

Estudio de la fisuración por contracción plástica en losas de concreto con agregados reciclados y uso de microfibras

Study of fissuration for plastic contraction in concrete plates with recycled aggregates and microfiber use

DENNIS ALEXÁNDER COLLAZOS BOLAÑOS¹ - NANCY TORRES CASTELLANOS²

1. Ingeniero civil. Estudiante de maestría en la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Profesor asociado de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Posgrado en Ingeniería Civil, énfasis en Estructuras.

dcollazosd@gmail.com - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/03/2017 Aceptado: 17/04/2017

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

La contracción plástica del concreto a causa de la rápida evaporación del agua en estado fresco puede generar fisuras que afectan la estética, funcionalidad, resistencia y durabilidad de elementos de concreto, en particular de aquellos que tienen una gran superficie expuesta y un volumen relativamente bajo como losas de pavimentos o pisos; esta fisuración y la posterior reparación generan costos económicos y ambientales adicionales.

Uno de los factores que más inciden en la fisuración por contracción plástica es la velocidad del viento, porque promueve altas tasas de evaporación del agua en la superficie del concreto. Se hizo un estudio para determinar el porcentaje óptimo de microfibra de nailon para el control de la fisuración por contracción plástica en losas de concreto, usando agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición en diferentes porcentajes de remplazo del agregado grueso. Se elaboraron losas de 100 x 60 cm, con espesor de 8 cm y relación agua-cemento 0,50. Estas losas fueron sometidas a velocidades de viento de 8, 18 y 30 km/h, con medición de temperatura y humedad relativa en el laboratorio.

Palabras claves: contracción plástica, túnel de viento, control de fisuración.

Abstract

Plastic contraction of concrete, due to quick water evaporation in fresh state, can generate fissures affecting aesthetics, functionality, resistance, and durability of concrete elements, especially those which have a large exposed surface and a relatively small volume such as pavement plates or floors; this fissuration and eventual repair generate additional economic and environmental costs.

One of the factors that play a bigger role in fissuration for plastic contraction is wind speed, because it fosters high water evaporation rates on the concrete's surface. A study was performed to determine the optimal percentage of nylon microfiber to control fissuration for plastic contraction in concrete plates was performed, using recycled aggregates from construction and demolition waste at different ratios replacing coarse aggregates. 100 cm x 60 cm x 8 cm plates were built with a water-cement ratio of 0.50. These plates were exposed to 8, 18, and 30 km/h, measuring temperature and relative humidity in the lab.

Keywords: plastic contraction, wind tunnel, fissuration control.

INTRODUCCIÓN

El uso de agregados reciclados para la producción de concreto se ha convertido en un tema de vital importancia para la industria de la construcción a escala mundial. La continua explotación de canteras y la extracción de materiales conllevan al agotamiento de recursos naturales, lo que hace de la construcción una industria no muy amable con el medio ambiente y el desarrollo sostenible. Por esto, países como España, Alemania, Reino Unido, Australia, Bélgica, Japón y Estados Unidos han dado una gran relevancia al empleo de agregados reciclados en la construcción, desarrollando distintas normativas para estandarizar la utilización de agregados reciclados en el concreto.

El aumento en el uso de agregados reciclados para mezclas de concreto contribuye al desarrollo sostenible del sector de la construcción, generando actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición, en aras de reducir los impactos ambientales originados por el gran volumen de residuos o escombros provenientes de dicha actividad.

En Estados Unidos, la Asociación Federal de Carreteras recicla los pavimentos de concreto. En 1985, durante la ampliación de 7.000 carreteras en Wyoming, el agregado fue una mezcla de materiales naturales y reciclados, con lo que se ahorró el 16 % del costo total del proyecto. Estas experiencias generan expectativas en el uso de agregados reciclados para concreto de pavimentos y losas, las cuales son estructuras con una alta relación superficie/volumen, que pueden tener una notoria contracción por secado y generar una alta fisuración, aunado a las altas velocidades de viento que se pueden presentar en áreas no pobladas [1].

Por lo tanto, es importante evaluar el comportamiento de las losas de concreto con agregados reciclados, con respecto a su fisuración para garantizar un comportamiento adecuado y de gran durabilidad.

Lo anterior motivó el desarrollo de este proyecto, que tuvo como objetivo estudiar la fisuración de losas de concreto con agregados reciclados, expuestas a diferentes velocidades de viento y el uso de microfibras para control de la fisuración durante la contracción plástica del concreto. Los resultados obtenidos aportarán un referente más para la utilización de concretos con agregados reciclados, con el objetivo de incentivar su uso, aliviar la carga de escombros generados por la

construcción y demolición, contribuyendo a una construcción sostenible al reducir los impactos ambientales.

FISURACIÓN POR CONTRACCIÓN PLÁSTICA

La fisuración por contracción plástica se produce cuando los cambios de volumen del concreto se ven limitados por los agregados, refuerzo, o por el contacto con otra superficie; estos cambios de volumen generan tensiones internas en la pasta, causando fisuras cuando se sobrepasa la resistencia a la tracción del concreto. La formación de fisuras es más pronunciada en las primeras horas, cuando la resistencia del concreto es todavía muy baja; adicionalmente, pequeñas fisuras ocasionadas por efectos de carga y ambientales pueden iniciar la formación de fisuras más profundas [2].

La contracción es la causa fundamental de fisuras y es inducida por la pérdida de agua del concreto; se presume generalmente que el agrietamiento por contracción plástica se desarrolla cuando la tasa de evaporación supera la velocidad a la que el agua de exudación sube a la superficie. Cuando la tasa de evaporación de la superficie del concreto es mayor de $1,0 \text{ kg/m}^2/\text{h}$, hay una alta probabilidad de formación de grietas debido a contracción plástica ACI 305.R [3].

Para las condiciones de evaporación dadas, es evidente que las mezclas con mayor contenido de pasta tienen una mayor tendencia a agrietarse, y el uso de agregados reciclados que ya tienen pasta incluida agrava esta situación. Del mismo modo, se ha demostrado que la formación de grietas por contracción plástica es influenciada por el enrasado y las operaciones de acabado, en tanto que la mayoría de las grietas formadas son paralelas a la dirección enrasado [4]. Adicionalmente, la pérdida de agua en la superficie del concreto también se ve influenciada por la velocidad del viento, que promueve altas tasas de evaporación.

La pérdida de agua en la superficie del concreto se ve influenciada por la velocidad del viento, la cual promueve altas tasas de evaporación; además, el uso de agregados reciclados en el concreto induce a la contracción debido a la gran capacidad de estos agregados para absorber una gran cantidad de agua.

Se define como exudación al fenómeno de migración del agua del concreto, que aflora en la superficie de acabado. Con ella hay un aumento de la relación a/C en la región de la superficie de la placa, perjudicando la

integridad superficial del concreto. El periodo en que la exudación ocurre es suficientemente claro, el cual se caracteriza por la presencia de una película de agua que confiere un brillo superficial, iniciándose después de las operaciones de terminación y se prolongan hasta el inicio del fraguado del concreto, cuando el gran aumento de la superficie específica, ocasionado por el crecimiento de los cristales de la hidratación del cemento, disminuye la permeabilidad de la pasta de cemento. El comportamiento de las fibras de polipropileno en el control de la exudación, sea para reducirla o para disminuir la velocidad en que ocurre, puede explicarse como la capacidad que tiene la fibra de retener el agua en el interior del concreto [5].

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se llevó a cabo un programa experimental en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, para evaluar la influencia que tiene la velocidad del viento en la tasa de evaporación en losas de concreto con agregados reciclados (ACR), así como la influencia de la adición de microfibras de nailon para el control de la fisuración.

El programa empieza con el diseño, construcción y puesta en funcionamiento de un túnel de viento, diseñado con la colaboración de personal profesional del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

El diseño del túnel se hizo buscando la simulación de corrientes de viento en flujo laminar, de tal modo que el viento cubra toda la superficie expuesta de la losa en evaluación. Para esto se empleó una turbina (ventilador) de 71 cm (28 pulgadas) de diámetro, que con un variador de velocidad genera viento con velocidades desde 0 hasta 50 km/h, viento que es dirigido a través de un tronco de cono que hace las veces de transición entre una sección circular y una sección rectangular del túnel y con una longitud horizontal de 70 cm. Para asegurar un flujo uniforme del viento sobre las losas de concreto, el túnel se diseñó con una sección transversal rectangular de 67 cm de ancho por 37 cm de altura y una longitud de 3,30 m, con lo cual se tiene una longitud total del túnel de 4,00 m, desde el punto de ubicación de la turbina hasta la salida del túnel.

El túnel de viento tiene una ventana superior y una ventana lateral en el tramo donde se ubica la losa, las

cuales permiten observar el estado de la superficie de la losa durante el tiempo de fraguado de la mezcla. El tramo de túnel donde se ubica la losa posee una abertura inferior de las dimensiones de la formaleta metálica (100 x 60 x 8 cm), con una tolerancia de 1,0 cm, con el fin de permitir el ingreso de la formaleta con la mezcla de concreto para someterla al flujo de aire a la velocidad de ensayo (figura 1). Para el ingreso de la losa al túnel se diseñó y se fabricó una mesa móvil, la cual está provista de cuatro ruedas que permiten el desplazamiento de la mesa en cualquier dirección; así mismo, cuenta con dos gatos de tornillo que facilitan el desplazamiento vertical (sube y baja) de la mesa, lo que permite ingresar y retirar la losa del túnel (figura 2).



Figura 1. Vista general del túnel de viento.



Figura 2. Mesa móvil para ingreso de losa al túnel.

El túnel de viento está provisto de equipos de instrumentación para el monitoreo y medición de datos, tales como el variador de velocidad para definir la frecuencia de giro de la turbina y así establecer una velocidad del viento, termocuplas para medición de temperatura y humedad relativa del aire en el interior del túnel, así como termocuplas que permiten medir la temperatura dentro de la mezcla. La mesa móvil en su superficie está dotada con tres celdas de carga, las cua-

les permiten medir con una precisión de miligramos el peso de la losa con su formaleta. Estas variables fueron monitoreadas a través de termopares conectados a un computador para registrar los datos, con mediciones tomadas cada diez segundos.

En el programa experimental se fundieron en total 72 muestras, losas de dimensiones 100 x 60 x 8 cm, con el fin de generar una superficie geométrica con relación área - volumen típica en losas de concreto. Se utilizó concreto con la inclusión de tres porcentajes de agregados de concreto reciclado (ACR): 0, 50 y 100 %. Se realizaron ensayos exponiendo las losas a velocidades de viento de 8, 18 y 30 km/h, utilizando para ello el túnel de viento. La inclusión de agregados de concreto reciclado tiene alguna influencia sobre la retracción total, ya que el objetivo de esta investigación no es cuantificar la contracción total de las losas de concreto, sino evaluar la fisuración en las losas de concreto con agregados reciclados por influencia de la velocidad del viento, la tasa de evaporación de agua y la influencia en el concreto del uso de microfibras de nailon.

También se incluye en este trabajo el estudio de la fisuración de losas con formaletas con restricción lateral, a la cual se le restringen los bordes mediante la fijación de ganchos de acero de 5 mm de diámetro a lo largo del perímetro del molde de acero (figura 3).



Figura 3. Formaleta metálica con ganchos laterales para restricción.

Para evitar la absorción o pérdida de agua, se utilizaron formaletas fabricadas en lámina de acero de 3 mm de espesor. De esta manera, el movimiento de agua libre en las placas puede ocurrir sólo hacia arriba, sin ninguna absorción de agua por la formaleta usada.

Las mezclas de concreto se prepararon de acuerdo con las proporciones de la mezcla presentadas en la tabla siguiente (tabla 1).

Las fibras se añadieron en tres fracciones de volumen diferentes: 1) 0,0018 %; 2) 0,0022 %; y 3) 0,0028

%. Se utilizó una microfibra de nailon Fiberstrand N (Toxement), que es una microfibra monofilamento de nailon para reforzamiento de concreto, especialmente diseñada para ayudar a mitigar la formación de contracción plástica en el concreto.

Tabla 1
Proporciones de mezclas en volumen utilizadas

Material	Volumen para mezcla (m ³ /m ³)		
	0 % ACR	50 % ACR	100 % ACR
Cemento	0,1299	0,1299	0,1299
Aire	0,02	0,02	0,02
Agua	0,2	0,2	0,2
Grava	0,340	0,163	0,353
Concreto reciclado	0	0,192	0,297
Arena	0,310	0,300	0,1299

La fibra utilizada, Fiberstrand N, cumple con la norma ASTM C-1116: Especificación estándar para concreto y concreto lanzado reforzado con fibra.

- Material: nailon monofilamento
- Gravedad específica: 1,16
- Punto de fusión: 260 °C (500 °F)
- Conductividad eléctrica: baja
- Absorción de agua a 20 °C: despreciable
- Longitud de fibra: ¾" (13 mm)
- Resistencia química a los ácidos y álcalis: excelente

El agregado fino corresponde a arena natural y un cemento Pórtland tipo III Cemex estructural. Los concretos se mezclaron a partir de las dosificaciones de los diferentes materiales y se vertieron en secuencia: agregado fino, agregado grueso, agua y cemento; en el caso de adición de fibra, las fibras sintéticas se vertieron inmediatamente después de que el concreto estaba mezclado y se mezcló durante tres minutos adicionales cuando se agregó la fibra. Luego de mezclar, la consistencia del concreto se midió con el ensayo de asentamiento. La mezcla de concreto se transportó en carretilla desde el patio de agregados hasta el laboratorio donde se ubicó el túnel de viento, a una distancia de 200 m, aproximadamente; después el concreto se colocó en la formaleta, se niveló y se enrasó. Las losas fueron niveladas manualmente y enrasadas en la dirección transversal, empleando cerca de 20 minutos en la operación de nivelación o enrase para mezclas con una adecuada manejabilidad.

Las losas se expusieron a las condiciones ambientales que se presentaron en el interior del laboratorio, es decir, la temperatura y humedad del aire del ambiente y velocidad del viento programada en el túnel de viento. La temperatura se midió durante todo el tiempo de ensayo (cinco horas) y para efectos de análisis de resultados se tomó el promedio de la temperatura, al igual que la humedad relativa. Cinco horas corresponde al tiempo de fraguado del cemento utilizado para las mezclas del programa experimental.

Las condiciones ambientales se midieron cerca de la salida del túnel, a una altura de 100 mm desde la parte superior de la muestra. Para la temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento se tomaron medidas cada diez segundos por espacio de cinco horas, tiempo de duración del ensayo.

La tasa de evaporación se calculó con los datos arrojados por las celdas de carga, que permiten medir el peso inicial de la mezcla de concreto y su descenso a lo largo del tiempo de ensayo. Esta diferencia de peso se divide entre el área de la superficie expuesta al viento de la losa (1,00 x 0,60 m) y entre el número de horas de exposición (5 horas), para obtener una tasa de evaporación en $\text{kg}/\text{m}^2/\text{hora}$. Cabe destacar que la variación del peso no es lineal, ya que puede medirse cada 30 minutos y así obtener una curva de pérdida de peso en el concreto; sin embargo, para esta investigación se tomaron un peso inicial y un peso final y se obtuvo una variación lineal.

Después de cinco horas de ensayo, la losa se retiró del túnel de viento y se examinó minuciosamente para trazar un esquema de fisuración, se midieron anchos y longitudes de fisuras y se determinó un porcentaje de área fisurada para cada losa.

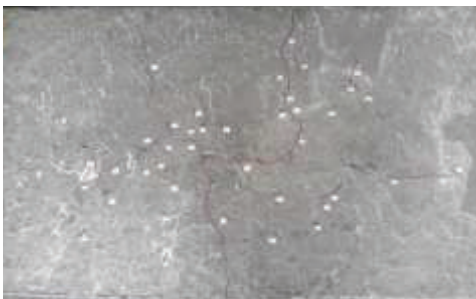


Figura 4. Aspecto de una losa con esquema de fisuración después del tiempo de ensayo.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se puede observar que el asentamiento de la mezcla 1 (0 % ACR) sin adición de microfibras alcanzó un valor promedio de 6,5 cm, con lo cual se comprueba que cumple con el diseño de mezcla planteado para una relación $a/C=0,50$. Para la mezcla 2, con 50 % ACR, se obtuvo una disminución en el asentamiento del 26 % con respecto a la mezcla con 0 % ACR. Esta variación en el asentamiento indica una alta pérdida de agua en la pasta, lo que genera una alta probabilidad de contracción por secado, así como de fisuración (figura 5).



Figura 5. Variación de la medida del asentamiento de acuerdo con el replazo de ACR en las mezclas 1, 2 y 3, sin adición y con adición de microfibras.

En la tabla siguiente se resumen los resultados de la prueba experimental realizada para evaluar la influencia de la velocidad del viento en la tasa de evaporación de agua, según el contenido de agregados de concreto reciclado (ACR), con restricción o sin ella, temperatura y humedad relativa promedio durante el tiempo de ensayo (tabla 2).

Igualmente, se observa que la tasa de evaporación se incrementa con el aumento de la velocidad del viento y que hay una ligera disminución en la tasa de evaporación con el incremento del porcentaje de agregado de concreto reciclado, atribuible a la alta absorción del agregado reciclado. Las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire se muestran variables durante el tiempo de ensayo, pero para efectos de evaluación de la evaporación se tomó el promedio de las temperaturas registradas durante el tiempo de ensayo. Datos del peso del concreto muestran la disminución con el incremento del porcentaje de agregado de concreto reciclado (ACR).

Tabla 2

Resumen de resultados de ensayos de losas sin adición de microfibras. Promedios de dos muestras para cada variable

VARIABLES			TASA DE EVAPORACION Kg/m ² /h	T°C PROMEDIO	HR% PROMEDIO	T°C PROMEDIO MEZCLA	PESO DEL CONCRETO kg	
SIN FIBRA	AGREGADO NATURAL	SIN RESTRICCION	8 Km/h	0,46	23	49	11	100
			18 Km/h	0,58	22	49	12	103
			30 Km/h	0,72	19	47	13	101
		CON RESTRICCION	8 Km/h	0,39	20	53	11	102
			18 Km/h	0,53	24	44	12	99
			30 Km/h	0,67	21	50	11	100
	50% RAC	SIN RESTRICCION	8 Km/h	0,41	21	50	10	99
			18 Km/h	0,55	25	37	10	97
			30 Km/h	0,69	20	47	11	100
		CON RESTRICCION	8 Km/h	0,48	23	40	10	98
			18 Km/h	0,64	19	58	11	97
			30 Km/h	0,77	23	43	11	99
100% RAC	SIN RESTRICCION	8 Km/h	0,37	22	39	9	98	
		18 Km/h	0,52	10	27	5	99	
		30 Km/h	0,66	20	56	12	95	
	CON RESTRICCION	8 Km/h	0,48	22	52	11	98	
		18 Km/h	0,63	22	46	11	94	
		30 Km/h	0,86	21	52	11	99	

Tabla 3

Resumen de resultados de ensayos de losas con adición de microfibras. Promedios de dos muestras para cada variable

VARIABLES			TASA DE EVAPORACION Kg/m ² /h	T°C PROMEDIO	HR% PROMEDIO	T°C PROMEDIO MEZCLA	PESO DEL CONCRETO kg	
CON FIBRA	AGREGADO NATURAL	SIN RESTRICCION	8 Km/h	0,38	9	27	5	107
			18 Km/h	0,41	21	47	10	107
			30 Km/h	0,44	19	58	13	106
		CON RESTRICCION	8 Km/h	0,17	19	57	11	105
			18 Km/h	0,55	20	45	11	104
			30 Km/h	0,66	18	57	11	102
	50% RAC	SIN RESTRICCION	8 Km/h	0,34	19	51	12	100
			18 Km/h	0,39	15	58	11	101
			30 Km/h	0,42	22	45	11	107
		CON RESTRICCION	8 Km/h	0,28	20	53	11	104
			18 Km/h	0,53	21	47	11	105
			30 Km/h	0,56	18	59	12	102
100% RAC	SIN RESTRICCION	8 Km/h	0,34	19	53	10	97	
		18 Km/h	0,38	17	59	11	99	
		30 Km/h	0,43	21	40	11	95	
	CON RESTRICCION	8 Km/h	0,32	17	58	12	94	
		18 Km/h	0,48	19	56	10	96	
		30 Km/h	0,55	20	52	11	99	

En la tabla anterior (tabla 3) se presentan los resultados de la prueba experimental realizada para evaluar la influencia de la velocidad del viento en la tasa de evaporación de agua en mezclas con adición de microfibras de nailon, según el contenido de agregados de concreto reciclado (ACR), con restricción o sin ella, temperatura y humedad relativa promedio durante el tiempo de ensayo.

Así mismo, puede apreciarse la influencia de la adición de microfibras. Comparando valores de las tablas 2 y 3, se observa que la tasa de evaporación para muestras sin adición de microfibras y sometidas a una velocidad del viento de 8 km/h oscila entre 0,37 y 0,46 kg/m²/hora, mientras que para losas con mezclas con adición de microfibras y sometidas a la misma velocidad oscila entre 0,34 y 0,38 kg/m²/hora, mostrando una disminución en la tasa de evaporación del 13 %, aproximadamente.

Partiendo de los resultados promedios indicados en las tablas 2 y 3, se elaboró la gráfica de la figura siguiente

(figura 6), en la que se muestra claramente la tendencia de la tasa de evaporación de agua dependiendo de la velocidad del viento y del contenido de ACR en la mezcla. La tasa de evaporación de agua se incrementa directamente con el aumento de la velocidad del viento para mezclas con el mismo contenido de % ACR, mientras que con el incremento del contenido de % ACR en la mezcla de concreto, la tasa de evaporación tiende a disminuir por efecto del alto porcentaje de absorción que tiene el agregado de concreto reciclado.

Se presentan ahora, los resultados obtenidos para la tasa de evaporación en función de la velocidad del viento para diferentes contenidos de ACR, con el fin de analizar la incidencia que tiene la adición de microfibras en la evaporación en este tipo de mezclas (figura 7).

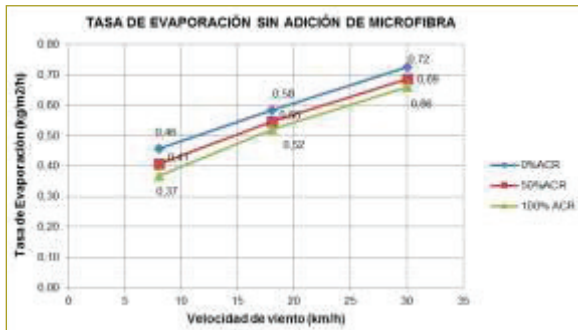


Figura 6. Gráfico de tasa de evaporación para losas con mezclas a diferentes velocidades de viento, diversos contenidos de % ACR y relación A/C=0,5.

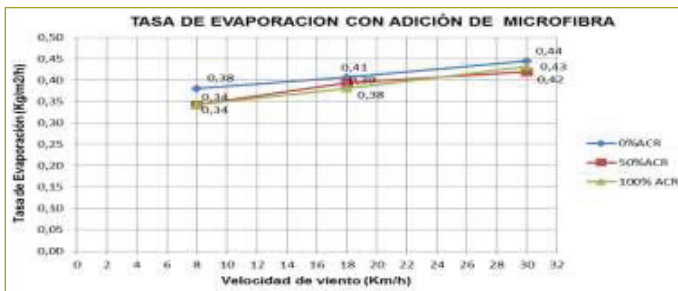


Figura 7. Gráfico de tendencia de la tasa de evaporación en función de la velocidad del viento para diferentes contenidos de ACR, en mezclas con adición de microfibra.

Los resultados encontrados para la tasa de evaporación en mezclas con adición de microfibra muestran, evidentemente, una notoria reducción en estos valores con respecto a las mezclas sin adición de microfibra.

A continuación se presentan los valores obtenidos para la tasa de evaporación en mezclas sin adición de microfibra y con adición de microfibra, con lo que se pretende facilitar la comparación de resultados y observar la incidencia del uso de microfibras en la tasa de evaporación en losas que tienen diferente contenido de ACR (tabla 4).

Tabla 4

Comparativo de los valores de la tasa de evaporación de agua en mezclas sin adición de microfibra

Mezcla	Tasa de evaporación de agua en kg/m²/h					
	Sin adición de fibra			Con adición de fibra		
	8 km/h	18 km/h	30 km/h	8 km/h	18 km/h	30 km/h
0 % ACR	0,46	0,58	0,72	0,38	0,34	0,34
50 % ACR	0,41	0,55	0,69	0,34	0,39	0,42
100 % ACR	0,37	0,52	0,66	0,34	0,38	0,43

Los valores presentados con anterioridad permiten evidenciar que la inclusión de microfibras en las mezclas de concreto reduce notoriamente la tasa de evaporación, por su contribución a disminuir la exudación del concreto.

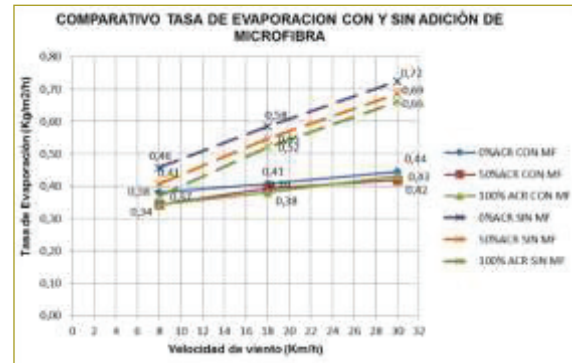


Figura 8. Gráfico comparativo de la tasa de evaporación en mezclas sin adición de microfibra y con adición de microfibra.

GRADO DE FISURACIÓN

La fisuración o el agrietamiento es el efecto más visible e indeseable, como consecuencia de la contracción del concreto en su estado plástico durante el tiempo de secado. Generalmente, se supone que el agrietamiento por contracción plástica se desarrolla cuando la tasa de evaporación supera la velocidad a la que el agua de exudación se presenta en la superficie [2].

Tomando en cuenta que los agregados de concreto reciclado (ACR) se caracterizan por tener una alta absorción, dicha condición cuenta en el rápido secamiento de la pasta, lo que puede contribuir a la formación de fisuras o grietas en la superficie del concreto. Tal situación conduce a la realización de este estudio, en el que se pretende evaluar el grado de fisuración en losas de concreto con inclusión de diferentes porcentajes de ACR.

En la página siguiente se muestra la tendencia del área fisurada en la losa en función de la velocidad del viento y del contenido de agregado reciclado (figura 9).

El porcentaje de área fisurada crece notoriamente con el incremento del ACR, y tiene un ligero aumento cuando se incrementa la velocidad del viento, en losas con diferentes contenidos de ACR. A continuación se puede apreciar que la variación del porcentaje de área fisurada en el sentido vertical es mayor que la variación en el sentido horizontal, lo que indica que hay una mayor

incidencia en la fisuración por el contenido de ACR que por la velocidad del viento (figura 9).

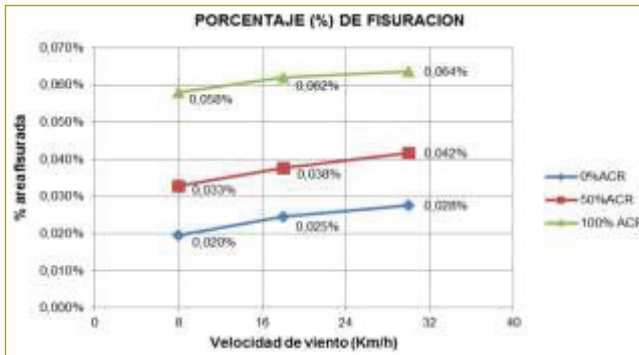


Figura 9. Gráfico de valores del porcentaje de área fisurada en losas a diferentes velocidades de viento y diversos contenidos de ACR, sin adición de fibra y relación a/C=0,5.

Con respecto a la restricción ante la contracción, se pudo evidenciar que el área fisurada aumenta en esta condición, en relación con la losa en formaleta sin restricción. La combinación de retracción y restricción desarrolla tensiones de tracción dentro del concreto, que aparte de la baja resistencia a la tracción inherente al concreto, se genera la fisuración (figura 10) [6].

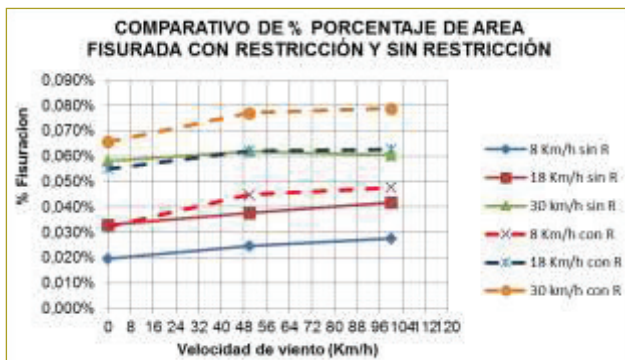


Figura 10. Gráfico comparativo de la tendencia del porcentaje de área fisurada con restricción y sin restricción.

La adición de microfibras en el concreto contribuye a la reducción de la tasa de evaporación, cuyo efecto beneficioso también se puede evidenciar en la disminución de la fisuración. Para determinar el comportamiento de las mezclas con la adición de microfibras, se realizaron varios ensayos en los cuales se fue incrementando el porcentaje de microfibras hasta encontrar el porcentaje óptimo, de tal manera que la fisuración fuera cero (0 %).

Después de varios ensayos se logró establecer el porcentaje óptimo de adición de microfibras para 0 % de área fisurada, así:

Tabla 5

Contenidos de microfibras de nailon para reducción de área fisurada 0 %

Contenido ACR	8 km/h	18 km/h	30 km/h
0 % ACR	0,0020 %	0,0023 %	0,0023 %
50 % ACR	0,0026 %	0,0027 %	0,0027 %
100 % ACR	0,0028 %	0,0028 %	0,0028 %

A renglón seguido se observan los resultados de los ensayos realizados para determinar el porcentaje de adición de microfibras requerido para control del área fisurada, en losas con diferente contenido de agregado reciclado y a diversa velocidad del viento (figura 11).

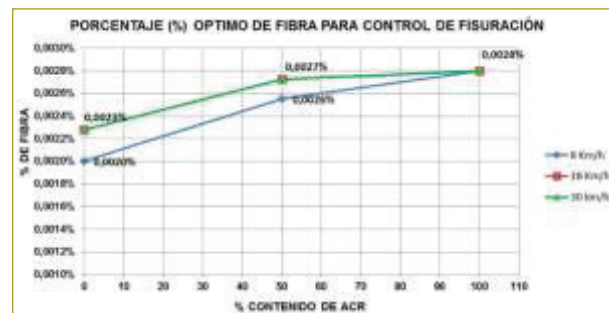


Figura 11. Gráfico de valores de porcentaje óptimo de fibra para control de fisuración en mezclas con diferente contenido de ACR, diversa velocidad del viento y relación a/C=0,5.

Esto para mezclas de concreto que formaron parte del programa experimental y con relación A/C=0,5.

También se hicieron pruebas de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, y se hallaron resultados acordes con otras investigaciones, en las cuales la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad se reducen con el incremento del agregado reciclado. La adición de microfibras contribuye al incremento de la resistencia a la compresión y del módulo elástico.

CONCLUSIONES

- La tasa de evaporación en losas de concreto se incrementa directamente con el aumento en la velocidad del viento, debido principalmente a la exudación del

concreto, con lo cual el agua sube a la superficie y se evapora rápidamente por acción del viento.

- De acuerdo con los resultados obtenidos en mezclas con ACR, la velocidad del viento tiene una mayor incidencia en la tasa de evaporación que la absorción de los agregados de concreto reciclado.
- En losas con alto contenido de agregado de concreto reciclado (% ACR), la tasa de evaporación de agua tiende a una ligera disminución en relación con el concreto con agregado natural, debido posiblemente a la incidencia que tiene el porcentaje de absorción de los agregados de concreto reciclado.
- Para losas con mezclas con mayor contenido de % ACR, la tasa de evaporación tiende a una ligera disminución, mientras que el porcentaje de área fisurada aumenta considerablemente, debido al incremento del % ACR.
- Los resultados de la evaluación de área fisurada muestran un mayor incremento con el aumento en el contenido de agregado de concreto reciclado que con el incremento de la velocidad del viento.
- Los resultados experimentales han demostrado que la adición de microfibras de nailon a la mezcla de concreto fue más eficiente para restringir consi-

derablemente la formación de fisuras debido a la contracción plástica.

REFERENCIAS

- [1] Natalani, M.B., Klees, D.R. & Tirner (2000).
- [2] Shaeles, C.A. & Hover, K.C. (s.f.). Influence of mix proportions and construction operations on plastic shrinkage cracking in thin slabs. *ACI Mater J*.
- [3] ACI Committee 305 (1991). *Hot weather concreting* (ACI 305.R-91). American Concrete Institute, Farmington Hills, 20 pp.
- [4] Kraai, P.P. (1985). A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete. *Concr Construct*, 30(9):775-8.
- [5] Rodríguez & Montardo, 2002. Como se cita en el documento La influencia de fibras sintéticas en las propiedades de hormigones frescos, de la revista *Ingeniería de Construcción* (20, abril de 2015). Ruiz Sibaja, A., López Ríos, J. & Martínez Jiménez, J.
- [6] Comité ACI 224 (2001). *Control de la fisuración en estructuras de concreto*. American Concrete Institute.
- [7] Soroushian, P., Mirza, F. & Alhozaimy, A. (1995). Plastic shrinkage cracking of polypropylene fiber reinforced concrete. *ACI Mater J*, 92(5):553-560.
- [8] Naaman, A.E., Wongtanakitcharoen. T. & Hauser, G. (2005). Influence of different fibers on plastic shrinkage cracking of concrete. *ACI Mater J*, 102(1):49-58.
- [9] Gluzhge, P.J. (1946). El trabajo del Instituto Científico de Investigación c. *Gidrotekhnicheskoye Stroitel'stvo*, 4:27-28 [en ruso].
- [10] Nixon, P.J. (1976). *Reciclado agregado del hormigón es un hormigón*. Una revisión. 37-DRC comité, pp. 317-318.