

Evaluación de las propiedades mecánicas de paneles de ferrocemento con agregado fino reciclado¹

Evaluation of mechanical properties of panels ferrocement with recycled fine aggregate

Recibido: 08-09-2015 Aceptado: 25-11-2015

Resumen

Este trabajo describe la obtención de paneles de ferrocemento con la incorporación de agregado fino reciclado (AFR) obtenidos a partir de la trituración de escombros de concreto. Se partió de la obtención de un mortero referencia que cumpliera con la resistencia mínima a la compresión requerida para esta aplicación (25 MPa a los 28 días de curado) y asentamiento máximo de 6 cm. Se estudió el efecto sobre la resistencia a la compresión de este mortero de referencia, de la incorporación de AFR en niveles de 25%, 50%, 75% y 100%. Posteriormente y con base en resultados óptimos se elaboraron paneles de ferrocemento utilizando barras de acero, malla hexagonal y malla zaranda (ZAG). Los resultados obtenidos revelan la posibilidad de sustituir totalmente la arena natural por AFR en la fabricación de paneles de ferrocemento con resistencias a la flexión de hasta 34,16 MPa y morteros con resistencias a la compresión superiores a 7,3% a los basados en un 100% de arena natural.

Palabras Claves: Paneles, resistencia a la flexión, arena natural.

Abstract

This paper describes the obtention of panels of ferrocement with the incorporation of recycled fine aggregate (SFR) from the grinding of concrete rubble. We used a reference mortar that met the minimum resistance to the understanding required for this application (25 Mpa at 28 days) and maximum settlement of 6 cm. This study shows the effect on the compressive strength of this reference mortar, of the incorporation of AFR at levels of 25, 50, 75 and 100%. Then, based upon optimal results panels of ferrocement were drawn using rods of steel, hexagonal

Pedro Enrique Matthey Centeno²
Rafael Andrés Robayo Salazar³
Julián Alejandro Torres Rico⁴
Pavel Andrey Ramos Barragán⁵
Silvio Delvasto Arjona⁶

¹ Proyecto: Reciclar Escombros en Concreto. Fecha de inicio: Febrero 2013. Investigación en curso. Financiado por la Universidad del Valle, convocatoria 2-2013 de la Vicerrectoría de Investigaciones, VRI C.I. 747.

² Venezolano, Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales. Ms. C. GMC (Grupo Materiales Compuestos), CENM (Centro de Excelencia de Nuevos Materiales) Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correspondencia: pedro.matthey@correounivalle.edu.co. Teléfono: +57 (2) 331 2251. Celular: 304 383 5133. Calle 13 No. 100-00, Edf. 349.

³ Colombiano, Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales. GMC (Grupo Materiales Compuestos), CENM (Centro de Excelencia de Nuevos Materiales), Universidad del Valle, Cali, Colombia.

⁴ Colombiano, Ingeniero de Materiales de la Universidad del Valle. GMC (Grupo Materiales Compuestos), Universidad del Valle, Cali, Colombia.

⁵ Colombiano, Ingeniero de Materiales de la Universidad del Valle. GMC (Grupo Materiales Compuestos), Universidad del Valle, Cali, Colombia.

⁶ Colombiano, Profesor Titular, PhD. GMC (Grupo Materiales Compuestos), CENM (Centro de Excelencia de Nuevos Materiales), Universidad del Valle, Cali, Colombia.

mesh and mesh shale shaker (ZAG). The results revealed the possibility of completely replace natural sand by AFR in the manufacture of ferrocement panels with resistance to Flex up to 31.16 MPa and mortars with up to 7.3% higher compressive strength compared to those based on a 100% natural sand.

Keywords: Panels; flexural strength; natural sand.

Introducción

El ferrocemento, patentado en 1855 por el francés Joseph Louis Lambot, es un término utilizado para definir un tipo particular de hormigón armado compuesto por una lámina delgada de mortero de arena y cemento hidráulico, el cual se proyecta a presión o se aplica manualmente sobre una armadura de acero y telas de mallas de alambre de pequeño diámetro.

La armadura está altamente subdividida y distribuida en toda la masa de mortero dando lugar a una alta resistencia, compacidad y elasticidad que difiere del concreto reforzado convencional en la manera en la cual se encuentran dispuestos los elementos de reforzamiento. Un material que difiere del concreto reforzado convencional en la manera en la cual se encuentran dispuestos los elementos de reforzamiento. Su versatilidad en cuanto a fabricación y uso han permitido que varios países lo hayan adoptado como solución para viviendas y construcciones como: Colombia, México, Cuba, Brasil, India, Tailandia y Estados Unidos, grupo de países pioneros en la construcción de este tipo de viviendas (Wainshtok, 1994; Naaman, 2000; Bedoya, 2005; Delvasto *et al.* 2005; Comoglio, 2002; El-Diasity *et al.* 2015).

En el ferrocemento los refuerzos se encuentran muy cercanos entre sí, en múltiples capas de mallas de alambre (como malla hexagonal, malla electrosoldada, metal desplegado, malla cuadrada, etc.), y ocasionalmente barras de acero completamente embebidas en una matriz cementicia que no permite el uso de agregados de gran tamaño; este aspecto le otorga al mortero ferrocemento una consistencia pastosa que le permite adherirse fácilmente al entramado de las mallas sin el uso de cimbra o encofrado, generando excelentes propiedades de permeabilidad que han hecho posible usar esta técnica en la construcción de estructuras como: depósitos, silos, reservorios, piscinas, canales, domos, edificaciones, viviendas, barcos, estructuras marinas, mobiliarios, entre

otros (Quintero, 2006; Gonzalez y Guerrero, 2008; Bedoya, 1996). En efecto, las características de los agregados son quizás el aspecto más importante a tener en cuenta a la hora de diseñar y producir el ferrocemento (Isikdag, 2015; Shannag y Mourad, 2012). Esto ha motivado la búsqueda de agregados finos alternativos que permitan la obtención de mejores acabados superficiales y de propiedades físicas y mecánicas específicas. Por otro lado, el aprovechamiento de diferentes residuos tales como los escombros en la obtención de agregados, es actualmente un tema de gran interés particularmente en países que poseen deficiencias en el manejo y gestión de este tipo de residuos, tal como es el caso de Colombia, ya que su aprovechamiento puede contribuir positivamente a la reducción del impacto ambiental generado por la inadecuada disposición final de estos residuos y en particular cuando esta tecnología admite la utilización masiva del desecho.

En la actualidad, los mayores generadores de escombros a nivel mundial son Estados Unidos, China y los países que conforman la comunidad europea. Se estima que China genera 200 millones de toneladas al año, aunque esta cifra puede ser superior debido a los desastres naturales de los últimos años (Xiao *et al.* 2012), y Estados Unidos alrededor de 143 millones de toneladas (Yuan *et al.* 2012). En la Unión Europea el volumen de desechos de construcción y demolición (C&D) representa aproximadamente el 35% del total de los desechos generados y se estima en 750 millones de toneladas al año (European Commission, 2015); en algunos países tales como Alemania, Dinamarca y Países Bajos la reutilización alcanza el 80%, en el resto no supera en promedio el 30% (Bravo *et al.* 2015). En Colombia, aunque no existe un estudio estadístico nacional, se reporta que en algunas ciudades con mayor crecimiento demográfico, tal como la ciudad de Bogotá, se generan hasta 12 millones de toneladas al año y no están siendo utilizadas (Castaño *et al.* 2013; Robayo *et al.* 2015). El diseño de un sistema efectivo para el manejo de estos desechos que sea ambientalmente sano y económicamente factible implica una adecuada cuantificación de los mismos (Wu *et al.* 2014).

El objetivo de esta investigación es evaluar la incorporación de agregado fino reciclado (AFR) obtenido a partir de la conminución de escombros de concreto sobre el comportamiento mecánico de paneles de ferrocemento. El AFR fue incorporado como sustituyente parcial y total de la arena natural en proporciones del 25%, 50%, 75% y 100% en peso.

Materiales y metodología experimental

Materiales

Cemento

El cemento que se usó para la elaboración de las mezclas fue el cemento portland Tipo I (Argos) de uso general. Su caracterización química se realizó mediante fluorescencia de rayos X, mientras que las físicas son las reportadas en la ficha técnica del producto según el fabricante. Los resultados se pueden observar en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Composición química del cemento.

Componente	% en peso	Componente	% en peso
CaO	63,99	S	1,01
SiO ₂	21,70	P ₂ O ₅	0,18
Al ₂ O ₃	5,44	Na ₂ O	0,31
Fe ₂ O ₃	4,39	K ₂ O	0,30
MgO	1,52	Zn	0,02

Fuente: Los autores

Tabla 2. Propiedades físicas del cemento Tipo I (ARGOS).

Ensayo	Norma	Resultado
Finura Blaine del cemento	NTC 33	2800 cm ² /gr
Consistencia normal	NTC 110	0,25
Fluidez de los morteros	NTC 111	85 min
Tiempo de fraguado inicial	NTC 118	45 min
Tiempo de fraguado final	NTC 118	420 min
Peso específico del cemento	NTC 221	3,09 gr/cm ³
Resistencia a compresión a 28 días	NTC 220 26 MPa	

Fuente: Los autores

Agregados finos

Se utilizaron dos tipos de agregados finos; naturales y reciclados (AFR). Los agregados naturales utilizados, cumplen con las especificaciones de las Normas Técnicas Colombianas (NTC) para la producción de mezclas de concreto. Los AFR fueron obtenidos mediante la trituración de escombros de concreto usando un molino de martillos y posteriormente fueron tamizados a través de una malla 4,75 mm para obtener una distribución granulométrica semejante al agregado fino natural. La caracterización física y la distribución granulométrica de los agregados

utilizados se pueden observar en las Tablas 3, 4 y la Figura 1.

El AFR presentó un módulo de finura de 3,6 (mayor al especificado para el ferrocemento, que debe estar entre 2,4 y 3,3) debido al proceso de conminución. Sin embargo, cabe aclarar que este valor de módulo de finura está enfocado en garantizar el paso libre del agregado a través de la abertura de la malla de refuerzo. De acuerdo a lo anterior aseguramos que el agregado pasa libremente por la abertura del refuerzo. Se propone la granulometría dada como óptima para la fabricación del ferrocemento (Naaman, 2000). De igual forma el AFR presentó una morfología angular producto del proceso de molturación al cual fue expuesto; esta característica se puede observar en la Figura 1.

Diseño de mezclas

Con el fin de determinar la dosificación ideal del mortero se evaluó el efecto de la cantidad de cemento y las relaciones *agua : cemento* y *cemento : arena* sobre la resistencia a la compresión a 7 días de curado conforme a los parámetros establecidos en la norma NTC 1377. Los resultados obtenidos (promedio de tres probetas) se muestran en la Tabla 5.

De acuerdo con los requerimientos de resistencia mínima a la compresión de 25 MPa a los 28 días de curado y consumos mínimos de cementante para su obtención, la mezcla que cumple satisfactoriamente con estos requisitos es la mezcla No. 13 (Namaan, 2000; Saavedra, 2002; Wainshtok 2010; Maldonado, 2005). Esta mezcla contiene una cantidad de cementante de 400 Kg/m³; cantidad menor a la especificada que podría generar una disminución en costos de producción. Por otro lado, la relación *agua : cemento* utilizada en esta mezcla fue de 0,38, lo cual promueve la obtención de buenas propiedades mecánicas.

Como parámetro de selección adicional se midió el asentamiento o slump de la mezcla (13) por medio del cono de Abrams de acuerdo a las especificaciones y procedimiento descritos en la norma NTC 396 (Figura 2).

La mezcla evaluada presentó buena cohesión y no mostró ningún rasgo de exudación y/o sangrado, tiene una consistencia semi-seca con un valor de slump de 5 cm que permite cumplir con las especificaciones técnicas de diseño para ferrocemento en su estado fresco que indican que este no debe exceder los 6 cm.

Con base en estos resultados, se elaboraron morteros

y ferrocementos con sustitución parcial y total del agregado fino (arena) por agregado fino reciclado (AFR), con el fin de evaluar sobre estas mezclas el efecto del AFR en la fabricación de ferrocemento.

Tabla 3. Características físicas de los agregados finos.

Ensayo	Norma	Resultado	
		Natural	AFR
Densidad aparente Bulk	NTC 237	2,58 (x10 ³) kg/m ³	2,42(x10 ³) kg/m ³
Densidad nominal	NTC 237	2,66 (x10 ³) kg/m ³	2,81(x10 ³) kg/m ³
Densidad (SSS)	NTC 237	2,61 (x10 ³) kg/m ³	2,56(x10 ³) kg/m ³
Absorción %	NTC 237	1,12 %	5,65 %
Impurezas orgánicas	NTC 127	Placa orgánica No. 2	Placa orgánica No. 2
Módulo de finura	NTC 77	2,6	3,6
Masa unitaria suelta	NTC 92	1,49 (x10 ³) kg/m ³	1,33 (x10 ³) kg/m ³
Masa unitaria compacta	NTC 92	1,62 (x10 ³) kg/m ³	1,43 (x10 ³) kg/m ³

Fuente: Los autores

Tabla 4. Distribución granulométrica de los agregados finos naturales y reciclados

No. De tamiz	Tamaño (mm)	% pasa	
		Arena natural	AFR
4	4,75	100	100
8	2,36	61,69	91,4
16	1,18	33,34	69,64
30	0,6	20,02	55,98
50	0,3	10,36	22,7
100	0,15	4,88	1,69
200	0,08	3,24	1,18
Fondo	0	0	

Fuente: Los autores

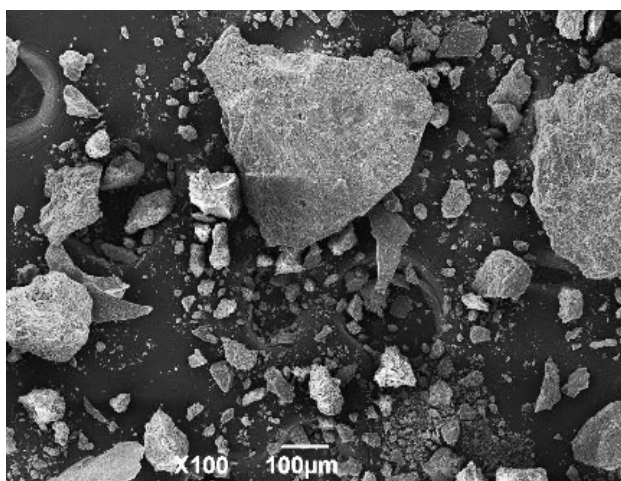


Figura 1. SEM de los finos provenientes de escombros (AFR)

Fuente: Los autores

Tabla 5. Resultados de resistencia a la compresión (R.C) a 7 días

Mezcla	Cemento (Kg/m ³)	Relación (Agua/Cemento)	Relación (Cemento/Arena)	R.C (MPa)
1	500	0,5	2	16,02
2	500	0,35	1,5	34,97
3	500	0,35	2	25,76
4	500	0,5	1,5	17,35
5	500	0,6	2	11,56
6	400	0,5	2	
7	800	0,5	2	15,41
8	500	0,4	1,5	30,45
9	400	0,35	2	22,01
10	400	0,35	1,5	21,46
11	350	0,35	2	9,553
12	400	0,4	2	17,48
13	400	0,38	1,5	27,58

Fuente: Los autores

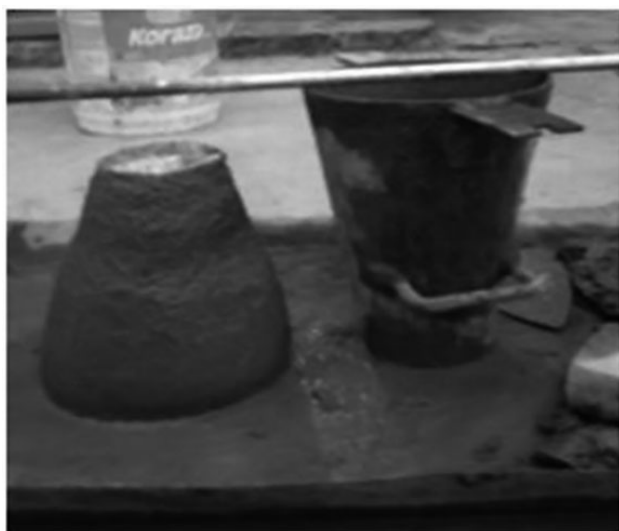


Figura 2. Medida de Asentamiento mezcla 13
Fuente: Los autores

Resultados y análisis

Resistencia a la compresión de los morteros

El esfuerzo de flexión es básicamente el esfuerzo crítico que reciben este tipo de paneles en el momento en que se encuentran en obra; a pesar de esto, es importante

saber la resistencia a la compresión que tiene el mortero para de esta forma predecir el comportamiento que tendrá el mismo en el momento en que se encuentre enlazado con las mallas y reforzamientos del ferrocemento; por tal razón en la Figura 3 se muestran los resultados de resistencia a la compresión de los morteros elaborados con niveles de sustitución de arena natural por AFR del 0%, 25%, 50%, 75% y 100% bajo las proporciones de mezclas mostradas en la tabla 6.

Tabla 6. Dosificación de los morteros elaborados con AFR.

Material	Patrón	Peso (g)			
		25% AFR	50% AFR	75% AFR	100% AFR
Cemento	300	300	300	300	300
Arena natural	450	337,5	225	112,5	0
Agua	114	114	114	114	114
AFR	0	112,5	225	337,5	450

Fuente: Los autores

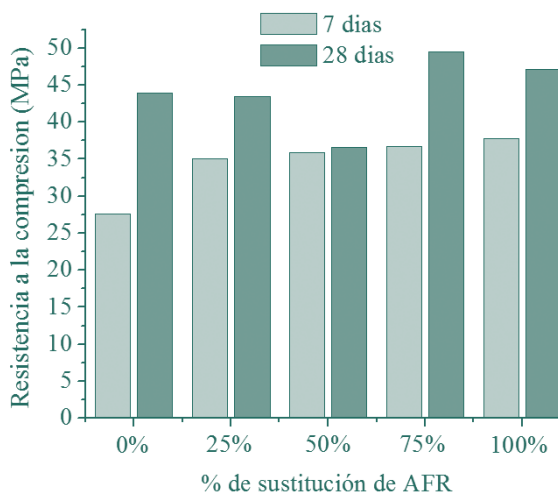


Figura 3. Resistencia a la compresión de la mezcla de mortero con AFR en sustituciones del 25%, 50%, 75% y 100% a 7 y 28 días de curado.

Fuente: Los autores

En la Figura 3 se observa que la mezcla con 100% de reemplazo de arena por AFR presentó una resistencia a la compresión promedio de 47,1 MPa a los 28 días de curado, resistencia mayor en comparación con la de la mezcla patrón (43,9 MPa). Este aumento de 7,3% en la resistencia se debe principalmente a que los finos provenientes de escombros forman una matriz con mayor adherencia debido a la rehidratación del cemento contenido en este, lo cual proporciona sitios de nucleación para la formación de nuevos productos de hidratación, lo que sugiere que la adición de finos de escombros reciclados contribuye al

desarrollo de propiedades mecánicas (Florea, 2013) (Loffy y Al-Fayez, 2015; Ledesma, E.F. *et al*, 2014; Jiménez, J.R. *et al*, 2013).

Una vez obtenidos los resultados mecánicos para los morteros elaborados con AFR se procedió a fabricar ferrocemento con las condiciones y características específicas que involucran al recubrimiento de la malla, la armadura para los paneles, el volumen de refuerzo, la superficie específica y el área efectiva de refuerzo; aspectos que deben tenerse en cuenta para mantenerse dentro de los límites que las normas de ferrocemento establecen para este tipo de elementos (Tabla 7).

Tabla 7. Parámetros para la fabricación de paneles de ferrocemento.

Tipo de Refuerzo	Recubrimiento de la malla	Volumen de refuerzo	Superficie específica	Área específica
Malla Hexagonal	5 mm	3,5%	0,6 cm ⁻¹ (6 capas)	0,709 cm ²
Malla Zaranda	5 mm	1,9%	0,54 cm ⁻¹ (4 capas)	0,556 cm ²

Fuente: Los autores

Propiedades mecánicas del ferrocemento

Resistencia a la flexión

Para la evaluación de la resistencia a la flexión se elaboraron tres prototipos para cada uno de los paneles estudiados; los paneles tienen 54 cm de largo, 15 cm de ancho y 3 cm de espesor; el ensayo de resistencia a la flexión se realizó de acuerdo a los parámetros establecidos en la norma ASTM C293. Las dosificaciones para cada uno de los tipos de paneles se muestran en la Tabla 8. La resistencia a la flexión o módulo de ruptura promedio para cada uno de los paneles, evaluada a 28 días de curado, se presenta en la Tabla 9.

En la Tabla 9 se puede apreciar un aumento del 458% en el módulo de ruptura en el caso del *Panel patrón con malla Zaranda (ZAG)* en comparación con el *Panel sin refuerzo*, aspecto que referencia lo importante del ferrocemento en este tipo de elementos de construcción. Cabe destacar que el comportamiento del panel (ZAG) es muy similar que el presentado por el *Panel (ZAG) con AFR*. Por otro lado, el *Panel con barras de acero* presentó un módulo de ruptura de 29,66 MPa, un comportamiento entre un 10% y 15% por debajo del *Panel patrón con malla Zaranda (ZAG)*

y *Panel con malla hexagonal* respectivamente. En efecto, el uso de mallas genera un incremento en la tenacidad y en el módulo de ruptura del material. Adicionalmente fue posible observar que los paneles sin mallas presentaron un comportamiento frágil, debido a que sin la presencia de mallas no se garantiza la distribución de los esfuerzos por todo el ferrocemento, y por lo tanto en el momento del ensayo de flexión la armadura puede ser expuesta tal y como se muestra en la Figura 4.

Tabla 8. Dosificaciones óptimas para la fabricación de paneles.

Material	Proporciones de las mezclas para paneles Peso (g)	
	100% arena natural	100 % AFR
Cemento	2041.2	2041.2
Arena natural	3061.8	-
Agua	775.65	775.65
AFR	-	3061.8

Fuente: Los autores

Tabla 9. Resultados del ensayo de resistencia a la flexión a los 28 días de curado (módulos de ruptura).

Mezcla	Carga máxima promedio (N)	Módulo de ruptura promedio (MPa)
Panel sin refuerzo	1429,5	7,14
Panel con barras de acero	5932,5	29,66
Panel con malla Hexagonal	6832,5	34,16
Panel patrón con malla Zaranda(ZAG)	6555	32,77
Panel (ZAG) con AFR	6345	31,73

Fuente: Los autores



Figura 4. Falla frágil del panel reforzado con varilla sin mallas.
Fuente: Los autores

Tenacidad en flexión

El cálculo de la tenacidad en flexión se realizó según los parámetros establecidos en la norma ASTM C1018; esta norma describe el cálculo del índice de tenacidad para cualquier valor de extensión que resulte de interés. Los resultados de tenacidad e índice de tenacidad obtenidos para los diferentes paneles a 28 días de curado se muestran en la Tabla 10.

Los valores de tenacidad presentados en la Tabla 10 muestran el efecto que tiene el uso de mallas y barras de acero en la composición del ferrocemento. Se puede observar que todos los paneles de ferrocemento alcanzan valores de tenacidad mucho mayores que los obtenidos por el Panel sin refuerzo (Alenezi, E.F. *et al.* 2015). El panel sin refuerzo presentó una fractura frágil además de una tenacidad a la primera fisura (δ_i) de 699,52 N.mm. El Panel patrón con malla Zaranda (ZAG) y el Panel con malla hexagonal presentaron un incremento de la tenacidad en una deformación $3\delta_i$ del 15679% y 17603 % respectivamente en comparación con la tenacidad del Panel sin refuerzo. En efecto, para una deformación de $3\delta_i$ los paneles con malla hexagonal presentaron un buen comportamiento, no obstante el costo de este tipo de mallas es una de sus principales limitantes; por tal razón se elige como refuerzo óptimo la malla tipo zaranda (ZAG) la cual presenta un buen comportamiento mecánico. Por otro lado, el Panel (ZAG) con AFR arrojó resultados similares a los obtenidos por los paneles zaranda (ZAG) referencia, estos resultados concuerdan con los obtenidos anteriormente.

Interfase fibra-matriz

El estudio de la zona de interfase entre la malla y la matriz se realizó mediante la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB); esta técnica de caracterización permite observar la microestructura de la pasta de cemento endurecida, así como la morfología de las diferentes fases anhidras e hidratadas. La observación se realizó sobre la superficie de la matriz donde se apreciaba la huella dejada por la malla una vez fracturada la matriz de mortero.

En la Figura 5 (arriba) se puede observar que la matriz presenta una buena densificación y baja porosidad, esto es característico de matrices con alto contenido de silicatos de calcio hidratados (C-S-H), principal producto de hidratación y responsable del desarrollo de resistencias. Estas características promueven una mayor adherencia de las fibras y mallas de refuerzo a la matriz cementicia, contribuyendo a la obtención de un adecuado comportamiento mecánico del material reforzado. En la Figura 5 (abajo) se puede observar que el panel (ZAG) con AFR presenta una mayor porosidad comparado con la matriz referencia, según Butler *et al.* (2011) los AFR tienen densidades más bajas, partículas de forma más angular y superficie con textura rugosa que incrementan la capacidad de absorción de agua; por otro lado, la mayor porosidad del mortero adherido a los AFR contribuye a la obtención de porosidades elevadas.

Tabla 10. Resultados del ensayo de tenacidad en flexión para los diferentes tipos paneles de ferrocemento a 28 días de curado.

Mezcla	P_i (N)	δ_i (mm)	Tenacidad (N.mm)			Índice de tenacidad
			δ_i	$2\delta_i$	$3\delta_i$	15
Panel sin refuerzo	1429,5	1,01	699,52	-	-	-
Panel con barras de acero	5932,5	7,68	29080,22	62926,00	79936,00	2,75
Panel con malla Hexagonal	6832,5	9,36	40153,60	90444,30	123138,15	3,06
Panel patrón con malla Zaranda (ZAG)	6555,0	7,44	28667,10	71987,40	109684,65	3,83
Panel (ZAG) con AFR	6345,0	7,32	27382,05	70440,75	105439,65	3,85

Fuente: Los autores

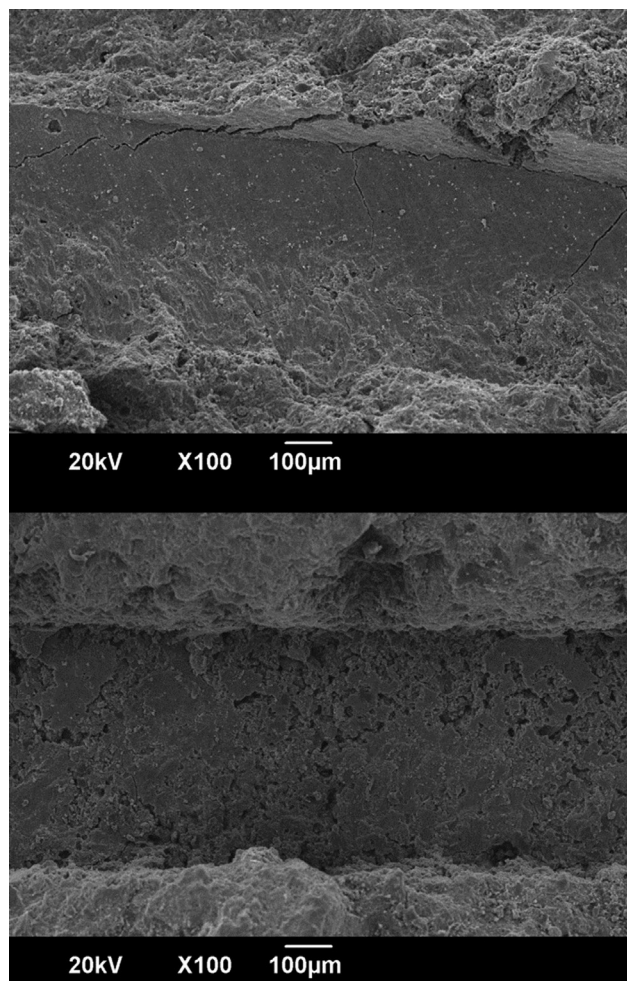


Figura 5. SEM interfase malla-matriz y zona adyacente; arriba: Panel patrón Zaranda (ZAG) y abajo: Panel (ZAG) con AFR.
Fuente: Los autores

Conclusiones

La incorporación de agregado fino reciclado (AFR), obtenido a partir de la trituración de escombros de concreto, generó incrementos de hasta el 7,3% en la resistencia a la compresión de los morteros, aun cuando los niveles de reemplazo fueron del 100%. Esto permitió el logro de resistencias a la compresión de hasta 47,1 MPa a los 28 días de curado utilizando un 100% de AFR como sustituto de la arena natural; resistencia que supera la requerida para este tipo de aplicación (25 MPa). Estos resultados permitieron la elaboración de paneles de ferrocemento con la incorporación de un 100% de AFR, logrando así valores de resistencia a la flexión de hasta 34,16 MPa e incrementos de la tenacidad hasta valores de 109684,65 N.mm ($3\delta_i$) utilizando malla hexagonal. Se observó que la presencia de malla hexagonal incrementó en un 378% el módulo de ruptura en flexión de los paneles elaborados con un 100%

de AFR. En general, los resultados obtenidos revelan la posibilidad sustituir totalmente la arena natural por AFR en la fabricación de paneles de ferrocemento y brinda una alternativa sostenible para el aprovechamiento, como agregado fino, de este tipo de residuos.

Agradecimientos

Los autores, miembros del Grupo de Materiales Compuestos (GMC) agradecen a la Universidad del Valle (Cali, Colombia); Proyecto VRI C.I.747 "Reciclar Escombros en Concreto" financiado por la Universidad del Valle, convocatoria 2-2013 de la Vicerrectoría de Investigaciones y al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) por el apoyo recibido durante la ejecución de esta investigación.

Bibliografía

- Alenezi, K., Tahir, M.M., Alhajri, T., Badr, M.R.K., Mirza, J. (2015). Behavior of shear connectors in composites column of cold-formed Steel with lipped C-channel assembled with ferrocement jacket. *Construction and building materials*. Vol. 84. pp 39-45.
- Bedoya, D. A. (1996). *Ferrocemento: Optimización de Mezclas y Mecanismos de Construcción y Vaciado*. Trabajo dirigido de grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Bedoya, D. A. (2005). *Estudio de resistencia y vulnerabilidad sísmicas de viviendas de bajo costo estructuradas con ferrocemento*. Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J., Evangelista, L. (2015). Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of cleaner production* 99: 59-74.
- Butler, L., West, J., Tighe, S. (2011). *The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement*. University of Waterloo, Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Waterloo, Canada.

- Castaño, J., Rodríguez, R., Lasso, L., Gómez, A., Ocampo, S. (2013). Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: Perspectivas y limitantes. *Revista Tecnura* 17 (38): 121-129.
- Comoglio, S., Saleme, H., Méndez, J. (2002). *Ferrocemento: Un material apropiado a nuestro medio*. Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de Tucumán. Tucumán-Argentina.
- Delvasto, S., Guerrero, P., Ante, A., Garay, M. (2005). *Ferrocemento: una solución para cubiertas en vivienda de interés social*. I Coloquio de investigación en materiales no convencionales. Grupo de Materiales Compuestos, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- El-Diasity, M., Okail, H., Kamal, O., Said, M. (2015). Structural performance of confined masonry walls retrofitted using ferrocemento and GFRP under in-plane cyclic loading. *Engineering Structures* 94: 54-69.
- European Commission. (2015). *Resource Efficient Use of Mixed Wastes; Environment, Waste, Studies*. Recuperado de : http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/mixed_waste.htm
- Florea, M., Ning, Z., Brouwers, H. (2013). *Activation of liberated concrete fines and their application in mortars*. Department of the Built Environment, Unit Building Physics and Services, Eindhoven University of Technology. The Netherlands
- González, L y Guerrero, A. (2008). *Conceptos generales sobre ferrocemento*. Módulo para la asignatura Estructuras y Materiales de Construcción. Universidad nacional de Colombia sede Palmira. Facultad de ingeniería y administración. Palmira-Colombia.
- Isikdag, B. (2015). Characterization of lightweight ferrocemento panels containing expanded perlite-based mortar. *Construction and Building Materials*: 40: 15-23.
- Jiménez, J.R., Ayuso, J, Lopez, M, Fernandez, J.M., de Brito, J. (2013). Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortars manufacturing. *Construction and Building Materials*. 40: 679 – 690.
- Ledesma, E.F., Jimenez, J.R., Fernandez, J.M., Galvin, A.P., Agrela, F., Barbudo, A. (2014). Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregate. *Construction and building materials*. 71: 289-298.
- Lotfy, A y Al – Fayez, M. (2015). Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate. *Cement and concrete composites*. 61: 36 - 43.
- Maldonado, I. (2005). *Muros de contención de ferrocemento*. Tesis de grado para optar al título de ingeniero civil. Director: Sr. Hernán Armes. Universidad austral de chile. Facultad de ciencias de la ingeniería. Valdivia-chile.
- Naaman, A. (2000). *Ferrocement and laminated cementitious composites*, Michigan, Ed. Techno Press 3000.
- Quintero, A. (2006). *Captación de agua lluvia y almacenamiento en tanques de ferrocemento: manual técnico*. Primea edición. Instituto politécnico nacional. México.
- Robayo, R., Matthey, P., Burgos, D., Silva, Y., Delvasto, S. (2015). Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento. *Revista Tecnura*. 19(44):157-170.
- Saavedra, C. (2002). Ferrocemento: Innovación tecnológica económica para construir vivienda social. En: *Revista BIT*, pp. 21-23.
- Shannag, M.J., Mourad, S.M. (2012). Flowable high strength cementitious matrices for ferrocemento applications. *Construction and Building Materials*. pp. 933-939.
- Wainshtok, H. (1994). Lowcost housing built with ferrocement precast elements, *Journal of ferrocement*, 24(1): 2934.
- Wainshtok, H. (2010). *Ferrocemento, diseño y construcción*. 4ª edición. Offset Abad, Riobamba, Ecuador.

- Wu, Z., Yu, A., Shen, L., Liu, G. (2014). Quantifying construction and demolition waste: An analytical review. *Waste Management* 34: 1683-1692.
- Xiao, J., Li, W., Fan, Y., Huang, X. (2012). An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). *Construction and Building Materials* 31: 364-383.
- Yuan, H., Choni, A.R., Lu, Y., Shen, L. (2012). A dynamic model for assessing the effects of management strategies on the reduction of construction and demolition waste. *Waste Management* 32: 521-531.