



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstrucion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

ROBAYO, R.; MATTEY, P.; DELVASTO, S.

Comportamiento mecánico de un concreto fluido adicionado con ceniza de cascarrilla de arroz (CCA) y
reforzado con fibras de acero

Revista de la Construcción, vol. 12, núm. 2, noviembre, 2013, pp. 139-151
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127629284011>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

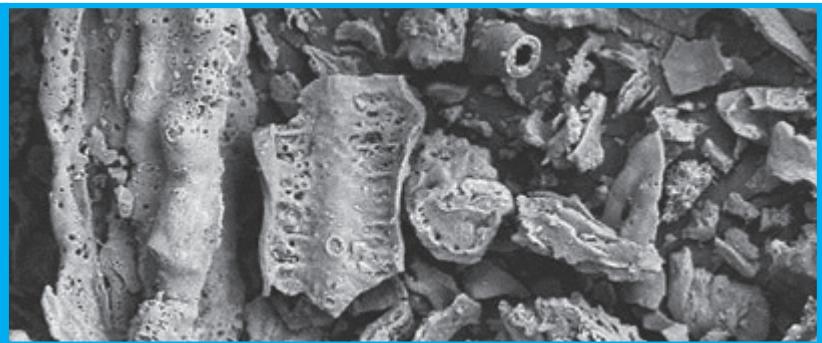
redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Mechanical Behavior of a
Fluid Concrete added with
Rice Husk Ash (RHA) and
Reinforced with Steel Fibers*

Comportamiento mecánico de un concreto fluido adicionado con ceniza de cascarilla de arroz (CCA) y reforzado con fibras de acero



Autores

ROBAYO, R. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales.
Calle13 # 100-00, Barrio Meléndez, Ciudad Universitaria, Edificio
349, Cali, Colombia
rafael.robayo@correounivale.edu.co

MATTEY, P. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales.
pedromattey@gmail.com

DELVASTO, S. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales.
silviodelvasto@hotmail.com

Fecha de recepción 26/2/2013

Fecha de aceptación 1/8/2013

Código interno RDLC 0098

Resumen

En los últimos años, la industria de la construcción ha venido adicionando materiales puzolánicos y fibras de refuerzo al concreto convencional con la finalidad de mejorar su desempeño y de disminuir el consumo de cemento. El estudio del comportamiento mecánico de los concretos fibrorreforzados es un tema clave para optimizar y potenciar el uso de este material en la industria de la construcción. En este trabajo, se realiza un estudio experimental sobre la influencia que tiene la incorporación de volúmenes bajos de fibras de acero (V_f : 0,3%, 0,5%, y 0,7%) en las propiedades mecánicas de un concreto

fluido adicionado con un 20% de CCA como reemplazo parcial del cemento. Con base a los resultados obtenidos, se puede afirmar que la incorporación del 0,7% de fibras de acero al concreto adicionado generó un incremento del 1026% en la tenacidad, del 42% en la resistencia a la tracción y del 12% en el módulo de elasticidad. Las características del concreto adicionado y reforzado con fibras de acero sugieren la posibilidad de su utilización para pavimentación de vías y abren nuevas posibilidades para otros campos de aplicación de este material en el sector de la construcción.

Palabras clave: Concreto fluido, Concreto fibrorreforzado, Ceniza de cascarilla de arroz (CCA).

Abstract

In the latest years, the modern industry of construction has been using portland cement concrete with addition of pozzolanic materials and reinforcing fibers (FRPC) in order to improve its properties and decrease the consume of Portland cement. This paper presents the results of an experimental study about the influence that the incorporation of low volumes of steel fibers (V_f : 0,3%, 0,5%, and 0,7%) has on the mechanical properties of a fluid concrete added with 20% of rice husk ash (RHA) as partial

replacement of portland cement. Based on the obtained results, it is possible to affirm that the incorporation of 0,7% of steel fibers into the concrete generated 1026% of increase in toughness, 42% in the tensile strength and 12% in the modulus of elasticity. The characteristics of the investigated FRPC suggest the possibility of their use for road paving and opens new possibilities for other fields of application of this material in the construction sector.

Keywords: Fluid concrete, fiber reinforced concrete, Rice Husk Ash (RHA).

1. Introducción

En la industria de la construcción moderna es cada vez más común el uso de fibras de acero para el refuerzo de matrices cementicias, en donde la asociación del concreto y las fibras proporciona un sólido y único material desde el punto de vista mecánico.

La incorporación de fibras de refuerzo en una mezcla de concreto es una solución eficiente para mejorar el desempeño mecánico y la durabilidad del concreto de cemento portland en estado endurecido, al reducir y controlar la propagación de las microgrietas generadas por la retracción y permitir la redistribución de los esfuerzos internos que tienden a fisurar la matriz cementicia. Al mismo tiempo que se puede lograr un incremento en la capacidad de carga postagrietamiento, permitiendo así, que el material soporte cargas hasta valores más altos de deformación con el aumento de la ductilidad y la tenacidad del material compuesto. Por lo tanto, el beneficio mecánico de la incorporación de fibras como material de refuerzo en el concreto es el incremento de algunas de las propiedades del compuesto obtenido, tales como la resistencia a los esfuerzos de flexotensión, la tenacidad y el módulo de elasticidad (Cánovas *et al.*, 2000).

El desempeño de los concretos fibrorreforzados varía dependiendo de las propiedades de la matriz cementicia y de las fibras. Son de interés, además de las propiedades de las fibras, el volumen de refuerzo, la geometría de las fibras, la orientación de las fibras y la distribución de las mismas. La adherencia entre las fibras y la matriz de concreto juega un papel determinante en el mejoramiento de las características del concreto fibrorreforzado.

El concreto fibrorreforzado está en evolución continua para mejorar su comportamiento tanto en estado fresco como endurecido por el aporte innovador de la ciencia y de las nuevas tecnologías, especialmente en el estudio de nuevas materias primas y procesos de manufactura (Kosmatka *et al.*, 2004). Es así, que el uso de materiales puzolánicos como reemplazo parcial del cemento portland para la producción de concreto es una alternativa viable, no solo bajo el punto de vista de la conservación del medio ambiente al reducir el impacto causado por la producción del cemento, en la medida que permiten el reemplazo parcial de este en los materiales de construcción de base cementicia, sino también por los beneficios mecánicos y de durabilidad que la adición de las puzolanas pueden generar en una mezcla de concreto adicionado (Kosmatka *et al.*, 2004). El impacto es mayor cuando los materiales puzolánicos utilizados son subproductos de procesos industriales y agroindustriales, tal como es el caso de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA).

La CCA es un subproducto de la combustión de la cascarilla de arroz, la cual constituye aproximadamente el 20% de la producción mundial de arroz, que se aproximó a los 700 millones de toneladas en el año 2011 (Fedealroz, 2011). Esta ceniza puede llegar a contener un porcentaje de más del 90% de sílice en su composición y su actividad puzolánica depende principalmente de la temperatura y de la duración de incineración de la cascarilla, y de las condiciones de enfriamiento. El control de estas variables puede conllevar a la obtención de un gran porcentaje de sílice amorfa altamente reactiva que presenta la capacidad de reaccionar con el hidróxido de calcio producto de las reacciones de hidratación del cemento, dando lugar a la formación de cristales de silicato de calcio hidratado (CHS) que promueven el incremento de la resistencia mecánica de los concretos adicionados (Valverde *et al.*, 2007) (Salas *et al.*, 2009).

En este trabajo se utilizó una CCA proveniente de una empresa arrocera del Valle del Cauca (Colombia), que se obtiene del proceso de combustión de la cascarilla obtenida del proceso de trilla y que utiliza los gases de combustión para calentar aire para secado del arroz *paddy*. La CCA fue sometida a un proceso de molienda en un molino de bolas de laboratorio con el fin de obtener un tamaño de partícula apropiado para usar este material como una adición puzolánica en la mezcla de concreto. Se utilizaron fibras de acero disponibles comercialmente, por su costo bajo y prestaciones apropiadas para usos en obras civiles, especialmente en pavimentos de vías.

2. Procedimiento experimental

2.1. Materiales

2.1.1. Cemento

Se utilizó un cemento portland tipo I de uso general, cuya composición se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición química del cemento

Componente	% en peso	Componente	% en peso
SiO ₂	20,20	MgO	1,58
Al ₂ O ₃	4,52	Na ₂ O	0,16
Fe ₂ O ₃	4,45	K ₂ O	0,27
CaO	61,54	SO ₃	2,48

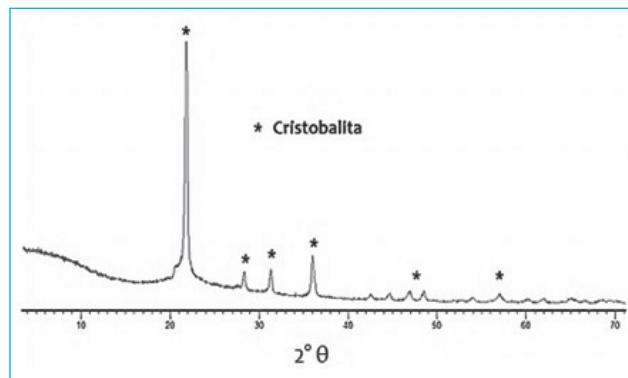
2.1.2. Ceniza de cascarilla de arroz (CCA)

La caracterización de la CCA utilizada en esta investigación, tal como provino del molino, muestra un porcentaje de sílice amorfa bajo, cuyo valor promedio es de 20,11%, resultado que puede ser consecuencia de un deficiente control del proceso de combustión. Sin embargo, se observa que mediante el proceso de molienda se logró una activación de la ceniza, que mostró finalmente 26,5% de amorficidad (Tabla 2).

La CCA presentó un porcentaje de pérdida al fuego que se encuentra dentro del valor permitido por la norma ASTM C618, que es de hasta el 6% de in quemados, y reportó un índice de actividad puzolánica superior al mínimo establecido por la misma norma, que es del 75 %, por lo cual se clasifica el material como una puzolana y por lo tanto apto para actuar como una adición activa en la mezcla (Tabla 2).

La caracterización mineralógica de la CCA se llevó a cabo por medio de Difracción de Rayos X (DRX). El difractograma de Rayos X obtenido se muestra en la Figura 1, donde se pueden observar picos característicos de sílice semicristalina (Cristobalita), lo cual afecta su actividad puzolánica debido a que solo la sílice en estado amorfo es capaz de reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio resultante de las reacciones de hidratación del cemento para formar productos cementantes estables en medio húmedo y con características resistentes. Este resultado comprueba la baja amorficidad que presentó la ceniza, además demuestra que la ceniza pudo haber alcanzado, durante el proceso de obtención en el combustor, temperaturas superiores a 700°C, temperatura en la que empieza la transformación de la ceniza amorfa a cristalina (Salas et al., 2008).

Figura 1: Difractograma de Rayos-X de la CCA



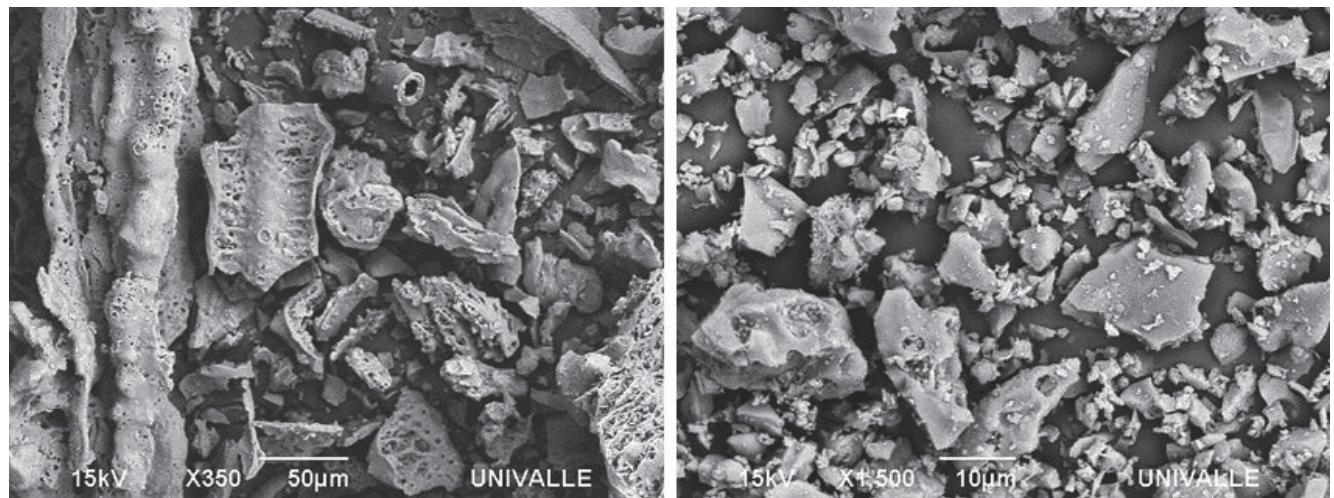
A través de la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) se pudo observar la morfología y la diferencia entre la superficie de la CCA original y la sometida a molienda. En la Figura 2 (Izquierda) se aprecia el efecto de la temperatura de obtención de la puzolana sobre la textura superficial de las partículas, en el caso de las partículas cristalinas esta superficie es lisa y la porosidad es reducida debido a la sinterización ocurrida en la ceniza de la cascarilla de arroz (Ospina et al., 2009). Se observa además, una elevada densidad de poros superficiales de gran tamaño, que generalmente se producen a temperaturas elevadas.

En la Figura 2 (Derecha) se puede observar que con la molturación en el molino de bolas se obtuvieron partículas angulosas de baja relación de aspecto, aunque no se destruye la estructura lisa de la superficie original de la ceniza, pero se destaca el efecto en la reducción del tamaño promedio de las partículas.

Tabla 2: Caracterización de la CCA

Característica	Resultado	Característica	Resultado
Tamaño de partícula inicial	178,86 µm	% de Pérdida al fuego	3,40%
Tiempo de molienda	2 Horas	% de Sílice Amorfa (sin moler)	20,11 %
Tamaño de partícula (molida)	20,83 µm	% de Sílice Amorfa (molida)	25,44 %
Densidad	2150 kg/m ³	Índice de Puzolanicidad (28 días)	92,58%
% de Humedad	0,61%	Índice de Puzolanicidad (60 días)	99,66%

Figura 2: MEB de la Morfología de las partículas de CCA; sin moler (Izquierda, x350) y obtenidas con el Molino de Bolas (Derecha, x1500)



2.1.3. Agregados

Se utilizaron agregados de la región que cumplen con las especificaciones de las Normas Técnicas Colombianas (NTC) para la producción de mezclas de concreto. La grava presentó un tamaño máximo de 38 mm y un predominio de partículas angulares. La arena usada es silícea, extraída de un río, y presentó un módulo de finura de 2,53 con predominio de partículas redondeadas, estas características físicas la hacen apropiada para producir concretos de características fluidas. El contenido de impurezas, evaluado mediante la escala colorimétrica de Gardner, presentó un valor de 2, lo cual indica que el agregado puede ser utilizado en la elaboración de las mezclas de concreto.

Para la determinación de la proporción de los agregados se empleó como referencia la gradación ideal propuesta por Fuller y Thompson y se encontró que la combinación que exhibía un mayor ajuste granulométrico era la conformada por un 50% de grava y un 50% de Arena (Robayo, 2012).

2.1.4. Fibras de acero

Las fibras de acero (FA) que se usaron fueron las Sika Fiber CHO 65/35 NB con extremos conformados en forma de gancho, estas son fibras de acero trefilado de alta calidad para reforzamiento de concretos convencionales. Estas fibras se encuentran agrupadas por encolamiento para facilitar su dispersión en el concreto, evitando la formación de ovillos por enredamiento de las fibras individuales. Las fibras Sika Fiber CHO 65/35 NB se clasifican como tipo I de acuerdo con

la norma ASTM A820. Algunas de sus características físicas y propiedades son presentadas en la Tabla 3.

Tabla 3: Características físicas y propiedades mecánicas de las fibras de acero

Longitud	35 mm
Diámetro	0,54 mm
Relación longitud/diámetro	65
Resistencia a tracción	1150 MPa
Módulo de elasticidad	200 GPa
Elongación de ruptura	4 % max

2.1.5. Aditivo superplastificante

El aditivo superplastificante (SP) usado en la preparación de las mezclas fue el Sika Viscocrete 2100, este es un aditivo líquido, reductor de agua de ultraalto rango y superplastificante basado en policarboxilatos. Sika Viscocrete 2100 cumple con los requisitos de la norma ASTM C419 y se clasifica según los parámetros establecidos en esta norma como Tipos A y F, su densidad es de 1078 kg/m³.

2.2. Diseño de mezclas

Para el diseño de las mezclas de concreto se partió de una dosificación probada en un estudio anterior

desarrollado en el Grupo de Investigación Materiales Compuestos de la Universidad del Valle, en donde se encontró que el porcentaje de adición óptimo para esta CCA es de un 20% en peso del cemento portland (Robayo, 2012), se reprodujo la mezcla adicionada de referencia con el objetivo de lograr una resistencia mínima a la compresión de 28 MPa a los 28 días de curado y un asentamiento de 18 cm. Para darle esta consistencia fluida se utilizó el aditivo superplastificante mencionado. Posteriormente se evaluó el comportamiento mecánico del concreto fluido reforzado con volúmenes bajos de fibras de acero (V_f : 0,3% 0,5% y 0,7%). La dosificación de las mezclas se puede observar en la Tabla 4.

Para la ejecución de los ensayos se elaboraron tres especímenes por edad para cada una de las mezclas de concreto. Las probetas conformadas para los ensayos a la compresión, tracción indirecta y módulo secante fueron cilindros de 75 mm de diámetro y 150 mm de altura. Las probetas conformadas para los ensayos de flexión correspondieron a prismas de 75 mm de ancho, 75 mm de altura y 150 mm de largo.

2.3. Ensayos realizados

Para poder conocer el comportamiento de los concretos elaborados, tanto en su estado fresco como endurecido, se realizaron pruebas de asentamiento o *Slump*, ensayos de resistencia a la compresión a 7, 14, 28 y 60 días de curado, pruebas de flexión a 28 y

60 días de curado, y pruebas de tracción indirecta y módulo de elasticidad a 28 días de curado, de acuerdo a los procedimientos descritos en las normas ASTM correspondientes a cada tipo de ensayo. Adicionalmente, con el fin de estudiar la adherencia de las fibras a la matriz de concreto adicionado se realizó una prueba de Arrancamiento o *Pull Out* acompañada de una observación de la interfase mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

Para la elaboración de las probetas de *Pull Out* se utilizó un molde tipo briqueta en forma de ocho, que es normalmente utilizado para evaluar la resistencia a la tracción de morteros estándar de cemento; este molde permite asegurar la longitud embebida y la alineación de la fibra. Con el fin de obtener una comparación válida entre la adherencia de las fibras, se garantizó una longitud embebida de 20 mm para todas las muestras, además se estudió el efecto de la geometría de las fibras de acero utilizando fibras con extremos conformados y fibras rectas, obtenidas al cortar los ganchos de los extremos de las fibras conformadas.

3. Análisis de resultados

3.1. Ensayo de asentamiento o *Slump*

Los resultados obtenidos mediante el ensayo de asentamiento (NTC 396) son mostrados en la Tabla 5, en

Tabla 4: Dosificación de las mezclas de concreto elaboradas

Mezcla	Cemento (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	Agua (l/m ³)	Sp (%)	Fibras de acero (kg/m ³)	Grava (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)
Control	400	0	180	0,4	0	946	864
CCA20%	320	80	180	0,4	0	946	864
FA0,3%	320	80	180	0,5	20	946	864
FA0,5%	320	80	180	0,6	35	946	864
FA0,7%	320	80	180	0,6	50	946	864

Tabla 5: Comportamiento en estado fresco de los concretos elaborados

Característica	Control	CCA20%	FA0,3%	FA0,5%	FA0,7%
Relación a/c	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
<i>Slump</i> , cm	17	18	17,5	18	17,5
Trabajabilidad	Buena	Excelente	Buena	Buena	Buena

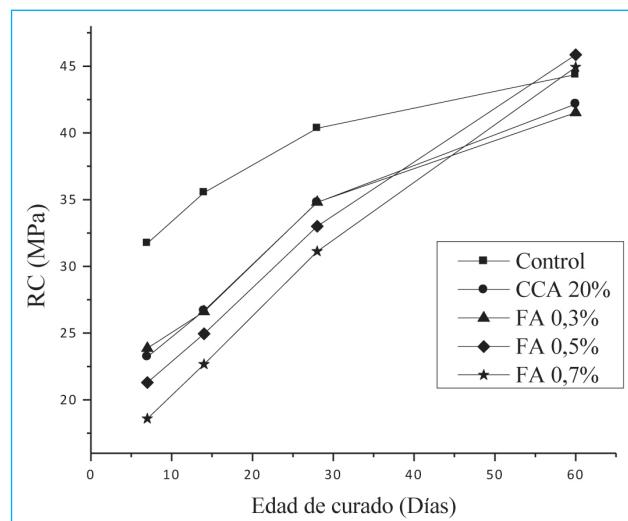
donde se puede observar que la adición de CCA en la mezcla de concreto no produjo incrementos en la demanda de agua y en la cantidad de aditivo superplastificante requerido para lograr el *Slump* de diseño (18 cm), sin embargo se observó que la incorporación de volúmenes bajos de fibras de acero (0,3%, 0,5%, y 0,7%) generó una leve reducción de la trabajabilidad de la mezcla, y se hizo necesario incrementar la dosis de aditivo superplastificante para contrarrestar la pérdida de fluidez generada.

En general las mezclas elaboradas presentaron una adecuada fluidez, con una buena cohesión entre sus componentes, sin exudación y segregación, cumpliendo así con las especificaciones de diseño en su estado fresco.

3.2. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión fue determinada de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM C39. En la Figura 3 se presenta el comportamiento a la compresión a través del tiempo de las mezclas elaboradas, en donde se puede observar que la incorporación del 20% de CCA semicristalina generó una disminución de la resistencia a la compresión (RC) a edades tempranas. Sin embargo, se destaca un incremento significativo de esta resistencia a edades de curado prolongadas, con mayor nivel de evolución de la resistencia a partir de los 28 días de curado, hasta alcanzar valores de resistencia similares al concreto patrón o de control.

Figura 3: Resistencia a la compresión a través del tiempo



En la Figura 3 se aprecia que la incorporación de volúmenes bajos de fibras de acero (0,3%, 0,5% y 0,7%) generó una leve disminución de la resistencia a la compresión a edades tempranas, aunque a edades mayores de 60 días se obtuvieron resistencias superiores a la mezcla de control adicionada y a la resistencia de diseño (28 MPa), para todos los volúmenes de refuerzo.

El modo de falla a compresión de los concretos fibrorreforzados se puede apreciar en la Figura 4, en donde se observa un modo de falla más dúctil y menos frágil que la mezcla adicionada de referencia, debido al incremento de la tenacidad del material compuesto y de la mayor deformación transversal del concreto fibrorreforzado (ACI 544.2R, 2002).

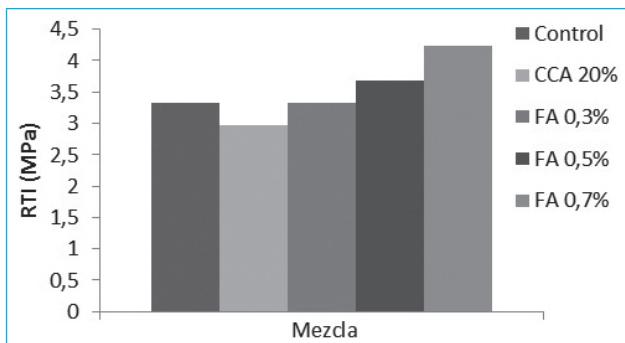
Figura 4: Modo de falla de los concretos fibrorreforzados



3.3. Resistencia a la tracción indirecta

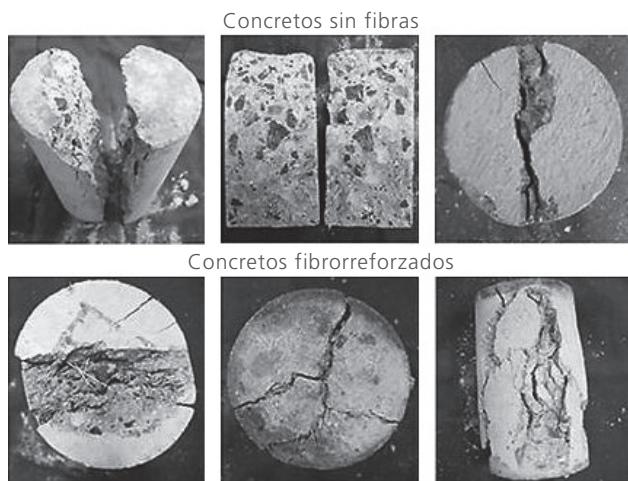
La resistencia a la tracción indirecta (RTI) evaluada de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM C496 se presenta en la Figura 5, en donde se puede apreciar que la incorporación de volúmenes bajos de fibras de acero (0,3%, 0,5% y 0,7%) genera un incremento significativo de la resistencia a la tracción indirecta de la matriz adicionada de referencia, de manera proporcional a la cantidad de refuerzo; este incremento en el caso de la mezcla reforzada con el 0,7% de fibra fue del 42%.

Figura 5: Resistencia a la tracción indirecta a los 28 días de curado



La incorporación de volúmenes bajos de fibras en el concreto sirve para evitar las roturas de naturaleza frágil que se presentan bajo cargas de tensión al mantener unidas ambas caras de la fisura aun después de la falla del espécimen a edades muy tempranas, este fenómeno se puede apreciar al observar la Figura 6 (Laranjeira *et al.*, 2009).

Figura 6: Modo de falla de los concretos sin fibras (arriba) y fibrorreforzados (abajo), sometidos a tracción indirecta



3.4. Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión o módulo de ruptura (R), evaluado de acuerdo a la norma ASTM C293, se presenta en la Tabla 6, en donde se puede observar que la adición del 20% de CCA semicristalina generó un incremento de la resistencia a la flexión del orden del 6% y del 19% a los 28 y 60 días respectivamente. Al mismo tiempo se puede observar que la incorporación

de volúmenes bajos de fibras de acero en la matriz adicionada generó un leve incremento en la resistencia a la primera fisura, de manera proporcional a la cantidad de refuerzo incorporado. Esto se puede atribuir, más que a una acción de refuerzo de la fibra a largas edades, a la reducción de microfisuras, que sean causadas por retracción plástica a corto plazo.

Tabla 6: Resistencia a la flexión de los concretos evaluados

Mezcla	Carga máxima (N)		Módulo de ruptura (R) (MPa)	
	28 días	60 días	28 días	60 días
Control	5927,9	6575,0	4,67	5,18
CCA 20%	6292,3	7518,2	4,96	5,93
FA 0,3%	6671,4	7586,9	5,26	5,98
FA 0,5%	6705,2	7848,3	5,29	6,19
FA 0,7%	6974,5	8036,3	5,50	6,34

En las Figuras 7 y 8 se puede observar el beneficio de la incorporación de volúmenes bajos de fibras de acero ante esfuerzos de flexión, que se aprecia en una zona posterior a la fisuración, cuando la matriz se agrietó y el esfuerzo que compartían las fibras y la matriz fue transferido a las fibras de refuerzo, presentándose una falla gradual generada por el arrancamiento progresivo de las fibras (*Pull Out*), fenómeno que conllevó a un incremento en la tenacidad y la ductilidad post-agrietamiento del compuesto.

Figura 7: Gráfico carga-flecha a los 28 días

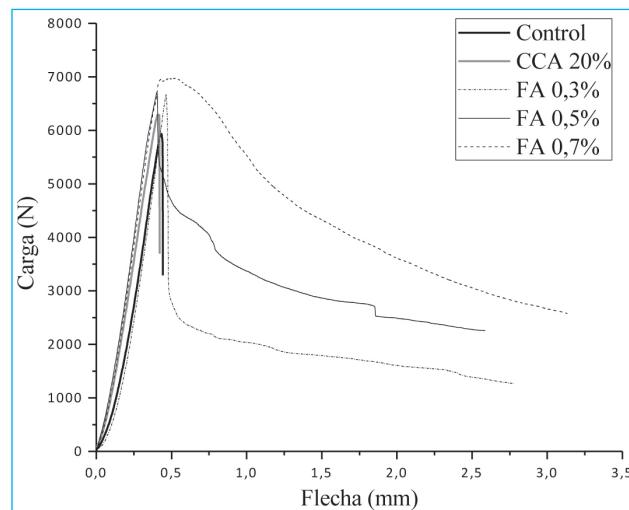
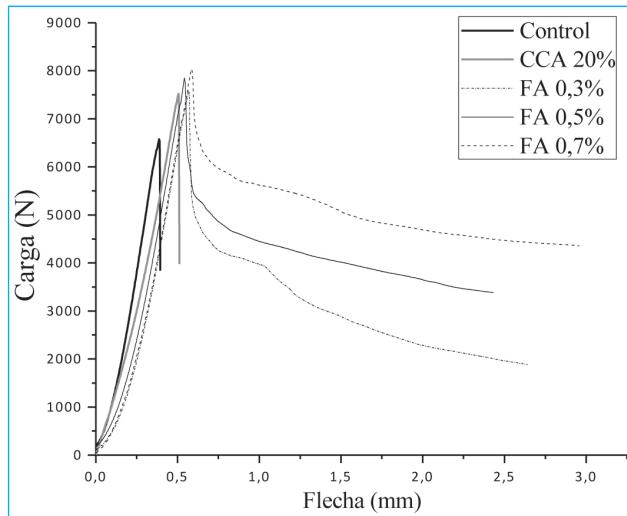


Figura 8: Grafico carga-flecha a los 60 días



En las Figuras 8 y 9 se puede observar que para las mezclas de referencia (sin fibras), de control y de control adicionada con 20% de CCA, hay una primera fase prácticamente elástica, seguida de una microfisuración de la matriz que conduce rápidamente a la falla frágil del material. Con la incorporación de las fibras, el

comportamiento fue diferente, los mayores efectos de las fibras, fueron un incremento de la deformación correspondiente a la máxima carga de flexión aplicada y una pendiente bastante menor de la rama descendente. Ello otorgó al concreto reforzado mayor tenacidad, creciente con el volumen de fibras empleado, en relación al concreto adicionado de referencia, aun cuando los volúmenes de refuerzo fueron relativamente bajos (0,3%, 0,5% y 0,7%) (Godoy *et al.*, 2007).

3.5. Tenacidad en flexión

El cálculo de la tenacidad se realizó según los parámetros definidos en la antigua norma ASTM C1018. Los índices de tenacidad obtenidos fueron los índices I_5 e I_{10} , que resultan al dividir las áreas delimitadas por la curva ($P-\delta$) y el eje de las abscisas hasta las deformaciones iguales a $3\delta_f$ y $5,5\delta_f$ respectivamente por el área existente hasta una extensión igual a δ_f , correspondiente a la carga P_f de la primera fisura (Ecuación 1). Los valores de tenacidad e índices de tenacidad obtenidos a los 28 y 60 días de curado se presentan en la Tabla 7.

$$I_5 = \frac{\text{Área } (P - 3\delta_f)}{\text{Área } (P_f - \delta_f)} ; I_{10} = \frac{\text{Área } (P - 5,5\delta_f)}{\text{Área } (P_f - \delta_f)} \quad (1)$$

Tabla 7: Tenacidad e índices de tenacidad en flexión a los 28 y 60 días de curado

Mezcla	Edad	P_f (N)	δ_f (mm)	Tenacidad (N.mm)			Índice de tenacidad	
				δ_f	$3\delta_f$	$5,5\delta_f$	I_5	I_{10}
Control	28 días	5934,8	0,43	1079,8	-	-	-	-
	60 días	6575,0	0,39	1128,4	-	-	-	-
CCA 20%	28 días	6292,3	0,41	1171,9	-	-	-	-
	60 días	7518,2	0,51	1684,0	-	-	-	-
FA 0,3%	28 días	6671,4	0,46	1182,8	3405,9	5019,7	2,88	4,24
	60 días	7586,9	0,56	1673,6	5755,4	8874,9	3,44	5,30
FA 0,5%	28 días	6705,2	0,41	1268,9	5304,3	7851,7	4,18	6,19
	60 días	7848,3	0,54	1723,5	6602,3	10555,4	3,83	6,12
FA 0,7%	28 días	6974,5	0,51	1347,1	7639,4	12028,1	5,67	8,93
	60 días	8036,3	0,58	1841,4	8236,6	14785,2	4,47	8,03

Los valores de tenacidad e índices de tenacidad obtenidos reflejan claramente el efecto de las fibras incorporadas en el comportamiento postagrietamiento del concreto adicionado de referencia. En la Tabla 7 se puede observar que la incorporación de volúmenes bajos de fibras (0,3%, 0,5% y 0,7%) generó un incremento significativo de la tenacidad del material, de manera proporcional a la cantidad de refuerzo incorporado. El mayor incremento de la tenacidad en flexión se presentó con la incorporación del 0,7% de fibras, donde se logró un aumento del 1026%.

Se pudo apreciar que la respuesta eficiente de las fibras en el comportamiento postfisuración del concreto aumenta con el grado en que la carga aplicada se transmite a la fibra por medio de la matriz (Mendoza *et al.*, 2011), lo cual está relacionado con la tensión de adherencia de la fibra en la zona de interfase con la matriz, es por esta razón que el incremento de la edad de curado influye de manera positiva en la obtención de valores de tenacidad más elevados como se puede observar en la Tabla 7.

3.6. Módulo de elasticidad

La determinación del módulo de elasticidad (E_c) se realizó bajo el método de secante, haciendo una adaptación del método establecido en la norma ASTM C469. Los valores de módulo de elasticidad obtenidos a los 28 días de curado se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8: Resultados de módulo de elasticidad seccante

Mezcla	E_c (GPa)	E_c según A.C.I. (GPa)
Control	21,85	29,85
CCA 20%	21,47	27,72
FA 0,3%	23,03	27,72
FA 0,5%	23,88	27,00
FA 0,7%	24,17	26,21

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante este ensayo se puede indicar que la incorporación de volúmenes bajos de fibras de acero (0,3%, 0,5% y 0,7%) genera un leve incremento del módulo de elasticidad de la mezcla adicionada de referencia, este aumento fue del orden del 12% para la mezcla en donde se incorporó una dosis de fibras de 0,7% (en volumen), la cual presentó un valor de módulo de elasticidad seccante de 24,17 GPa en comparación al concreto adicionado de referencia que alcanzó un valor de

módulo de 21,47 GPa. Este aumento puede atribuirse más al efecto de disminución del fisuramiento debido a la retracción de secado del material cementicio. Además, se apreció que la incorporación de un 20% de CCA semicristalina no genera modificaciones en el valor del módulo de la mezcla control.

3.7. Arrancamiento (*Pull Out*)

El efecto de las fibras es más notable tras la fisuración de la matriz, pues es en esta etapa donde se atenúa el fisuramiento por el puenteo que las fibras hacen entre las caras de las fisuras, el material se hace seudoductil. En esta situación, la respuesta de los concretos es gobernada, sobre todo, por la resistencia de las fibras al arrancamiento de la matriz, que es el mecanismo principal de generación de tenacidad de material (Naman *et al.*, 1991).

Con el objetivo de estudiar la adherencia entre la matriz adicionada y las fibras de acero se realizó el ensayo de arrancamiento o de *Pull Out* acompañado de la observación de la interfaz por medio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Se calculó la tensión de adherencia (T) de la fibra con extremos conformados, usada en esta investigación y se comparó con la misma fibra pero con extremos rectos (quedan así al enderezar los extremos en forma de gancho), con el fin de estudiar el mecanismo de adherencia de la Sika Fiber CHO 65/35 NB a la superficie de la matriz en contacto con la fibra. Los resultados obtenidos en el ensayo de *Pull Out* se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Resultados del ensayo de arrancamiento (*Pull Out*)

Tipo de fibra	Área embebida (mm ²)	Fuerza de extracción (N)	T (MPa)
Conformada	33,93	158	4,66
Recta	33,93	111	3,27

La influencia de la geometría de la fibra de acero se puede observar en la Figura 9, en donde la fibra recta ofrece una menor resistencia al desprendimiento de la matriz en comparación con la misma fibra pero con extremos conformados, al mismo tiempo se puede observar que una vez superada la carga máxima el comportamiento es similar, puesto que a partir de este punto la adherencia se debe exclusivamente a las fuerzas de fricción. Cunha *et al.*, encontraron en su investigación un valor medio de la tensión de adherencia de 1,91 MPa de fibras de acero en un concreto autocompactante, siendo similar

los resultados de las fibras rectas a los de las de extremos en gancho tipo Dramix (Cunha *et al.*, 2009).

Figura 9: Ensayo de arrancamiento (*Pull Out*)

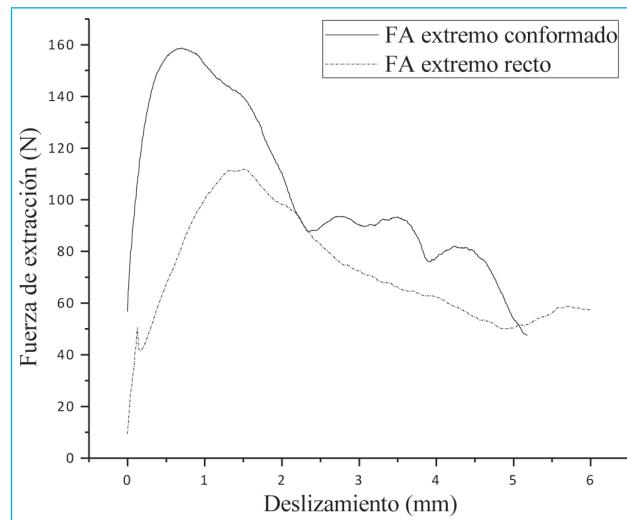
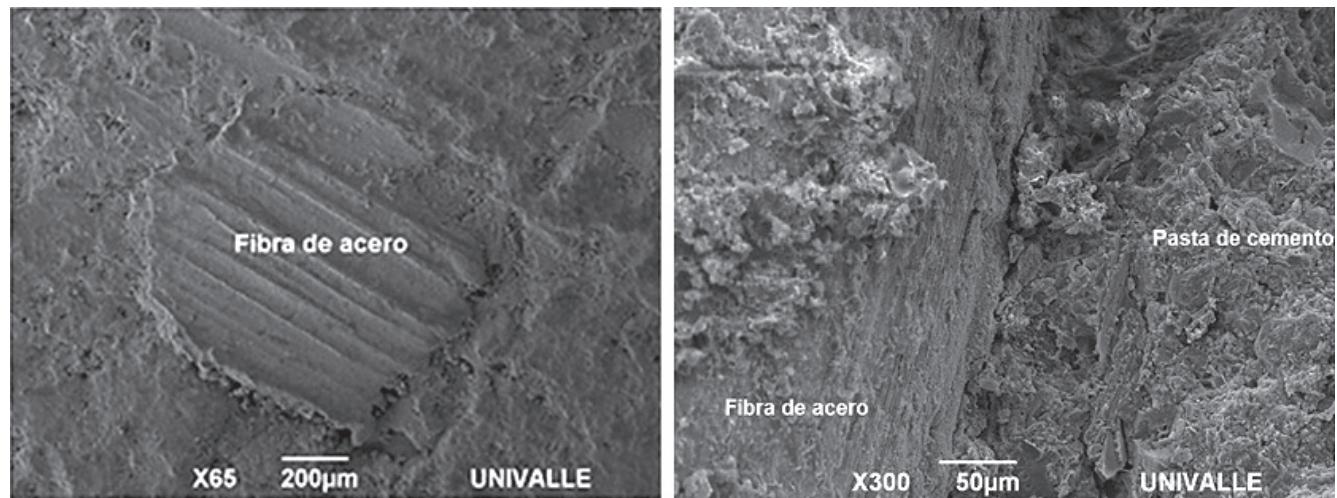


Figura 10: MEB de la fibra completamente adherida a la matriz (Izquierda, x65) (Derecha, x300)



Estos resultados manifiestan que la fibra conformatada usada en este proyecto superó la tensión de adhesión de la misma fibra pero con extremos rectos en un 142%. Resultado que explica el comportamiento postfisuración de los concretos fibrorreforzados con esta fibra ante esfuerzos de flexo-tracción, incluso cuando las cantidades de refuerzo son inferiores al 1% en volumen.

3.8. Observación de la interfase fibra-matriz por medio de microscopía electrónica de barrido

Mediante la observación de la interfaz fibra-matriz por medio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) se corroboró que la fibra de acero presentó una alta adherencia antes de ser sometida a una carga por encima de la tensión de adherencia, al estar completamente anclada a la matriz adicionada, como se puede observar en la Figura 10 (Izquierda); además, se pudo apreciar que la matriz en contacto con la fibra presenta una buena densificación, lo cual promueve una mayor adherencia de las fibras de refuerzo a la matriz cementicia (Figura 10, Derecha).

La interfaz entre la fibra y la matriz muestra una microestructura muy homogénea y densificada, caracterizada por el desarrollo de silicatos de calcio hidratados (C-S-H), principal producto de hidratación responsable del desarrollo de resistencias mecánicas, además de la formación de grandes cristales hexagonales de portlandita (C-H) como se puede observar en la Figura 11. Estos compuestos se originan como consecuencia de la hidratación de los silicatos de calcio (C_3S y C_2S), formándose de esta manera un conjunto complejo de productos de hidratación y el llamado gel de hidratación (Metha y Monteiro, 2006).

La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente a los silicatos de calcio hidratados (Metha y Monteiro, 2006); la presencia marcada de estos compuestos en la interfaz de la fibra de acero con la matriz pueden derivar en resistencias a la adherencia mucho mayores, que son aumentadas gracias al anclaje mecánico del extremo conformado de las fibras y su superficie rugosa como se pudo corroborar mediante el ensayo de arrancamiento, lo cual permite que se pueda mejorar la respuesta de los concretos fibrorreforzados ante esfuerzos de flexo-tracción, aun con la incorporación de volúmenes bajos de fibras de acero en la mezcla.

4. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos durante la ejecución de esta investigación se demostró la viabilidad de producir un concreto fluido adicionado con ceniza de cascarilla de arroz de baja amorficidad y reforzado con volúmenes bajos de fibras de acero, resaltando

que la utilización de la CCA permite la reducción del consumo de cemento hasta en un 20% para lograr similar desarrollo resistente a edades de curado largas.

La incorporación de volúmenes bajos de fibras de acero al concreto adicionado con 20% de CCA, ocasiona una ligera disminución de la resistencia a la compresión a edades tempranas, aunque un incremento de esta resistencia a una edad cercana a 60 días de curado. Cabe resaltar que la incorporación del 0,7% de fibras en volumen, genera un incremento en la resistencia a la tracción del 42%, en la tenacidad en flexión del 1026% y en el módulo de elasticidad del 12%.

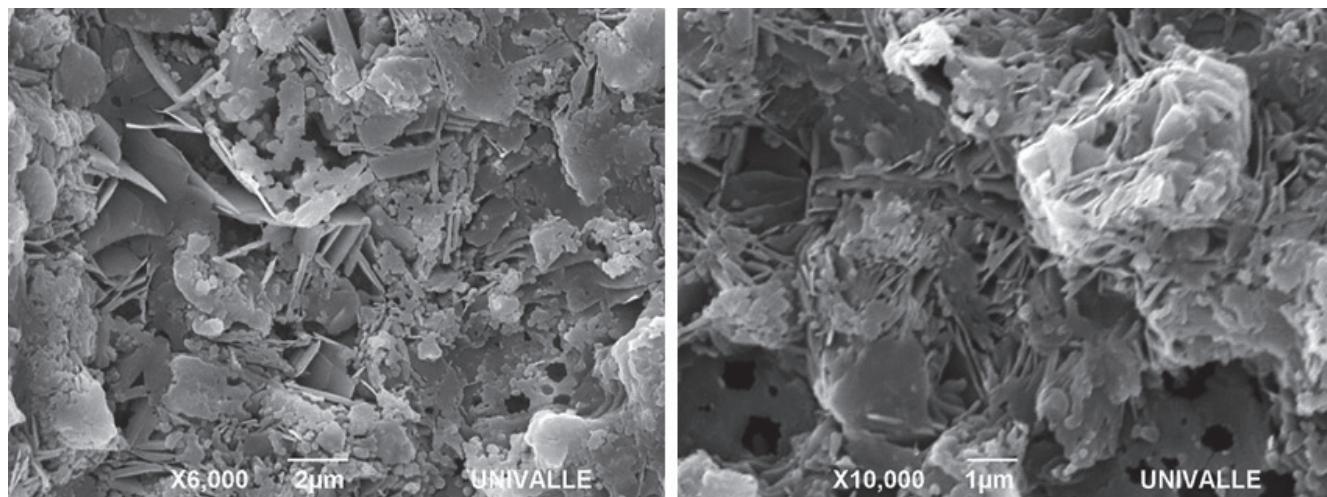
El efecto de conformar en forma de gancho el extremo de la fibra trae como consecuencia un incremento notable en su resistencia de adherencia, y por ende en las propiedades mecánicas y en la tenacidad del material compuesto.

Las características en estado fresco y endurecido del concreto fluido adicionado con CCA y reforzado con fibras de acero de extremos conformados indican la factibilidad de su utilización en concretos para pavimentación de vías y abren nuevas posibilidades para otros campos de aplicación del material en el sector de la construcción.

5. Agradecimientos

Al grupo de investigación Materiales Compuestos (GMC) y al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) pertenecientes a la Universidad del Valle por toda su colaboración durante la ejecución de este proyecto.

Figura 11: MEB de la interfase fibra-matriz; formación de C-S-H y C-H (Izquierda, x6000) (Derecha, x10000)



Referencias

- American Concrete Institute (ACI 544.2R): (2002). *Measurement of properties of fiber reinforced concrete*, Reported by ACI Committee 544, Reapproved 2002.
- Cánoyas, M.; Ballán, E.; Gonzales, G.; Moragues, A.; Moreno, E.; Pelufo, M.; Perepérez, B.; Serna, P.; Rossi, J.; Sanjuán, M. y Valcuende, M. (2000). "Manual de Tecnología del Hormigón Reforzado con Fibras de Acero", (Asociación Científico - Técnica del Hormigón Estructural) ACHE, Madrid.
- Cunha, V.M.C.F.; Barros, J.A.O. y Sena Cruz, J.M. (2010). *Pullout Behavior of Steel Fibers in Self-Compacting Concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, 22(1) 1-9.
- Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz) (2011). *Estadísticas Arroceras; Bondades y Beneficios del Arroz*, [En línea], Bogotá D.C, Disponible en: <http://www.fedearroz.com.co/Index.html> [Consultada 22.12.2011].
- Godoy, M.; Nemi, N. y Rocco, C. (2007). *Comportamiento mecánico de hormigón reforzado con fibras de acero: influencia de la dosificación de fibras*, Congreso SAM/CONAMET 2007, Buenos Aires.
- Kosmatka, S.; Kerkhoff, B.; Panarese, W. y Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, Portland Cement Association (PCA), Skokie, Illinois.
- Laranjeira, F.; Molins, C. y Aguado, A: (2009). *Comportamiento a tracción de hormigones reforzados con fibras de acero*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña.
- Mendoza, C.; Aire, C. y Dávila, P: (2011). *Influencia de las fibras en las propiedades del concreto en estados plásticos y endurecido*, Revista concreto-cemento, Vol. 2, No. 2. Investigación y desarrollo. Enero-Junio de 2011. Instituto de Ingeniería-Estructuras y Materiales, Universidad Autónoma de México. pp, 35-47.
- Metha, K. y Monteiro, P. (2006). *Concrete; Microstructure, Properties and Materials* (Third Edition), Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Berkeley, California.
- Naaman, A.; Namur, G.; Alwan, J. y Najm, H. (1991). *Fiber pull-out and bond slip. I: Analytical study*, Journal of Structural Engineering, Vol. 117. p. 6-8.
- Ospina, M.; Mejía de Gutiérrez, R.; Delvasto, S.; Monzó, J.; Borrachero, M.V. y Payá, J. (2009). *Modificación de la morfología de la ceniza de cascarilla de arroz por molienda de alta energía y su efecto en las propiedades reológicas de pastas de cemento portland adicionadas*. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales ISSN: 0255-6952 S1 (2) 577-584.
- Salas, A.; Delvasto, S.; Mejía de Gutiérrez, R. y Lange, D. (2009). *Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete*, Cement and Concrete Research 39. p. 773-778, September.
- Salas A.; Ospina, M.; Delvasto, S. y Mejía de Gutiérrez, R. (2008) *Study on the pozzolanic properties of silica obtained from rice husk by chemical and thermal process*, Phys. stat. sol. 4(11) 4311-4318.
- Valverde, A.; Sarria, B. y Monteagudo, J. (2007). "Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz", Scientia Et Technical, Diciembre, año/vol. XIII, número 037, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.