tomó como el promedio de dos muestras cilíndricas, de forma que se consideran las dimensiones de los especímenes cilíndricos (150 por 300 mm), los ensayos de resistencia a la compresión f'_c se realizaron por duplicado, en una prensa hidráulica HM de compresión de 1500 KN para cada una de las mezclas preparadas. La velocidad de carga fue de 0,6 MPa/s. El módulo de elasticidad y la densidad de los especímenes se evaluó tal como se describe en las ecuaciones (1) y (2) respectivamente. La ecuación 1 es aplicable para concretos cuya masa unitaria varíe entre 1440 y 2640 kg/m³ [21].

$$E_c = W_c^{1.5} 0.034 \sqrt{f'_c} E_c = W_c^{1.5} 0.034 \sqrt{f'_c} \text{ Ec. 1}$$

$$\rho = \frac{M}{V} \rho = \frac{M}{V} \text{ Ec. 2}$$

Donde f'_c es la resistencia a la compresión del concreto en MPa, E_c , módulo de elasticidad en MPa, ρ , densidad del concreto en Kg/m³, M , la masa del espécimen de concreto en Kg y V , volumen del cilindro en m³.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Caracterización de los materiales

La Fig. 1 muestra la distribución granulométrica de los agregados finos, gruesos y los residuos de llantas en desuso.

Los resultados de la Fig. 1 muestran que el agregado fino se encuentra dentro del rango recomendado para elaborar concretos según la NTC 174 [22], sin embargo, los agregados gruesos tienen una distribución granulométrica que se encuentra por fuera de los límites recomendados, motivo por el cual se procedió a realizar el diseño de la mezcla por el método de la NRL. Las cantidades de materiales necesarios para ambas metodologías se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Cantidades para el diseño de mezcla

Material	Método ACI Peso (Kg)	Volumen (m ³)	Método NRL Peso (Kg)	Volumen (m ³)
Cemento	417	0.137	417	0.137
Agua	196	0.196	196	0.196
A. grueso	1024	0.378	756	0.279
A. fino	743	0.274	1011	0.373

Con respecto a las cantidades, se encontró que con el método de la ACI se requiere un 58% de agregado grueso y 42 % de fino, mientras que en el método de la NRL se requiere 43% de agregado grueso y 57% de fino. Para las mezclas preparadas en ambas metodologías, se encontraron valores de la resistencia a la compresión de 18.3 MPa y 12.9 MPa, para el método de la ACI y de la NRL, respectivamente, efecto que está relacio-

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3283>

nado con el mayor porcentaje de agregados gruesos en la mezcla elaborada con el método de la ACI. De hecho, se espera que al día 7 el concreto alcance una resistencia del 65-70% de la resistencia esperada (28 MPa). Dada la resistencia alcanzada al día 7 en cada uno de los métodos, 65% en el método del ACI y 46% en el método de la NRL, las mezclas restantes se prepararon de acuerdo a la metodología del ACI.

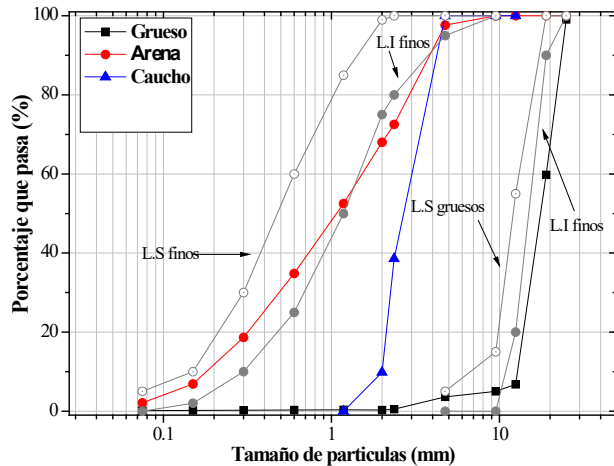


Fig. 1: Resultados del análisis granulométrico de los materiales

La Tabla 2 muestra las cantidades de material para cada una de las mezclas de concreto tradicional y modificado mediante la metodología ACI.

Tabla 2. Cantidades para el diseño de mezcla por m³ de concreto

Mezcla*	RL:M	Masa finos (Kg)	Masa RL (Kg)	Masa M (Kg)
C**	--	765	0	0
M1	1:0	644	112	0
M2	0:1	644	0	112
M3	1:1	644	56	56
M4	3:1	643	84	28
M5	1:3	643	28	84

RL:M. Relación de Residuos de llantas (RL) a microesferas (M).

*En todas las mezclas se utilizaron 1033 Kg de agregado grueso y 417 Kg de cemento.

** Concreto tradicional.

Asentamiento

Los resultados del asentamiento se presentan en la Fig. 2:

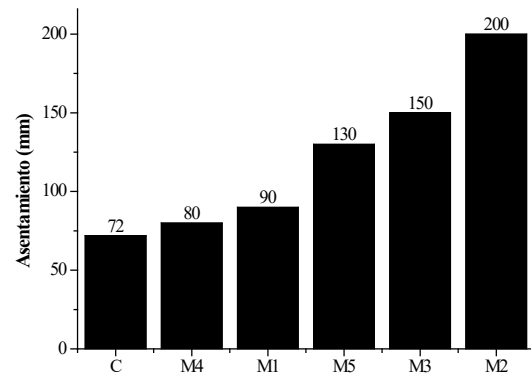


Fig. 2: Asentamiento de los especímenes de concreto

Los resultados de la Fig. 2 muestran que todas las mezclas registraron un asentamiento más alto con respecto a la mezcla de concreto tradicional. Las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5 poseen valores de asentamiento de 25% (18mm), 178% (128 mm), 108% (78 mm), 11% (8 mm) y 81% (58 mm) más altos que la mezcla de referencia, siendo la mezcla M2 (solo con microesferas) la que registra el valor más alto. Se puede observar que el asentamiento es directamente proporcional al aumento del contenido de microesferas, fenómeno que se atribuye a la forma esférica del material, de modo que permite una mejor interacción con los agregados y la pasta de concreto; de hecho, previamente se ha reportado que la forma esférica de las microesferas implica menor fricción entre las partículas y mayor fluidez de la mezcla [9].

Con respecto a las mezclas que poseen la adición de caucho y microesferas de vidrio, puede observarse que un aumento en el contenido de residuos de llantas genera una disminución en el asentamiento a causa de la disminución del porcentaje de microesferas, las cuales favorecen la manejabilidad de las mezclas. Adicionalmente, la reducción del asentamiento puede atribuirse a la textura rugosa que presenta la superficie de los residuos de llantas en desuso, incrementando la fricción con los demás componentes de la matriz de concreto. Además, la reducción del asentamiento está

relacionada con la capacidad de absorción de los residuos de llantas, las cuales absorben el agua libre en la mezcla para alcanzar la condición SSS. Inclusive, se ha reportado previamente que la disminución del agua libre en la mezcla se ve más afectada cuando las partículas de caucho son finas, a causa de su elevada área superficial [6], [23].

La Fig. 3 muestra la densidad saturada y superficialmente seca a los 28 días para las muestras de concreto de los especímenes de concretos preparados.

Los resultados de la Fig. 3 muestran que la adición de microesferas de vidrio y residuos de llantas disminuye la densidad de los concretos preparados en relación con la mezcla tradicional. De los resultados se puede observar que a medida que aumenta la cantidad de residuos de llantas, disminuye la densidad de los especímenes. Las mezclas M1, M2, M3, M4 y M5 registraron valores de 9.95%, 0.93%, 3.40%, 5.71% y 2.48% más bajos que los del concreto tradicional, respectivamente. La reducción en la densidad se atribuye a la menor densidad de los residuos de llantas (1109 Kg/m^3) y las microesferas de vidrio (2400 Kg/m^3), con relación a la densidad de los agregados finos (2710 Kg/m^3) y gruesos (2780 Kg/m^3). Adicionalmente, se ha reportado en trabajos previos que las partículas de polímeros generan una elevada porosidad en concretos modificados, a causa del aire atrapado por las partículas de caucho, de manera que aumenta el porcentaje de vacíos de aire, por ende, disminuye la densidad de los especímenes de concreto [24]. Los resultados encontrados indican que la disminución en la densidad es menor al 10%, lo cual está acorde con los resultados previamente reportados, [10], [12], [25], [26], donde la incorporación de microesferas de vidrio con densidades entre 150 Kg/m^3 hasta 900 Kg/m^3 , generó disminuciones en la densidad de los materiales preparados alrededor del 20%, sin embargo, las microesferas utilizadas por los autores presentaron densidades muy inferiores a las reportadas en este trabajo.

La Fig. 4 muestra los resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes preparados con diferentes sustituciones de los agregados finos.

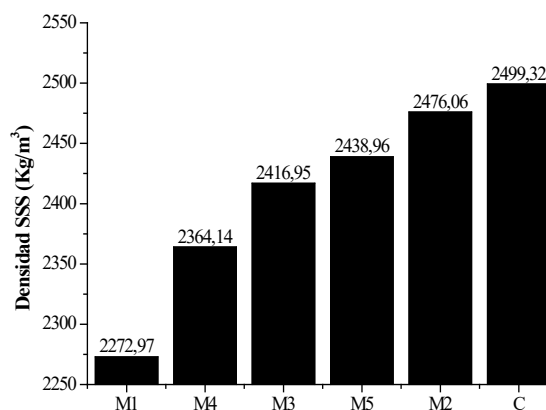


Fig. 3: Densidad de las mezclas de concreto preparadas

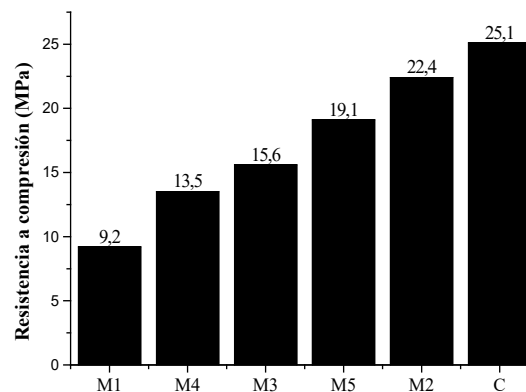


Fig. 4: Resistencia a la compresión de los especímenes de concreto

Los resultados de la Fig. 4 muestran que la resistencia del concreto es menor para el concreto preparado solo con residuos de llantas (63.4% menor a la referencia), efecto asociado con la menor rigidez y la menor resistencia (borosilicato de vidrio 61-64 GPa, elastómeros 0.001-0.02 GPa) de este material, en comparación con los agregados finos, lo que genera una menor capacidad de carga de las mezclas preparadas, además, la estructura química de los residuos de llantas (naturaleza orgánica), produce una menor adherencia con los componentes de la matriz de concreto (naturaleza inorgánica), en concordancia con reportes previos donde la textura superficial y la estructura química de polímeros se traduce en una menor adherencia de las partículas de polímeros, los agregados y la matriz de cemento, lo cual disminuye la resistencia del concreto [23]. Los resultados de la Fig. 4 muestran que para la mezcla de concreto que posee solo microesferas (M2)

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3283>

se encontró una resistencia a compresión de 22.4 MPa, cumpliendo el valor de la resistencia mínima para fines estructurales. Para los especímenes de concretos que poseen microesferas y residuos de llantas, se encontró que la resistencia a la compresión aumenta con el incremento de las microesferas. La mezcla M5 presentó el mejor comportamiento, con una resistencia de 19.1 MPa (91% de la resistencia encontrada en el concreto de referencia). Los resultados encontrados permiten deducir que las microesferas generan un efecto sinérgico positivo sobre la resistencia a la compresión. Este efecto está asociado con la forma esférica de las microesferas, las cuales rellenan los vacíos, disminuyen el contenido de aire y generan nuevos componentes en la matriz de concreto por la reacción química entre estas y el cemento, tal como ha sido reportado previamente en otros trabajos, en los que la adición de microesferas incrementó la adherencia entre los componentes del concreto y mejoró la resistencia a la compresión por reacción de las microesferas con los materiales presentes en el cemento [27].

Los resultados de la Fig. 5 muestran que las mezclas M1 y M2 presentaron el menor y el mayor módulo de elasticidad (11.18 y 19.83 GPa), lo cual permitió determinar que la disminución del módulo de elasticidad está relacionada con el tipo de sustituto empleado para los materiales tradicionales; este comportamiento se debe a que el módulo de elasticidad del concreto depende del módulo de elasticidad de cada uno de sus materiales constitutivos. Por tanto, agregados con un mayor módulo de elasticidad (microesferas) generan mezclas de concretos con un mayor módulo de elasticidad. En la Fig. 5 se puede observar que, en los especímenes preparados con residuos de llantas y microesferas, un mayor contenido de residuos de llantas genera un menor módulo de elasticidad relacionado con la menor rigidez presentada por este polímero; resultados que están en concordancia con la resistencia a la compresión y la densidad presentadas en las Fig. 3 y Fig. 4, respectivamente. Inclusive, los materiales con menor módulo de elasticidad presentan la menor resistencia y la menor densidad. Claramente se puede observar que la mezcla M4 presentó el menor módulo de elasticidad, propiedad que se ve

afectada por la menor adherencia entre el caucho y la matriz de cemento. En este trabajo, el comportamiento de las mezclas de concretos elaborados con microesferas no presentó el mismo comportamiento reportado en [12], donde se encontró que la disminución en el módulo de elasticidad fue inversamente proporcional al aumento del contenido de microesferas, en el que un aumento en el contenido de microesferas redujo el módulo de elasticidad, comportamiento causado por la menor densidad de las microesferas empleadas por los autores [12], que fueron de una densidad menor a las empleadas en este trabajo.

La Fig. 5 muestra los resultados del módulo de elasticidad de los materiales preparados.

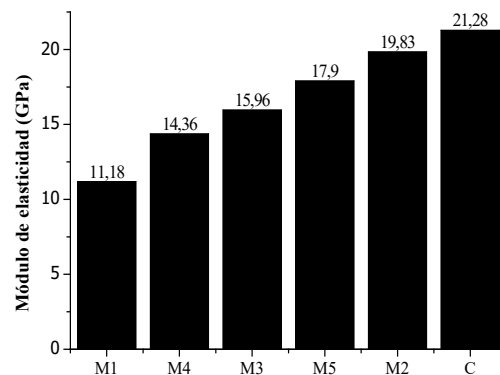


Fig. 5. Módulo de elasticidad de los materiales preparados

4. TRABAJOS FUTUROS

Dados los resultados potenciales encontrados en este trabajo, se observa un efecto sinérgico para concretos preparados con mezclas de residuos de llantas y microesferas. Se espera en próximas investigaciones adelantar ensayos experimentales enfocados en:

Preparación de especímenes de concreto tradicional, con microesferas y mezclas de residuos de llantas empleando agregados gruesos que cumplen con las especificaciones granulométricas recomendadas para la preparación de concretos estructurales.

Buscar la relación más adecuada de residuos de llantas: microesferas para preparar concretos con fines estructurales

Realizar ensayos de durabilidad bajo condiciones ambientales adversas y del comportamiento dinámico de concretos modificados con microesferas de vidrio y residuos de llantas frente a cargas accidentales (sismo y viento).

5. CONCLUSIONES

Se prepararon mezclas de concreto tradicional y modificado con residuos de llantas en desuso y microesferas de vidrio en reemplazo de los agregados finos. Se encontró que la modificación de los agregados finos por residuos de llantas y microesferas en forma individual o combinada genera una modificación de las propiedades de los concretos preparados; se halló que la muestra con reemplazo de microesferas presentó la mejor resistencia a la compresión de 22.4 MPa. Además, se observó que la adición de microesferas a los residuos de llantas generó un efecto sinérgico que mejoró la resistencia a la compresión, siendo la relación 1:3 de residuos de llantas a microesferas la que presenta la mejor resistencia a la compresión. Adicionalmente, el asentamiento se vio afectado por el contenido de microesferas y de residuos de llantas, siendo mayor para las mezclas con mayor contenido de microesferas. Además, la densidad fue inversamente proporcional al contenido de residuos de llantas. Los resultados encontrados estuvieron en concordancia con el cambio en el módulo de elasticidad de las muestras de concreto preparadas, el cual fue directamente proporcional al aumento en el contenido de microesferas. Los resultados obtenidos hasta el momento muestran que la sustitución de los agregados finos por microesferas y residuos de llantas tienen potencial para ser utilizados como material estructural, sin embargo, se requieren estudios experimentales adicionales que permitan mejorar la resistencia a la compresión del concreto modificado con microesferas y residuos de llantas. Las microesferas en relación masa 1:3 mostraron las mejores

resistencias del 7% por encima y del 7% por debajo, respectivamente, de la resistencia para ser considerados concretos estructurales (21 MPa).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto INV2219 por el apoyo financiero en el desarrollo de este trabajo de investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran la inexistencia de conflicto de interés con institución o asociación comercial de cualquier índole.

REFERENCIAS

- [1] A. Sivakhrina, A. Adesina, P.O. Awoyera, K. R. Kumar, "Green concrete: A review of recent developments". *Materials today Proceedings*, In press, Corrected proof. doi: 10.1016/j.matpr.2019.08.202 .
- [2] S. W. Yoo, G. S. Ryu, and J. F. Choo, "Evaluation of the effects of high-volume fly ash on the flexural behavior of reinforced concrete beams". *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 1132–1144. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.021
- [3] M. T. Hamza, and A. M. Hameed, "Recycling the construction and demolition waste to produce polymer concrete", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1003, 2018. doi: 10.1088/1742-6596/1003/1/012088
- [4] K. Afshinnia, and P. R. Rangaraju, "Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 117, pp. 263–272, 2016. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.072

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3283>

- [5] A. Meza, and S. Siddique, "Effect of aspect ratio and dosage on the flexural response of FRC with recycled fiber", *Construction and Building Materials*, vol. 213, pp. 286-291, 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.081
- [6] K. Rashid, A. Yazdanbakhsh, and M. Rehman, "Sustainable selection of the concrete incorporating recycled tire aggregate to be used as medium to low strength material", *Journal of Cleaner Production*, vol. 224, pp. 396-410, 2019. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.197
- [7] A. R. Khaloo, M. Dehestani, and P. Rahmatabadi, "Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire – rubber particles", *Waste Management*, vol. 28, no. 12, pp. 2472–2482, 2008. doi: 10.1016/j.wasman.2008.01.015
- [8] H. A. Torres Ospina, "Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho" (tesis de maestría), Escuela Colombia de Ingeniería Julio Garavito, 2014. Disponible en: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/169>
- [9] L. Lijuan, R. Shenghua, and Z. Lan, "Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles", *Construction and Building Materials*, vol. 70, pp. 291–308, 2014. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.105
- [10] S. Shahidan, E. Aminuddin, K. Mohd Noor, N. I. R. Ramzi Hannan, and N. A. Saiful Bahari, "Potential of Hollow Glass Microsphere as Cement Replacement for Lightweight Foam Concrete on Thermal Insulation Performance, in International Symposium on Civil and Environmental Engineering 2016 (ISCEE 2016), 2017. doi: 10.1051/mateconf/201710301014
- [11] A. L. Brooks, H. Zhou, and D. Hanna, "Comparative study of the mechanical and thermal properties of lightweight cementitious composites", *Construction and Build Materials*, vol. 159, pp. 316–328. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.102
- [12] A. Hanif, Z. Lu, Y. Cheng, S. Diao, and Z. Li, "Effects of Different Lightweight Functional Fillers for Use in Cementitious Composites", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 11, no. 1, pp. 99–113. doi: 10.1007/s40069-016-0184-1
- [13] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, "Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados", NTC 92, 1995.
- [14] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, "Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino", NTC 237, 1995. Colombia.
- [15] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, "Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso", NTC 176, 1995. Colombia.
- [16] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, "Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico", NTC 221, 2011. Colombia.
- [17] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, "Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos", NTC 77, 2007. Colombia.
- [18] ACI Committee, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", ACI 211.1-91. Unites States.
- [19] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, "Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto", NTC 396, 1992. Colombia.

- [20] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, "Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra", NTC 550, 2000. Colombia.
- [21] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica "Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente", 3ra ed. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- [22] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2000) NTC 174 Especificaciones de los agregados para concreto. Colombia.
- [23] H. Su, J. Yang, T-C. Ling, G. S. Ghataora, and S. Dirar, "Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes", *Journal of Cleaner Production*, vol. 91, pp. 288-296. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.12.022
- [24] C. Bing, and L. Ning, "Experimental Research on Properties of Fresh and Hardened Rubberized Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, no. 8, 2013. doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000923
- [25] F. Aslani F, L. Wang, and M. Zheng, "The effect of carbon nanofibers on fresh and mechanical properties of lightweight engineered cementitious composite using hollow glass microspheres", *Journal of Composite Materials*, vol. 53, no. 17, pp. 2447-2464, 2019. doi: 10.1177/0021998319827078
- [26]. D. Oreshkin, V. Semenov, and T. Rozovskaya, "Properties of light-weight extruded concrete with hollow glass microspheres", *Procedia Engineering*, vol. 153, pp. 638-643, 2016. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.214
- [27] V. A. Perfilov, D. V. Oreshkin, and V. S. Semenov, "Environmentally Safe Mortar and Grouting Solutions with Hollow Glass Microspheres", *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 1479-1484, 2016. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.086