

Utilizing Industrial Metal Wastes in One-Way Ribbed Reinforced Concrete Panels

Utilización de desechos metálicos industriales en los paneles de hormigón armado nervados unidireccionales

A. Alfeehan^{1*}, M. Mohammed *, M. Jasim*, U. Fadehl**, F. Habeeb**

* Mustansiriyah University – Baghdad, IRAQ

** Benha University – Benha, EGYPT

Fecha de Recepción: 23/09/2019

Fecha de Aceptación: 22/07/2020

PAG 246-256

Abstract

The elimination of metal waste generated during the initial manufacturing processes of industrial plants and workshop machines still a big problem. The current investigation dealt with adding the metal wastes produced by machinery processing such as iron filings powder, iron turning lathe, and aluminum turning lathe to improve the structural performance of oneway ribbed slab (RS) panels. Two types of concrete were considered in this work; Ferro cement (FER) and self-compacting concrete (SCC). The reinforced concrete panels with iron filings powder and iron turning lathe showed an increase in the ultimate load and a decrease in the central deflection, while the panels with aluminum turning lathe revealed an opposite behavior. The significant effect of using metal wastes is the superior resistance to crack propagation by increase the bond between fibers and cement mortar across the cracks. Adding the metal wastes with fine particles improves the concrete strength providing the workability must be controlled. Using the lathe as an iron fiber with a specific shape factor has a side effect due to fiber balling in the concrete mix. Also, high percentages of filings iron powder cause agglomerate the powder particles due to magnetic attraction forces.

Keywords: Recycled material, Waste, Fibre-reinforced concrete, Ferro cement, Self-compacting concrete

Resumen

La eliminación de los desechos metálicos generados durante los procesos iniciales de fabricación de plantas industriales y máquinas de talleres sigue siendo un gran problema. La investigación actual se ocupó de agregar los desechos metálicos producidos por el procesamiento de maquinaria, como el polvo de limaduras de hierro, el torno de hierro y el torno de aluminio para mejorar el rendimiento estructural de los paneles de losa nervada unidireccional (RS). Dos tipos de concreto fueron considerados en este trabajo; Ferrocemento (FER) y hormigón autocompactante (SCC). Los paneles de hormigón armado con polvo de limaduras de hierro y torno giratorio de hierro mostraron un aumento en la carga final y una disminución en la desviación central, mientras que los paneles con torno giratorio de aluminio revelaron un comportamiento opuesto. El efecto significativo del uso de los desechos metálicos es la resistencia superior a la propagación de grietas al aumentar la unión entre las fibras y el mortero de cemento a través de las grietas. Agregar los desechos metálicos con partículas finas mejora la resistencia del concreto, siempre que se controle la trabajabilidad. El uso del torno como fibra de hierro con un factor de forma específico tiene un efecto secundario debido a la formación de bolas de fibra en la mezcla de concreto. Además, los altos porcentajes de limaduras de polvo de hierro provocan la aglomeración de las partículas de polvo debido a las fuerzas de atracción magnética.

Palabras clave: Material reciclado, Residuos, Hormigón reforzado con fibra, Ferrocemento, Hormigón autocompactante

1. Introducción

En la naturaleza, el reciclaje está presente de diferentes modos. Los excrementos de algunos organismos son la fuente de alimento de otros. Los humanos han venido realizando el proceso de recuperación de residuos desde la antigüedad, por ejemplo, disolviendo materiales metálicos para convertirlos en nuevas herramientas. En los productos de hormigón, se han usado diversos tipos de residuos, tales como caucho, vidrio, polietileno, residuos de hierro, etc. La principal fuente de residuos metálicos proviene de los talleres y plantas industriales que trabajan con materias primas metálicas. Dichos residuos están prácticamente listos para ser usados y entrar en la industria estructural de acuerdo a sus diversos tamaños y formas según el tipo de industria, sin tener la necesidad de reciclar la energía. Por lo tanto, los residuos metálicos que se clasifican y ensamblan adquieren un valor relativamente alto a mínimo costo, especialmente los residuos de cobre, aluminio, plomo y hierro. En este estudio se investigó el efecto de la adición de residuos metálicos como limaduras de hierro, virutas de torno de hierro y de torno de aluminio en el comportamiento estructural de los paneles de losa nervada unidireccional de ferrocemento (FER) y de concreto autocompactante (SCC).

¹ Autor de correspondencia:

Mustansiriyah University – Baghdad, IRAQ
E-mail: drce_ashrafalfeehan@uomustansiriyah.edu.iq



(Asamoah y Kankam, 2009) ensayaron doce losas de concreto unidireccionales, reforzadas con barras de acero fresadas a partir de chatarra. Las losas fueron soportadas de manera simple y sometidas a cargas lineales distribuidas en los tercios. Los modos de falla se predijeron como: fluencia de las barras de tracción y trituración por flexión en el concreto. El factor de seguridad obtenido de los resultados es aproximadamente 1,3 y 0,94 para fisuración y colapso, respectivamente.

(Murali et al., 2012) estudió el efecto de la adición de los residuos provenientes de los tornos de talleres, como: tapas de botellas blandas, latas vacías y polvo de acero.

La razón de residuo usada como fibra fue del 1% del peso del concreto. Con todos los residuos provenientes del torno, latas vacías, tapas de botellas formaron tiras rectangulares de 3mm por 10mm. Al comparar los resultados con los del hormigón convencional, encontró que los bloques de concreto con polvo de acero aumentaron sus resistencias a la compresión y tracción en un 41,25% y 40,81%, respectivamente, mientras que la resistencia a la flexión de los bloques de hormigón armado con tapas de botellas aumentó en un 25,88%.

(Awanish y Shukla, 2013) intentaron determinar las características de la resistencia de las mezclas de concreto preparadas con agregados reciclados de residuos producidos por el Computer Numerical Control (CNC). El estudio buscaba determinar y comparar la influencia de diferentes porcentajes de residuos del CNC, mezclados con agregados reciclados, sobre la resistencia del hormigón. El 2% de los residuos del CNC mezclados con agregados reciclados mostró un incremento gradual de hasta un 50% en la resistencia a la compresión.

(Shrivastava y Joshi, 2014) realizaron estudios experimentales en hormigón armado con fibras de chatarra de acero (SSFRC, por su sigla en inglés), los que demostraron que la adición de chatarra de acero mejoraba las propiedades mecánicas del concreto endurecido. Asimismo, se encontró un incremento en las resistencias a la compresión, flexión, impacto, fatiga y tracción por compresión diametral al adicionar entre un 0,5 a 2 % de contenido de chatarra. Se observó un aumento en la resistencia a la flexión de un 40% y un considerable incremento en las resistencias a compresión y tracción al comparar el concreto común con el SSFRC.

En un estudio (Sezhiyan y Rajkumar, 2014) reemplazan el contenido de cemento por polvo de vidrio para evaluar la actividad puzolánica del polvo fino de vidrio en el hormigón. Los autores encontraron que el comportamiento puzolánico era evidente si el polvo de vidrio era menor a 100µm. El polvo de vidrio reacciona con el óxido de calcio en la primera etapa de hidratación para formar un gel de hidrato de silicato de calcio (CSH), formando así una matriz cementicia más densa. En presencia de las partículas de vidrio, el consumo temprano de álcalis disminuye la reacción álcali-sílice y aumenta la durabilidad del hormigón.

(Aghaee et al., 2015) usaron residuos de alambres de acero rescatados de los refuerzos de acero sobrantes de proyectos de edificación e infraestructura en hormigón estructural liviano. Los porcentajes de fibra usados en las muestras de concreto fueron de 0,25%, 0,5% y 0,75% por volumen de concreto. Los autores concluyeron que los residuos de alambre se podían usar como una buena alternativa frente a las fibras de acero en el hormigón estructural liviano.

(Satyaprakash et al., 2019) investigó la posibilidad de reemplazar por completo los agregados finos por limadura de hierro para reducir el efecto que produce la extracción de arena en el medio ambiente, encontrando un importante incremento en las resistencias a compresión y tracción por compresión diametral al reemplazar toda la arena por limaduras de hierro.

Los paneles de losa nervada, tanto uni como bidireccionales, presentan una resistencia adicional importante y los límites del tramo son considerablemente más largos que los de los paneles sólidos. El sistema nervado es mucho más económico que los otros sistemas de losa proporcionando vigas nervadas que se construyen con bloques huecos, encofrados removibles, o bien, formadores de vacíos permanentes o extraíbles. Los paneles de losa nervada unidireccionales se pueden usar para reducir el peso del panel de hormigón y, por lo tanto, minimizar el tamaño de las columnas, zapatas y de otros elementos portantes.

En este trabajo, se emplearon dos tipos de hormigón armado: ferrocemento (FER) y hormigón autocompactante (SCC); con cada uno de ellos se construyeron cinco paneles nervados para cada tipo de hormigón.

Los residuos minerales de diferentes formas y proporción son adecuados para usar en este tipo de hormigón porque la sección delgada de hormigón de ferrocemento suele no requerir diámetros grandes para el refuerzo principal; en cambio, el concreto autocompactante se caracteriza por auto consolidarse y requiere mucho acero de refuerzo.

En este estudio, se investigaron diez paneles de hormigón armado nervados unidireccionales para conocer el efecto de los parámetros experimentales. A la mezcla de hormigón, se le agregó, en diferentes porcentajes, de los tres tipos de desechos de maquinaria industrial: limaduras de hierro, virutas de torno de hierro y torno de aluminio. Todos los paneles nervados unidireccionales se moldearon y ensayaron con la carga distribuida uniformemente sobre la superficie.



2. Materiales and Metodos

2.1 Residuos metálicos

Los residuos son materiales indeseados, inutilizables o dañinos. Cualquier material que es descartado luego de un primer uso o que está defectuoso, no tiene valor ni uso. A diferencia de los residuos, la chatarra posee un valor monetario, especialmente los metales recuperados. Los residuos, al igual que los materiales no metálicos, también se recuperan mediante procesos de separación o reciclaje. Según la frase “LOS RESIDUOS NO SON BASURA”, los residuos metálicos, en especial, adquieren un valor relativamente alto a un costo mínimo en muchas aplicaciones. El residuo metálico usado en este trabajo proviene de procesos mecánicos industriales tales como las limaduras de hierro, virutas de torno de hierro y de aluminio. Los residuos metálicos se pueden usar como fibras ferrosas en remplazo de las fibras de acero en el hormigón armado con fibras. Se realizó un análisis basado en la norma ASTM C136 a una muestra de residuos metálicos. Las limaduras de hierro provenientes de un producto se pasaron por un tamiz de 1,18mm; las virutas del torno de hierro y del torno de aluminio del producto se pasaron por un tamiz de 4,75mm. La (Figura 1) muestra los residuos de la maquinaria como limaduras de hierro, virutas del torno de hierro y del torno de aluminio que se usaron para este estudio como materiales ferrosos adicionados a la mezcla de hormigón. En la (Tabla 1), se aprecian los diferentes porcentajes de residuos adicionados al volumen total.

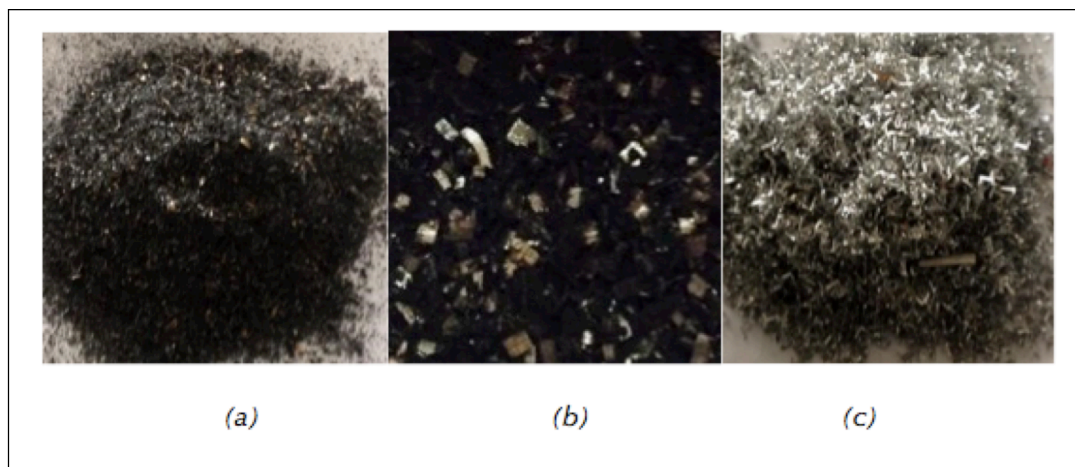


Figura 1. Residuos de la maquinaria industrial: (a) limaduras de hierro, (b) virutas del torno de hierro y (c) virutas del torno de aluminio

Tabla 1. Porcentajes de residuos metálicos agregados a las mezclas de hormigón

Muestra	Limaduras de hierro	Virutas torno de hierro	Virutas torno de aluminio
FER-RS1	-	-	-
FER-RS2	2%	-	-
FER-RS3	-	2%	-
FER-RS4	-	-	2%
FER-RS5	0.5%	0.5%	1%
SCC-RS1	-	-	-
SCC-RS2	2%	-	-
SCC-RS3	-	2%	-
SCC-RS4	-	-	2%
SCC-RS5	0.5%	0.5%	1%

2.2 Acero de refuerzo

Las nervaduras de un panel diseñado con un refuerzo máximo a flexión y sin refuerzo a cortante. Se usaron barras de acero conformadas (1 barra/nervadura) con un diámetro nominal de 16mm para el refuerzo principal en la cara en tracción. El ensayo de tracción de las barras de acero conformadas se realizó de acuerdo a las especificaciones de las normas ASTM.

2.3 Razón agua-cemento y superplastificante

Se usó una razón agua-cemento de 0,4 y una dosificación del 1,6% del peso del material cementicio de superplastificante conocido comercialmente como "TOPFLOW SP 603. Se eligió agregar el superplastificante después de adicionar el 60-70% del agua de mezclado. Lo anterior proporciona la aceleración requerida de resistencia ganada a edades temprana y tardía y es compatible con el cemento Portland que cumple con las normas internacionales. El concreto plastificado muestra un gran incremento en el asentamiento sin segregación. Lo anterior, entrega un tiempo necesario para moldear y terminar la superficie de hormigón. En todas las mezclas se usó agua corriente.

2.4 Ferrocemento

El ferrocemento es un material estructural compuesto que contiene una matriz de mortero de cemento reforzada con capas 2D o 3D de malla de alambre de diámetro pequeño distribuidas de manera uniforme en la sección transversal. La forma disponible localmente y más común es una malla cuadrada de acero galvanizado con un diámetro de 0,7mm y con espaciado de 10mm. A las mallas de alambre, se agregaron barras de refuerzo normal de 5mm de diámetro, espaciadas en forma esquelética (50 mm) en ambas direcciones para obtener una jaula de refuerzo rígida. Las mallas de acero se amarraron con las barras esqueléticas para reforzar la sección bridada del panel unidireccional.

El mortero de cemento se diseñó para lograr la resistencia adecuada, máxima densidad e impermeabilidad, con la suficiente trabajabilidad para minimizar los huecos. Se usó una razón cemento-arena de 1:2; arena amarilla natural pasada por tamiz No.8 (2,36 mm) según ASTM y cemento Portland normal Tipo 1.

2.5 Hormigón autocompactante

El hormigón autocompactante (SCC), también conocido como autoconsolidante, entrega propiedades superiores al concreto convencional. Las principales características del SCC son su naturaleza líquida, bajo nivel de ruido, construcción rápida, mejoras en la calidad y durabilidad, no requiere vibración, capacidad para llenar los espacios y pasa a través de las barras de refuerzo por su propio peso (Gensel et al., 2011) y (Parra et al., 2011).

Para la mezcla de hormigón se usó cemento Portland normal Tipo 1, arena natural y grava triturada con un tamaño máximo de 10mm. En las mezclas SCC, normalmente, se usa caliza pulverizada como relleno puzolánico para optimizar el comportamiento del flujo y el empacamiento de las partículas de la pasta cementicia. El tamaño de las partículas de la caliza pulverizada fue menor a 0,125mm (Tamiz N°200), cumpliendo con la norma EFNARC (2002) sobre recomendaciones de sistemas de hormigón y productos químicos especializados para la construcción. Para la caliza pulverizada, se adoptó un 10% en peso del cemento. El acero de refuerzo para la sección bridada de los paneles era 5mm con espaciado de 50mm en ambas direcciones, igual que en los paneles de ferrocemento.

2.6 Molde para los paneles nervados

Para formar la sección corrugada del molde, se plegaron láminas de acero galvanizado de 1,7mm de espesor. Localmente, se fabricaron dos moldes de 1000mm de largo, con las secciones dimensionadas señaladas en la (Figura 2).



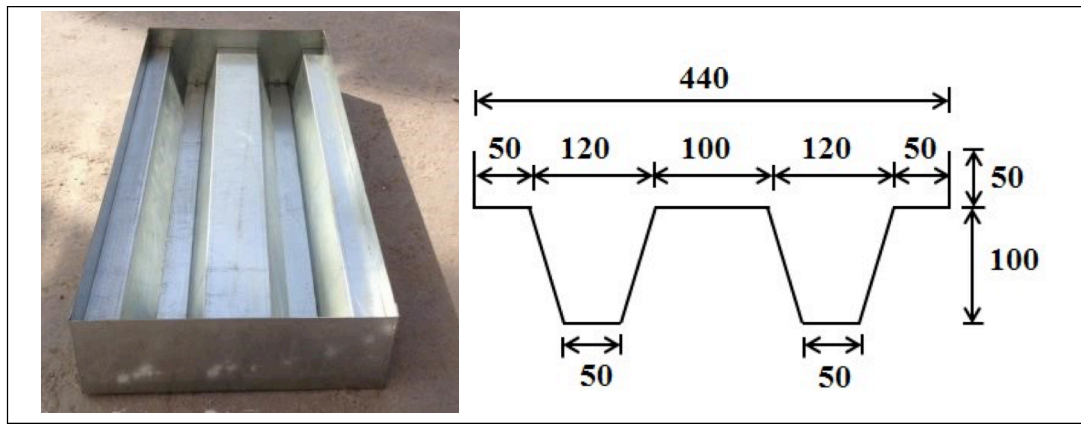


Figura 2. Molde de acero galvanizado y dimensiones de las secciones (en mm) para los paneles nervados

La (Figura 3) muestra el colado de los paneles nervados. Para el SCC, los procedimientos de mezclado se hicieron según (Aljabri, 2005). La (Figura 4) presenta una vista general de los paneles moldeados.



Figura 3. Colado de los paneles nervados de SCC y FER



Figura 4. Paneles nervados post colado

Luego de completar el periodo de curado requerido, todos los paneles fueron ensayados usando una máquina de ensayos hidráulica de 3000 kN de capacidad bajo cargas estáticas monótonas hasta la carga de falla. Los paneles fueron ensayados como vigas soportadas de manera simple, con un tramo libre de 900mm y bajo cargas distribuidas uniformemente. En cada etapa de carga de 2 kN, se observó una desviación vertical en el tramo medio y se registró con un comparador con una precisión de 0,01mm. Cuando apareció la primera fisura, se registró la carga correspondiente. Se aplicaron incrementos de carga hasta fallar.

3. Resultados

Se analizaron los resultados de los ensayos experimentales. La (Tabla 2) presenta los resultados obtenidos para la resistencia a fluencia, resistencia máxima y módulo de elasticidad de la malla de alambre y de las barras planas de acero.

Asimismo, se analizaron los resultados de las muestras de control tanto para las mezclas de FER y de SCC para conocer sus propiedades mecánicas. Los resultados de las resistencias promedio para tres cubos (50mm), tres cilindros (75x150mm) y tres prismas (40x40x160mm) de las mezclas de FER así como para tres cubos (150mm), tres cilindros (150x300mm) y tres prismas (100x100x500mm) de las mezclas de SCC se muestran en la (Tabla 3).

Tabla 2. Características de las mallas de alambre y de las barras de acero

Tipo de acero	Resist. a fluencia (MPa)	Resist. última (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
Malla cuadrada, alambre 0,7mm ø	315	520	69000
Barra plana 5mm ø	510	590	198750
Barra conformada 16mm ø	610	724	205000

Tabla 3. Propiedades mecánicas de las muestras de control

Muestra	Cubo. Resist. a compresión a 28 días fcu (MPa)	Cilindro. Resist. a compresión a 28 días, fc (MPa)	Módulo de ruptura fr (MPa)
FER-RS1	34,8	30,2	3,72
FER-RS2	43,4	36,7	4,54
FER-RS3	39,5	32,9	4,3
FER-RS4	17,4	14,1	3,1
FER-RS5	21,3	17,7	3,61
SCC-RS1	38,4	33,2	4,2
SCC-RS2	47,5	40,2	4,62
SCC-RS3	42,7	34,8	4,4
SCC-RS4	19,2	15,3	2,9
SCC-RS5	24,6	19,3	3,72

La (Figura 5(a)) (Figura 5(b)) muestra el efecto de los residuos en las propiedades de los paneles en FER y SCC respectivamente. La adición de limaduras de hierro y virutas de torno de hierro mejora la resistencia a la compresión y resistencia a la ruptura, mientras que las virutas del torno de aluminio muestran un efecto opuesto. La justificación de esta mejora podría deberse a la presencia de materiales ferrosos bien distribuidos que actúan como las fibras de acero que reducen la posibilidad de fallas locales y demora las cargas últimas de fisuración.



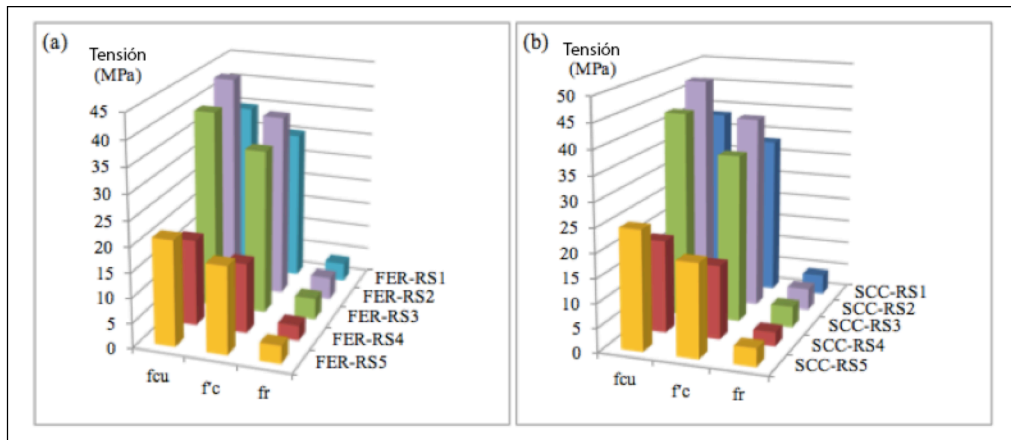


Figura 5. Valores de las propiedades mecánicas (a) muestras con FER y (b) muestras con SCC

La (Tabla 4) muestra los resultados de los ensayos de los paneles nervados para la primera carga de fisuración P_{cr} y última carga P_u .

Tabla 4. Primera y última carga de fisuración y deflexiones

Muestra	Carga de fisuración P (kN)	Deflexión por fisuración Δ (mm)	Carga máxima P (kN)	Deflexión máxima Δ (mm)	Factor de ductilidad
FER-RS1	20	1,35	52	7,8	5,78
FER-RS2	28	1,13	68	3,27	2,89
FER-RS3	24	0,63	64	2,98	4,73
FER-RS4	14	0,96	34	6,9	7,18
FER-RS5	16	1,61	42	5,02	3,11
SCC-RS1	30	0,88	72	6,25	7,1
SCC-RS2	36	1,05	102	4,4	4,19
SCC-RS3	34	1,44	92	5,75	3,99
SCC-RS4	24	1,45	52	4,39	3,02
SCC-RS5	32	2,5	58	7,5	3

La (Figura 6) demuestra que el residuo de hierro promueve la fisuración y carga máxima. Por otra parte, el efecto del residuo de aluminio disminuye los valores de la fisuración y carga máxima.

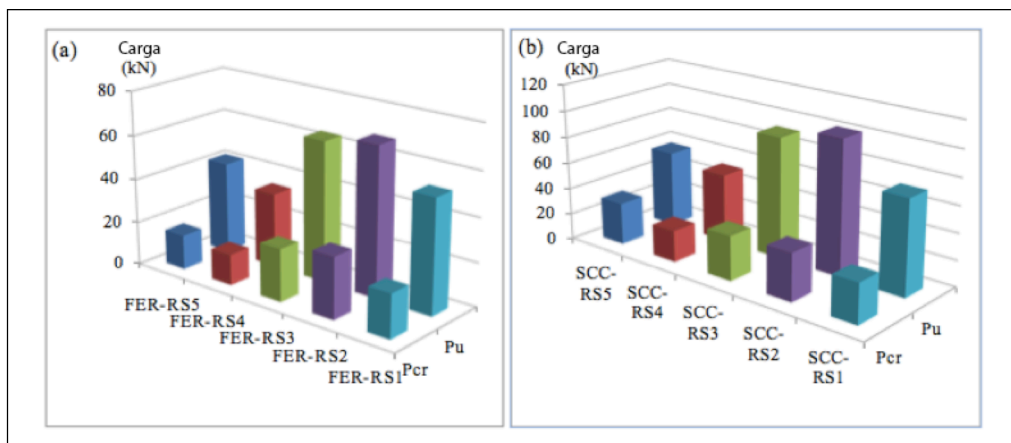


Figura 6. Cargas de fisuración y máximas para paneles (a) de FER y (b) SCC

De manera general, la (Figura 7) muestra que la fisuración y deflexión máxima disminuye con la presencia de residuos de hierro, en cambio, se produce el efecto contrario con los residuos de aluminio en todos los paneles nervados.

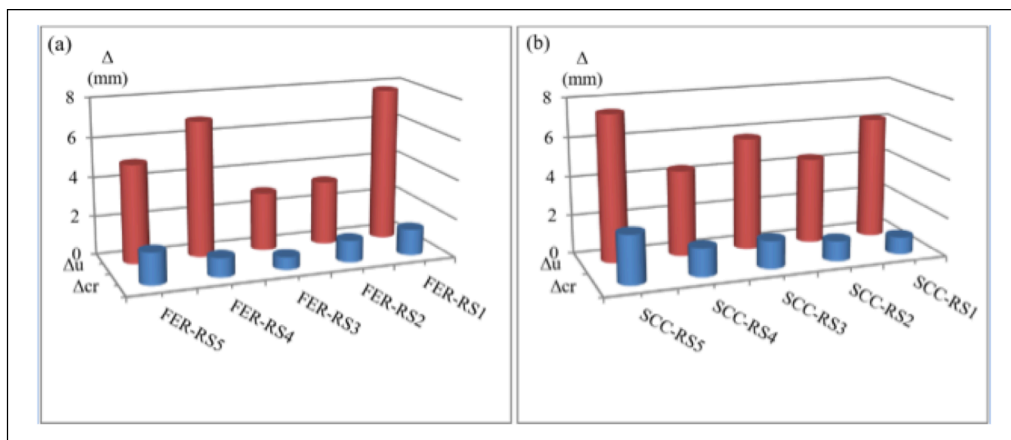


Figura 7. Fisuración y deflexión máxima para los paneles de (a) FER y (b) SCC

La (Figura 8) muestra una comparación carga-deflexión para los paneles nervados de FER y SCC respectivamente. Todos los modos de falla se produjeron en la nervadura cerca de los apoyos, como por ejemplo fisuras diagonales por cizallamiento del refuerzo, como se aprecia en la (Figura 9).

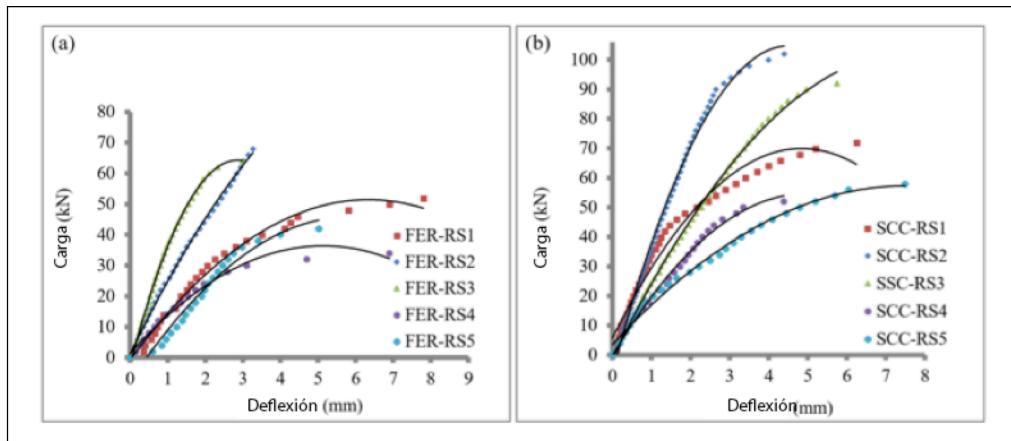


Figura 8. Curvas carga-deflexión de los paneles de (a) FER y (b) SCC



Figura 9. Modo de falla por cizallamiento del refuerzo en la nervadura

4. Discusión

La propiedad más importante del hormigón armado con residuos metálicos es su mejor resistencia a la propagación de las fisuras. Al igual que otras fibras, los residuos metálicos poseen resistencia a la tracción y mayor extensibilidad y pueden mantener unida la matriz incluso después de fisurada. A diferencia del refuerzo superior e inferior, la distribución al azar de las fibras de residuos es más efectiva en términos de absorción de la energía de impacto y resistencia a la fisuración además de su capacidad para controlar la formación de fisuras (Muda et al., 2016).

La adición de materiales finos mejora la resistencia del concreto siempre que se controle la trabajabilidad. Para conservar la trabajabilidad en presencia de grandes cantidades de partículas finas, se requieren altas dosis de aditivo. El incremento en la cantidad de fibras de acero en las mezclas de SCC promueve la resistencia a la compresión y reduce el flujo de asentamiento de la mezcla fresca (Majain, 2018). Se encontró que el SCC posee la capacidad de deformar su forma rápidamente bajo su propio peso, incluso al usar hasta un 2% de residuos metálicos finos o gruesos. Sin embargo, otros investigadores han concluido que el incremento en el contenido de fibras de neumáticos de acero reciclado mejora la resistencia a la flexión, pero reduce la resistencia a la compresión (Hamza et al., 2018).

Las resistencias a la flexión, compresión y tracción por compresión diametral del hormigón endurecido mejoró al usar fibras de residuos de acero en el SCC, con el aumento en la fracción de volumen de las fibras (Koroglu, 2017). La adición de fibras de acero recicladas disminuyó el flujo de asentamiento del SCC, y tanto el contenido como la longitud de las fibras de acero recicladas afectaron las resistencias a la compresión y flexión del SCC (Younis et al., 2018).



Las características de resistencia del hormigón aumentaron al agregar hasta un 1,5% en peso de viruta del torno; sobre ese porcentaje, se notó una leve reducción en las propiedades de resistencia del hormigón normal M20 (Qureshi et al., 2016).

Al remplazar parcialmente el agregado fino por residuos de hierro, (Krikar et al., 2018) encontraron que un 12% del residuo de hierro era más eficiente tanto en la resistencia a la compresión como a la flexión y que el concreto alcanzaba su resistencia máxima en un menor tiempo.

(Girskas y Nagrockien, 2016) demostraron que el remplazo de agregados finos por virutas de cables de acero produce menor absorción de agua y una mayor resistencia a la compresión en las probetas de hormigón ajustadas. Además, observaron que los parámetros de porosidad cambiaron en las probetas de concreto con viruta de acero. Al mejorar la porosidad cerrada, mejora la resistencia al hielo-deshielo de las probetas de hormigón modificadas.

En este estudio, uno de los beneficios importantes parece ser el uso de residuos metálicos en los paneles de hormigón armado nervados, como fibra ferrosa, al incrementar la carga máxima y disminuir la deflexión central en los paneles nervados con contenido de limaduras y torno de hierro, en cambio, se produce el efecto opuesto en los paneles con contenido de torno de aluminio, con una mejora esperada del aislamiento acústico y térmico debido a la expansión en el volumen y porosidad de la sección.

El incremento en las resistencias a la compresión y a la flexión al usar limaduras de hierro podría deberse a la buena distribución del polvo de limadura de hierro. El porcentaje de aumento en la resistencia a la compresión de las muestras con contenido de torno de hierro fue menor que el de las muestras con polvo de limadura de hierro debido a la dificultad de distribuir las fibras en la mezcla de hormigón por sus formas irregulares en comparación con la mezcla de concreto densa con contenido de limaduras de hierro.

El uso de virutas como fibra de hierro con un factor de forma específico tiene un efecto lateral debido a la formación de bolas de fibra en la mezcla de hormigón. Además, el uso de limadura, como polvo de hierro en un porcentaje alto, provoca la aglomeración de las partículas de polvo debido a las fuerzas de atracción magnética. La adición de limaduras de hierro y de virutas de hierro aumenta la unión entre las fibras de hierro y el mortero de cemento a través de las fisuras mejorando las propiedades mecánicas del hormigón endurecido. La propagación de las fisuras es resistida por las fibras de hierro que se extienden por las fisuras al azar y evitan la falla repentina.

Todas las comparaciones de deflexión fueron calculadas al mismo valor de carga, que representa los valores de deflexión de la carga máxima menor. Los paneles de ferrocemento con polvo de limadura y virutas de torno de hierro mostraron un incremento en la carga máxima de un 31% y 23%, y una disminución en la deformación central de un 58% y 62% respectivamente; en cambio, los paneles de ferrocemento con virutas de torno de aluminio mostraron una disminución en la carga última de un 35% y una disminución de la deflexión central de un 12%.

Los paneles de SCC con polvo de limadura y virutas de hierro mostraron un incremento en la carga última de un 42% y 28% y una disminución en la deflexión central de un 30% y 8% respectivamente; mientras que los paneles de SCC con virutas de aluminio mostraron una disminución en la carga máxima de un 28% y una disminución en la deflexión central de un 29%. La carga máxima de los paneles de SCC fue mayor que la carga máxima de los paneles de FER. La presencia de agregados gruesos y la alta trabajabilidad en el SCC puede reducir la aglomeración y formación de bolas de los residuos de limaduras y virutas en la mezcla de hormigón y contribuir a mejorar el comportamiento estructural mediante la distribución relativamente uniforme de los residuos.

5. Conclusiones

El uso de residuos de hierro en las mezclas de hormigón armado mejora el comportamiento estructural aumentando la capacidad de carga máxima y disminuyendo la deflexión máxima salvo en las muestras que contenían residuos de aluminio que mostraron un comportamiento opuesto.

Todos los paneles nervados de FER y SCC fallaron por tensión de corte. La falla de cortante ocurrió por fisuración diagonal en las nervaduras cerca de los apoyos en forma de grietas diagonales en la nervadura.

La existencia de residuos de aluminio en las mezclas de hormigón juega un rol dominante en la reducción de la carga máxima incluso en presencia de otros residuos de hierro.

El efecto de agregar residuos de hierro mejora la ductilidad y la resistencia a tracción del concreto. Es útil y adecuado remplazar las costosas fibras de acero por tipos de residuos de hierro.

El comportamiento de los paneles nervados de SCC demostró una mayor carga máxima que los de FER. La buena distribución y la forma de los residuos juegan un papel importante para mejorar las resistencias del hormigón.

Se debe tener en cuenta el problema de corrosión por lo que la superficie de hormigón debe ser tratada con recubrimientos protectores.



6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo brindado en este trabajo por el colega de ingeniería de la Universidad Mustansiriyah (www.uomustansiriyah.edu.iq), Bagdad, Iraq.

7. Referencias

- Aghaee, K.; Yazdi, M.A.; Tsavdaridis, K. D. (2015).** Investigation into the mechanical properties of structural light-weight concrete reinforced with waste steel wires. *Magazine of Concrete Research*, 67 (4), 197-205.
- Al-Jabri, L. A. (2005).** The Influences of Mineral Admixtures and Steel Fibers on the Fresh and Hardened Properties of SCC (Unpublished MSc thesis). Baghdad-Iraq. Mustansiriyah University.
- Asamoah, M.A.; Kankam, C.K. (2009).** Flexural behavior of one-way concrete slabs reinforced with steel bars milled from scrap metals. *Materials and Design*, 30, 1737-1742.
- EFNARC (2002).** European Federation Dedicated to Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete, Surrey, U.K.
- Gensel, O.; Brostow, W.; Datashvili, T.; Thedford, M. (2011).** Workability and Mechanical Performance of Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete with Fly Ash. *Composite Interfaces*, 18, 169-184, DOI:10.1163/092764411X567567.
- Gharrib Noori, K.; Hashim Ibrahim, H. (2018, 26 February).** Mechanical properties of concrete using iron waste as a partial replacement of sand. In 4th International engineering conference on developments in civil and computer engineering applications (pp 204-215). Erbil, Iraq. DOI:10.23918/iec2018.16.
- Girskas, G.; Nagrockien, D. (2016).** The use of steel cord scrap in concrete. *Construction science*, 18, 22-26. DOI:10.1515/cons-2016-0004.
- Hamza, B.; Kenai, S.; Menadi, B. (2018, 7 August).** The influence of recycled steel fibers on self-compacting concrete performance. In 14th International Conference on concrete engineering and technology. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Köroğlu, M.A. (2018).** Behavior of composite self-compacting concrete (SCC) reinforced with steel wires from waste tires. *Journal of Construction*, 17 (3), 473-483. DOI:10.7764/RDLC.17.3.484
- Majain, N.; Rahman, A.; Mohamed, R.; Adnan, A. (2018, 13 November).** Effect of steel fibers on self-compacting concrete slump flow and compressive strength. In 10th Asia Pacific structural engineering and construction conference (pp. 50-57). Langkawi, Malaysia. DOI:10.1088/1757-899X/513/1/012007.
- Muda, Z.; Kamal, N.; Syamsir, A.; Yang, C. et al. (2016, 23 February).** Effect of Steel Fibres Distribution on Impact Resistance Performance of Steel Fibre Reinforced Concrete. In International conference on advances in renewable energy and technologies (pp. 145). Putrajaya, Malaysia, 32.
- Murali, G.; Vardhan, C.; Prabu, P.; Mohammed, Z. et al. (2012).** Experimental investigation on fiber reinforced concrete using waste materials. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2 (2), 278-283.
- Qureshi, Z.; Raina, Y.; Rufaie, S. (2016).** Strength Characteristics Analysis of Concrete Reinforced With Lathe Machine Scrap. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 4, 210-217.
- Parra, C.; Valcuende, M.; Gomez, F. (2011).** Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. *Construction Discussion and Building materials*, 25, 201-207. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.037.
- Satyaprakash; Helmandb, P.; Saini, S. (2019).** Mechanical properties of concrete in presence of Iron filings as complete replacement of fine aggregates. *Materials Today: Proceedings* 15, 536-545.
- Sezhiyan, T.; Rajkumar, R. (2014).** Study on the properties of high strength concrete using glass powder and turning lathe scrap. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3 (2), 96-101.
- Shrivastava, P.; Joshi, Y. (2014).** Reuse of turning lathe waste steel scrap in concrete pavements. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4 (12), 45-54.
- Shukla, A. (2013).** Application of CNC waste with recycled aggregate in concrete mix. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3 (4), 1026-1031.
- Younis, K.; Ahmed, F.; Najim, K. (2018).** Self-Compacting Concrete Reinforced with Steel Fibers from Scrap Tires: Rheological and Mechanical Properties. *Eurasian Journal of Science & Engineering*, 4 (1). DOI:10.23918/eajse.v4i1sip1.

