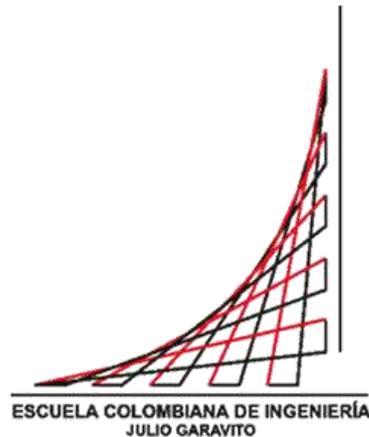


Estudio de la influencia de la restricción en la fisuración por contracción plástica en losas de concreto con agregados reciclados y uso de microfibras



Ing. Paola Andrea Zafra Torres

Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito"
Faculta de Ingeniería Civil
Bogotá D.C, Colombia
2015

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

Paola Andrea Zafra Torres
Ingeniera Civil

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en estructuras

Director:
Ing. Pedro Nel Quiroga Saavedra Ph.D
Ingeniero Civil

Línea de investigación:
Materiales

Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito"
Faculta de Ingeniería Civil
Bogotá D.C, Colombia
2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado “**Estudio de la influencia de la restricción en la fisuración por contracción plástica en losas de concreto con agregados reciclados y uso de microfibras.**”, presentado por Paola Zafra Torres en cumplimiento del requisito parcial para optar al título de Especialista en Estructuras, fue aprobado por el director del proyecto dirigido.

Ing. Pedro Nel Quiroga Saavedra
Ph.D
Director de trabajo de grado

Resumen

Se realizó un programa experimental para investigar la fisuración por contracción plástica en losas de concreto con agregados reciclados, (ACR) en muestras de 1,00 m x 0,60 m x 0,08 m, relación agua cemento 0,50, y tres contenidos diferentes de agregados reciclados (0%, 50% y 100%). Se utilizaron dos tipos de formaletas, si y con restricción lateral, la cual es provista por ganchos de acero rígido de diámetro 5 mm a manera de pestañas fijados mediante soldadura a lo largo de todo el perímetro a una altura de 5 cm desde el fondo de la formaleta y con una separación de 10 cms entre ellos.

La Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito” cuenta con un túnel de viento, en el cual se expusieron las losas a velocidades de viento de 8 km/h, 18 km/h y 30 km/h, las variables de temperatura y humedad relativa del aire fueron variables medidas en laboratorio, y por pruebas experimentales se determinó el porcentaje óptimo de microfibras de nylon para el control de la fisuración por contracción plástica en las losas con restricción lateral.

Se realizaron ensayos de tiempo de fraguado obteniéndose el fraguado inicial para muestras sin exposición a viento de 3.5 horas, reduciéndose al aumentar la velocidad del viento, por lo cual se realizaron las pruebas con exposición al viento durante 5 horas (tiempo en el cual se presenta la contracción plástica del concreto).

Se analizó que las losas con mayor porcentaje de agregado reciclado (ACR), presentaron mayor fisuración que las losas con agregados naturales (AN). Adicionalmente la velocidad del viento incrementa la tasa de evaporación de agua en concretos con agregados naturales (AN), mientras que para concretos con mayores contenidos de agregados reciclados (ACR) la tasa de evaporación de agua está influenciada por la velocidad del viento y en menor incidencia la absorción del agregado reciclado (ACR).

Adicionalmente, se realizaron pruebas para analizar la dosificación de microfibras para el control de la fisuración en losas de concreto con restricción lateral y con agregados

reciclados (ACR) determinándose que es mayor que la requerida para losas de concreto con agregados naturales (AN).

Palabras clave:

Contracción plástica.

Restricciones en losa.

Agregados reciclados.

Fisuración.

Velocidad del viento.

Microfibras

Abstract

An experimental program was conducted to investigate the plastic shrinkage cracking in concrete slabs with recycled aggregates (ACR) in samples of 1.00 mx 0.60 mx 0.08 m, 0.50 water cement ratio, and three different contents recycled aggregate (0%, 50% and 100%). Two types of formwork used, if and lateral restraint, which is provided by hooks rigid steel 5 mm diameter by way of tabs fixed by welding along the entire perimeter at a height of 5 cm from the bottom of the formwork and with a separation of 10cm between them.

The Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito” has a wind tunnel, in which slabs at wind speeds of 8 km/h, 18 km/h and 30 km/h were exposed, the variables of temperature and relative humidity were variable air laboratory measurements, and experimental tests the optimum percentage nylon microfiber control plastic shrinkage figuration into slabs with lateral restraint was determined.

Tests setting time obtaining the initial set for samples without exposure to wind 3.5 hours, reduced with increasing wind speed, thus testing wind exposure were performed for 5 hours (at which time it is presented were performed plastic shrinkage of concrete).

Analyzed the slabs with the highest percentage of recycled aggregate (ACR) had higher cracking the tiles with natural aggregates (AN). Additionally the wind speed increases the rate of evaporation of water in concrete with natural aggregates (AN), whereas concrete with higher content of recycled aggregates (ACR) the evaporation rate of water is influenced by the wind speed and less impact absorption recycled aggregate (ACR).

Additionally, tests were conducted to analyze the dosage of microfibers for crack control in concrete slabs with lateral restraint and recycled aggregates (ACR) being determined which is greater than that required for concrete slabs with natural aggregates (AN).

Keywords:

Plastic shrinkage.

Recycled aggregates.

Cracking.

Wind Speed.

Microfibers

Contenido

Lista de figuras.....	9
Lista de tablas	11
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2. Estado del arte.....	16
2.1 Retracción por secado y fisuración en el concreto	16
2.2 Concreto con agregados de concreto reciclado	18
2.3 Efecto de restricción lateral en losas.....	18
2.4 Uso de micro fibras.....	19
3. Programa experimental.....	21
3.1 GENERALIDADES	21
3.2. Caracterización de los materiales de las mezclas.....	23
3.2. Mezclas utilizadas en el programa experimental.....	26
3.2 RESULTADOS	27
3.2.1. Efecto de la restricción en el grado de fisuración por contracción plástica en losas de concreto con ACR.	27
3.2.1.1. Cantidad de fisuras	27
3.2.1.2. Longitud de Fisuras	34
3.2.1.3. Fisuras de borde.....	39
3.2.1.3. Patrón de fisuración	40
3.2.2. Efecto del remplazo de agregado con ACR en el grado de fisuración plástica en losas de concreto	44
3.2.3. Efecto del remplazo de agregado con ACR en el grado de el porcentaje de evaporación en losas de concreto.	45
3.2.4. Uso se microfibras en losas de concreto para reducción de fisuración.	49
CONCLUSIONES.....	53
BIBLIOGRAFIA	56

Lista de figuras

Figura 1 Esquema fisuración del concreto provocada por la retracción por secado. Extraída del documento ACI- Comité 224, 2001.....	19
Figura 2 Interior y exterior del túnel de viento.....	21
Figura 3 Formaleta con restricción sobre mesa en posición para ingresar a túnel de viento.	22
Figura 4 Cantidad total de fisuras en losas de mezclas con diferentes remplazos de agregado.....	28
Figura 5. Fisura de espesor 0.02mm. Fisura # 32 M1-18-C-0 (14 marzo/14).....	30
Figura 6. Fisura de espesor entre 0.2 a 0.4mm. Fisura #34 M 3-30-C-0 (02 jun/14)...	30
Figura 7. Fisura de espesor mayor a 0.4mm. Fisura # 28 M 2-18-C-0 (04 abr/14).....	31
Figura 8 Cantidad de fisuras en mezclas con diferentes remplazos de agregados expuestas a diferentes velocidades de viento.	31
Figura 9 Valores del porcentaje de área fisurada en losas a diferentes velocidades de viento, diferentes contenidos de ACR, sin adición de fibra y relación a/C=0,5.....	32
Figura 10 Gráfico incremento de fisuración en losas a con incrementos de velocidad del viento de 10 y 12 km/h, con diferentes contenidos de ACR, sin adición de fibra y relación a/c=0,5.....	34
Figura 11 Longitudes máximas y mínimas de fisuras en losas sin y con restricción en mezclas con diferentes remplazos de agregados, expuestas a diferentes velocidades de viento.....	35
Figura 12 Longitudes mínimas de fisuras en losas sin y con restricción en mezclas con diferentes remplazos de agregados, expuestas a diferentes velocidades de viento. ..	36
Figura 13 Características de fisuras de longitud máxima – Longitud v/s espesor	37
Figura 14 Características de fisuras de longitud mínima – Longitud v/s espesor	37
Figura 15 Espesor promedio de fisuras de borde en losas sin y con restricción en mezclas con diferentes remplazos de agregados expuestas diferentes velocidades de viento.	39
Figura 16 Comparativo entre muestras con restricción y sin restricción, en mezclas con diferentes remplazos de agregados expuestas diferentes velocidades de viento.	40
Figura 17 Patrones de fisuración de losas con y sin restricción, para mezcla con 0% de ACR	41
Figura 18 Patrones de fisuración de losas con y sin restricción, para mezcla con 50% de ACR	42
Figura 19 Patrones de fisuración de losas con y sin restricción, para mezcla con 100% de ACR	43
Figura 20 Curvas porcentaje de remplazo de ACR V/S fisuración para diferentes muestras con restricción y sin restricción, en mezclas expuestas diferentes velocidades de viento.	45
Figura 21 Curvas porcentaje de velocidad de viento V/S tasa de evaporación para diferentes muestras con restricción y sin restricción	46

Figura 22 Curvas porcentaje de % contenido de ACR V/S tasa de evaporación para losas con restricción y sin restricción expuestas a diferentes velocidades de viento. .	47
Figura 23 Curvas de velocidad de viento V/S tasa de evaporación para diferentes muestras con restricción y sin restricción y con adición de fibra en 0.5	48
Figura 24 Losas con restricción de mezclas de ACR a expuesta a viento de 8km/h...	50
Figura 25 Losas con restricción de mezclas de ACR a expuesta a viento de 16 km/h.	51
Figura 26 Losas con restricción de mezclas de ACR a expuesta a viento de 24 km/h	52

Lista de tablas

Tabla 1 Resumen caracterización de agregados.....	24
Tabla 2 Resistencia a la abrasión de los ACR usados en los ensayos	24
Tabla 3. Resultados de los tiempos de fraguado de pasta de cemento	25
Tabla 4. Características físico- químicas del cemento	25
Tabla 5 Mezclas y variables usadas en la investigación	26
Tabla 6 Cantidad de fisuras por espesor	30
Tabla 7 Porcentaje de fisuración para cada tipo de mezcla	32
Tabla 8 Incremento de fisuración en losas a con incrementos de velocidad del viento de 10 y 12 km/h, con diferentes contenidos de ACR, sin adición de fibra y relación $a/C=0,5$	33
Tabla 9. Longitudes máximas y mínimas de fisuras en losas sin y con restricción en mezclas con diferentes remplazos de agregados, expuestas a diferentes velocidades de viento.....	34
Tabla 10. Características de las fisuras de longitud máxima y mínima en losas sin y con restricción en mezclas con diferentes remplazos de agregados, expuestas a diferentes velocidades de viento.	38
Tabla 11 Valores de espesores promedio de las fisuras de borde en losas sin y con restricción en mezclas con diferentes remplazos de agregados, expuestas a diferentes velocidades de viento.	39
Tabla 12. Fisuración de diferentes muestras con restricción y sin restricción, en mezclas con diferentes remplazo de ACR expuestas diferentes velocidades de viento	45
Tabla 13 velocidad de viento V/S tasa de evaporación para diferentes muestras con restricción y sin restricción	46
Tabla 14 Velocidad de viento V/S tasa de evaporación para diferentes muestras con adición de fibra de 0.5, en losas con restricción y sin restricción	49
Tabla 15 Fisuración en losas con restricción para diferentes muestras con diferentes porcentajes de adición de fibra.....	49

Introducción

El hormigón es uno de los materiales más utilizados de construcción en el mundo, principalmente debido a sus características favorables, tales como durabilidad, versatilidad, resistencia a la compresión satisfactoria, la rentabilidad y la disponibilidad. Sin embargo, el uso de hormigón convencional es considerado como poco amable con el medio ambiente, y frecuentemente se expresan preocupaciones tales como el agotamiento de la reserva de recursos naturales, de alto consumo de energía y problemas de disposición final (Yang, Du, & Bao, 2011).

El uso de agregados reciclados para la producción de concreto, contribuye al desarrollo sostenible de la construcción, debido a que mediante las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción se reducen los impactos ambientales y es una solución viable al agotamiento de recursos naturales de explotación de cantera.

En España, Alemania, Reino Unido, Australia, Bélgica, Japón y EE.UU, entre otros, han dado importancia al uso de agregados reciclados en la construcción, desarrollando distintas normativas para estandarizar el uso de agregados reciclados en el concreto.

Agrietamiento por contracción es un problema importante para estructuras de hormigón, especialmente para estructuras planas, tales como pavimentos de autopistas, losas y muros. (Mesbah & Buyle-Bodin, 1999). Por lo tanto es importante evaluar el comportamiento de las losas de concreto con agregados reciclados, con relación a su fisuración para garantizar un comportamiento adecuado y de gran durabilidad.

(Alhozaimy & Al-neghimish, 2009) en pruebas desarrolladas en losas analizadas en ambientes al interior ventilados, en interior al aire libre y al exterior, evidenciaron que las grietas dominantes eran por lo general largas y aparecieron cerca y a lo largo (Alhozaimy & Al-neghimish, 2009) de las barras de refuerzo subyacentes, ya que estas proporcionan restricción de movimiento al concreto.

Este proyecto, que tiene como objetivo estudiar el efecto de las restricciones laterales sobre el aumento en la fisuración en losas de concreto con agregados reciclados expuestas a diferentes velocidades de viento y el uso de microfibras para control de la fisuración. Los resultados obtenidos aportarán un referente más para el uso 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.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar la influencia de la restricción en losas de concreto con tres porcentajes de agregados reciclados en la tasa de evaporación, en el grado de fisuración por contracción plástica y la inclusión de tres diferentes cuantías de micro fibra utilizando un túnel de viento, para tres velocidades del viento como agente externo.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar las características de fisuración causada por contracción plástica en losas de concreto con restricción lateral y diferentes porcentajes de agregados reciclados.
- Evaluar la influencia de la velocidad del viento en la tasa de evaporación de agua en losas de concreto con restricción lateral y con agregados reciclados, así como su influencia en la contracción plástica.
- Determinar la relación entre la fisuración temprana en losas de concreto con restricciones laterales y con agregados reciclados y la adición de diferentes cuantías de microfibra.

- Establecer la relación más favorable entre porcentaje de agregado reciclado y porcentaje de microfibras dentro de la mezcla de concreto para el control de la fisuración en estado plástico en losas con restricción laterales.
- Evaluar los patrones de fisuración con la medición de la longitud y ancho de las fisuras causadas por contracción plástica en placas de concreto con restricciones laterales y con agregados reciclados con diferentes porcentajes de microfibras y diferentes velocidades de viento usando un túnel de viento.

2. Estado del arte

2.1 Retracción por secado y fisuración en el concreto

La retracción es un fenómeno del hormigón, que está directamente relacionado con la pérdida de agua en la mezcla de forma progresiva, experimentando variaciones de volumen, dilataciones o contracciones, durante su vida útil. La retracción no es una fuerza aplicada sino que es una deformación impuesta al hormigón que provocará tensiones de tracción. Se pueden identificar básicamente cuatro tipos de retracción, estas son: retracción plástica, retracción autógena, retracción por secado y retracción térmica. En este documento solo se analizarán la retracción plástica y por secado.

La retracción por secado del hormigón es la disminución de volumen provocada por la pérdida de agua. La retracción por secado se puede definir como la deformación lineal dependiente del tiempo a temperatura constante medida sobre una probeta que sin carga se deja secar (CómiteACI224, 2001).

La contracción plástica ocurre con más frecuencia en superficies horizontales en donde la relación volumen/área es baja, también en condiciones climáticas no favorables (alta velocidad del viento, alta temperatura y baja humedad del medio ambiente. Al igual que por exceso de manipulación del concreto durante su colocación, compactación y acabado (ASOCRETO, Colección básica del concreto. Tecnología y propiedades, 2000).

Los cambios de volumen en tres dimensiones en el hormigón fresco se producen principalmente por la rápida pérdida de agua de exudación superficial por evaporación. El hormigón fresco es susceptible a la fisuración por retracción plástica especialmente durante condiciones de clima caluroso, ventoso y seco (Grzybowski & Shah, 1990).

Es evidente que las mezclas con mayor contenido de pasta tienen una mayor tendencia a agrietarse, del mismo modo, se ha demostrado que la formación de grietas por contracción plástica es influenciada por el enrasado y las operaciones de

acabado siendo la mayoría de grietas formadas paralelas a la dirección de enrasado (Kraai, 1985).

Diferentes programas experimentales han determinado que cuando la tasa de evaporación es significativamente más alta que la tasa de exudación, se pueden causar altos esfuerzos de tracción a desarrollar en los poros capilares en la zona de la superficie de concreto que pueden ser suficientes para superar la resistencia a la tracción del concreto, sobre todo en edades tempranas. (Sivakumar & Santhanam, 2007).

El agrietamiento inicial del concreto comienza a ocurrir a la edad de aproximadamente 1 hora. La mayoría de las grietas se produce dentro de 4 horas. (Kraai, 1985)

(McCarter & Ben-Saleh, 2001) realizaron un análisis de la Influencia de métodos prácticos de curado en la evaporación del agua de concreto fresco en climas cálidos, observando a partir de mediciones de temperatura interna en elementos de concreto de 135 × 235 × 105 mm (profundidad) en muestras curadas al medio ambiente, que después de 24 horas el hormigón ha entrado en equilibrio térmico y al final de la prueba de 72-h período en que la tasa de pérdida por evaporación ha alcanzado un valor casi constante de 0,02 kg/m² h. Durante el período de prueba (72-h), la tasa de evaporación de las muestras de control podría ser dividida en tres regiones:

1. Un período inicial en el cual velocidad de secado permanece constante (0-3 h) para después aumentar gradualmente hasta la máxima, aproximadamente a las 6 h;
2. Un período de reducción rápida de la tasa de secado de 6-24 h; Seguido de
3. Un período de disminución de la tasa de secado lento en la consecución de un casi valor constante a 72 h.

Existen dos razones principales para limitar el agrietamiento de elementos de concreto reforzado: apariencia de la estructura y corrosión del refuerzo. Los órdenes de límites en los anchos de grietas acuerdo algunos reglamentos son 0.1 a 0.2 mm para ambientes agresivos, y de 0.2 a 0.4mm para ambientes normales. (González Cuevas & Robles, 2004).

2.2 Concreto con agregados de concreto reciclado

En las últimas dos décadas se han desarrollado, una variedad de métodos de reciclado de residuos de construcción y demolición. Por ejemplo, como uno de los principales componentes en residuos de construcción y demolición, escombros de concreto han sido utilizados para reemplazar agregados naturales después de ser triturados. Esto se conoce como agregado de concreto reciclado (Yang, Du, & Bao, 2011).

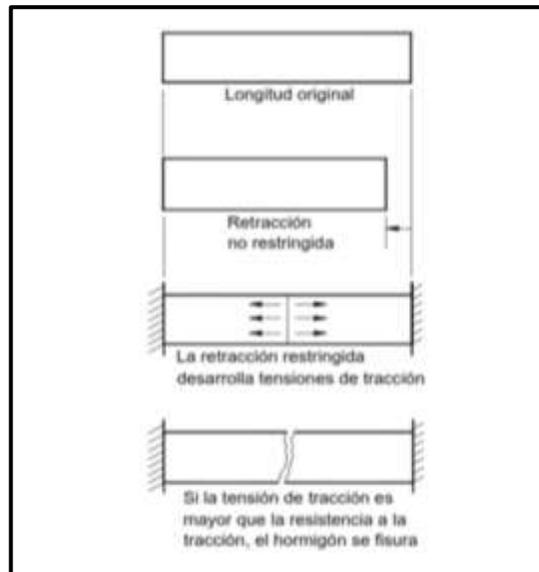
En estudios anteriores se ha encontrado que una de las diferencias más notables entre el agregado de concreto reciclado y el natural es la absorción de agua. Así mismo los resultados de ensayos han mostraron que la densidad decrece en el concreto de agregado reciclado, pero la diferencia en la densidad no era tan grande como los de la absorción de agua (Yang, Du, & Bao, 2011).

Estudios realizados por (Mesbah & Buyle-Bodin, 1999) sobre la eficiencia de fibras de polipropileno y metálicas en control de agrietamiento de morteros con agregados reciclados evidenció que muestras después de 180 días, presentaron aumento de peso notable en las curvas experimentales de la contracción frente al porcentaje de secado. Esto es debido al fenómeno de carbonatación, unido a una fuerte porosidad de los morteros con agregado reciclado. Así mismo los morteros agregados reciclados indujeron una gran contracción comparado con mortero con arena natural.

2.3 Efecto de restricción lateral en losas

La contracción (debida la retracción por secado) de un componente de hormigón de una estructura siempre está sujeta a algún grado de restricción por parte de las fundaciones, otra parte de la estructura o las armaduras de acero empotradas en el hormigón. La combinación de retracción y restricción desarrolla tensiones de tracción dentro del hormigón. Debido a la baja resistencia a la tracción inherente al hormigón, con frecuencia habrá fisuración (Figura 1) (CómiteACI224, 2001).

Figura 1 Esquema fisuración del concreto provocada por la retracción por secado. Extraída del documento ACI- Comité 224, 2001



En muchas circunstancias bajo las cuales deben actuar la estructura y los elementos de hormigón existe restricción. Algunos ejemplos típicos muestran cómo la restricción puede provocar fisuración si la resistencia del hormigón no es suficiente para soportar las tracciones que se desarrollan (CómiteACI224, 2001).

Como consecuencia de las diferencias de temperatura o de la retracción por secado en dos secciones adyacentes es posible que haya restricción donde cambia la geometría de la sección. Si fuera posible se puede usar una junta de contracción para aliviar esta restricción. En losas y pavimentos de hormigón hay restricción debida al anclaje de las armaduras en zapatas de hormigón perimetrales. Cuando todos los lados de una losa se pueden retraer libremente hacia el centro la fisuración es mínima. Se deberían diseñar juntas de contracción y apoyos perimetrales tomando esto en consideración (CómiteACI224, 2001).

2.4 Uso de micro fibras

Actualmente el uso de microfibras ha aumentado su uso en mezclas de concreto y mortero, con el fin de prevenir el agrietamiento por contracción. El uso de fibras

reducen la fisuración, en resultados experimentales tal como se determinó en estudios de contracción plástica en concreto con humo de sílice de alta resistencia con incorporación de combinaciones híbridas de fibras, donde se redujeron significativamente las grietas por contracción plástica por la adición de fibra (por 50-99% en comparación con el hormigón simple y sin fibras); así mismo se determinó que fibras híbridas fueron más eficaces en la reducción de grietas en comparación con fibras de acero individuales (Sivakumar & Santhanam, 2007).

Las fibras de polipropileno son muy eficaces en el control de fisuración por retracción plástica en el hormigón. En general, las fibras reducen el área completa de agrietamiento, el ancho de fisura máximo y el número de grietas. Al aumentar la fracción de volumen de fibra, aumenta la eficacia de la fibra. Pruebas experimentales con monofilamentos de igual longitud (12.5 mm) y de dos diámetros (3 y 6 denier) indicaron que son más eficaces las fibras más finas, así mismo se espera que la fibra más fina tenga un área superficial mayor que permita unir mejor la matriz de mortero, dando como resultado una mayor transferencia de esfuerzos de tracción a la fibra, mejorando la concentración y la resistencia al crecimiento de grietas (Banthia & Gupta, 2006).

3. Programa experimental

3.1 GENERALIDADES

Se llevó a cabo un programa experimental en el Laboratorio de Materiales del Departamento de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería, en la ciudad de Bogotá D.C., para investigar la fisuración por contracción plástica en losas de concreto con agregados reciclados, (ACR) en muestras de tres contenidos diferentes de agregados reciclados (0%, 50% y 100%), relación agua cemento 0,50 y expuestas a velocidades de viento de 8 km/h, 18 km/h y 30 km/h.

Dentro de la línea de investigación de materiales se formuló el estudio de la fisuración por contracción plástica en losas de concreto con agregados reciclados y uso de microfibras, en donde se analizaron muestras sin restricción y con restricción. Correspondiendo a este documento los análisis de muestras con restricción.

Para realizar los laboratorios a diferentes velocidades, se utilizó el túnel de viento que tiene dimensiones de sección transversal rectangular de 67 cm de ancho por 37 cm de altura y una longitud de 3,30 m, y una longitud total del túnel de 4,00 m, desde el punto de ubicación de la turbina hasta la salida del túnel.

Figura 2 Interior y exterior del túnel de viento.



Las dimensiones de las muestras son de 1,00 m x 0,60 m x 0,08 m con restricción lateral, provista por ganchos de acero rígido de diámetro 5 mm a manera de pestañas fijados mediante soldadura a lo largo de todo el perímetro a una altura de 5 cm desde el fondo de la formaleta y con una separación de 10 cms entre ellos. Esta formaleta se ubico en la parte inferior del túnel, con ayuda de una mesa metálica móvil, donde se soporto la formaleta en tres sensores de carga, que permitieron medir la pérdida de peso, representado en el agua durante las 5 horas de la prueba.

Así mismo, se colocaron 8 termocuplas, las cuales midieron la temperatura de las pruebas a tres profundidades, siendo superficial, a mitad de espesor y al fondo de la losa.

Estos ganchos de acero al interior de la formaleta imponen restricción al movimiento de la pasta de cemento y permiten la formación de grietas en las placas. Así mismo reduce las fisuras de borde que se presentan cuando la losa esta libre.

Figura 3 Formaleta con restricción sobre mesa en posición para ingresar a túnel de viento.



3.2. Caracterización de los materiales de las mezclas

La investigación se realizó con agregados de concreto reciclado (ACR) producidos en la Escuela Colombiana de Ingeniería provienen de concretos de diferentes resistencias, con diferentes tipos de adiciones y características. Los materiales de arena y agregado natural utilizados en el programa experimental, tienen la siguiente caracterización:

Gravilla natural de ¾"

Peso unitario: Norma NTC 174 (Quinta actualización)- ASTM C 29-78

Peso unitario suelto= 1036 kg/m³
 Peso unitario compactado= 1493 kg/m³

Densidad y absorción: Norma NTC 176 (Primera actualización) ASTM C 128-84

Densidad aparente= 2,338 g/cm³
 Densidad nominal= 2.600 g/cm³
 Absorción= 4.3%

Granulometría: Norma NTC 78 (Segunda actualización) ASTM C 136 – 84a y C117-87

- **Arena**

Peso unitario: Norma NTC 174 (Quinta actualización)- Norma ASTM C 29-78

Peso unitario suelto= 1568 kg/m³
 Peso unitario compactado= 1742 Kg/m³

Densidad y absorción: Norma NTC 176 (primera actualización) ASTM C 128-84

Densidad aparente= 2,593 g/cm³
 Densidad condición. Saturada y seca= 2,633 g/cm³
 Densidad nominal= 2,700 g/cm³
 Absorción= 1.5%

Contenido de materia orgánica: Norma NTC 127 (Tercera actualización) ASTM C 40 – 84

Resultado=

Coloración No. 1

Granulometría: Norma NTC 78 (Segunda actualización) ASTM C 136 – 84a y C117-87

- **Concreto triturado**

Peso unitario: Norma ASTM C 29-78Peso unitario suelto= 1134,5 Kg/m³Peso unitario compactado= 1294,8 Kg/m³**Densidad y absorción: Norma ASTM C 128-84**Densidad aparente= 2,107 g/cm³Densidad nominal= 2,635 g/cm³

Absorción= 9.5%

Resistencia a la abrasión: Norma NTC-98 (ASTM C131)

Tabla 1 Resumen caracterización de agregados

Material	Grava natural ¾"	Arena	Concreto Reciclado
Peso Unitario suelto	1035.7 Kg/m ³	1568.1 Kg/m ³	1134,5 Kg/m ³
Peso Unitario Compactado	1493.4 Kg/m ³	1741.7 Kg/m ³	1294,8 Kg/m ³
Densidad Aparente	2,338 g/cm ³	2,593 g/cm ³	2,107 g/cm ³
Densidad nominal	2,600 g/cm ³	2,700 g/cm ³	2,635 g/cm ³

Tabla 2 Resistencia a la abrasión de los ACR usados en los ensayos

Gradación usada	A
No. de esferas	12
No. de revoluciones	500
Peso inicial (g)	5000
Peso final (g)	3422
Pérdida (g)	1578
% de Desgaste	31.6

Granulometría: Norma ASTM C 136 – 84a y C117-87

En el anexo 9, se presente la curva granulométrica para el concreto triturado usado en los ensayos

- **Cemento (Portland)**: Tipo Estructural

Consistencia normal: Norma NTC 110 (ASTM C 187)

Densidad: Norma NTC 221 (ASTM C 188)

Tiempos de fraguado: Norma (NTC 110)

Se realizó ensayo con método de aguja de Vicat y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3. Resultados de los tiempos de fraguado de pasta de cemento

Velocidad del viento km/h	Tiempo Fraguado inicial en minutos	Tiempo de fraguado final en minutos
0	147	210
8	120	150
18	99	131
30	79	112

Finura: Norma NTC 33 (ASTM C204)

Tabla 4. Características físico- químicas del cemento

Características del Cemento	
Composición química (%)	
SiO ₂	20,02
Al ₂ O ₃	4,12
CaO	62,15
Fe ₂ O ₃	3,59
MgO	1,40
K ₂ O	0,39
Propiedades Físicas	
Densidad (g/cm ³)	3,10
Finura (cm ² /g)	4350
Tamaño promedio de Partícula (µm)	19,85

- **Micro-fibra de Nylon FIBERSTRAND N(TOXEMENT)**

FIBERSTRAND N cumple con la norma ASTM C-1116: Especificación estándar para concreto y concreto lanzado reforzado con fibra.

FIBERSTRAND N cumple con diferentes partes aplicables del International Code Council (ICC) Acceptance Criteria (AC) 32 para fibras sintéticas.

INFORMACION TECNICA
CARACTERISTICAS FISICO QUIMICA

- Material : Nylon 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

3.2. Mezclas utilizadas en el programa experimental

Las mezclas realizadas para el análisis de la restricción en losas, fueron las siguientes:

Tabla 5 Mezclas y variables usadas en la investigación

Mezcla	% de agregado reciclado.	Velocidad del viento			% de fibra	Restricción	Relación A/C
		8 km/h	18 km/h	30 km/h			
1	0%	8 km/h	18 km/h	30 km/h	0%	Con	0.50
2	50%	8 km/h	18 km/h	30 km/h	0%	Con	0.50
3	100%	8 km/h	18 km/h	30 km/h	0%	Con	0.50
1	0%	8 km/h	18 km/h	30 km/h	0,19%	Con	0.50
2	50%	8 km/h	18 km/h	30 km/h	0,23%	Con	0.50
3	100%	8 km/h	18 km/h	30 km/h	0,23%	Con	0.50

En las figuras siguientes la siguiente convención: M1, M2 y M3 para muestras con remplazo de ACR en 0%, 50% y 100%, con restricción: C y Sin restricción: S y seguido por el % de fibra adicionado a la mezcla.

Se realizaron dos muestras de cada combinación de variables, siendo realizadas 36 losas con restricción en total.

Para analizar la incidencia del remplazo de agregado reciclado en las mezclas, se analizaron porcentajes de remplazo del 0%, 50% y del 100% de agregado, con el fin de representar condiciones extremas en el comportamiento del concreto con ACR cuando sufre contracción por secado.

La máxima velocidad del viento que puede simularse en el túnel existente en la Escuela Colombiana de Ingeniería es de 30km/h, por lo cual fue incluido dentro del análisis esta variable, en tres valores, 8 km/h, 18 km/h y 30 km/h.

Con el propósito de determinar la incidencia de la restricción lateral en la contracción plástica y la fisuración de la losa, se incluye la restricción con ganchos en los 4 bordes de la formaleta de losa. Los ganchos utilizados son de acero rígido de diámetro 5 mm a manera de pestañas fijados mediante soldadura a una altura de 5 cm desde el fondo de la formaleta y con una separación de 10 cm entre ellos. Estos ganchos de acero al interior de la formaleta imponen restricción al movimiento de la pasta de cemento, con el fin de permitir la formación de grietas en las placas.

Así mismo, se incluyen tres porcentajes de microfibras, con el fin de determinar el porcentaje óptimo al adicionar a la mezcla, para reducir la fisuración.

3.2 RESULTADOS

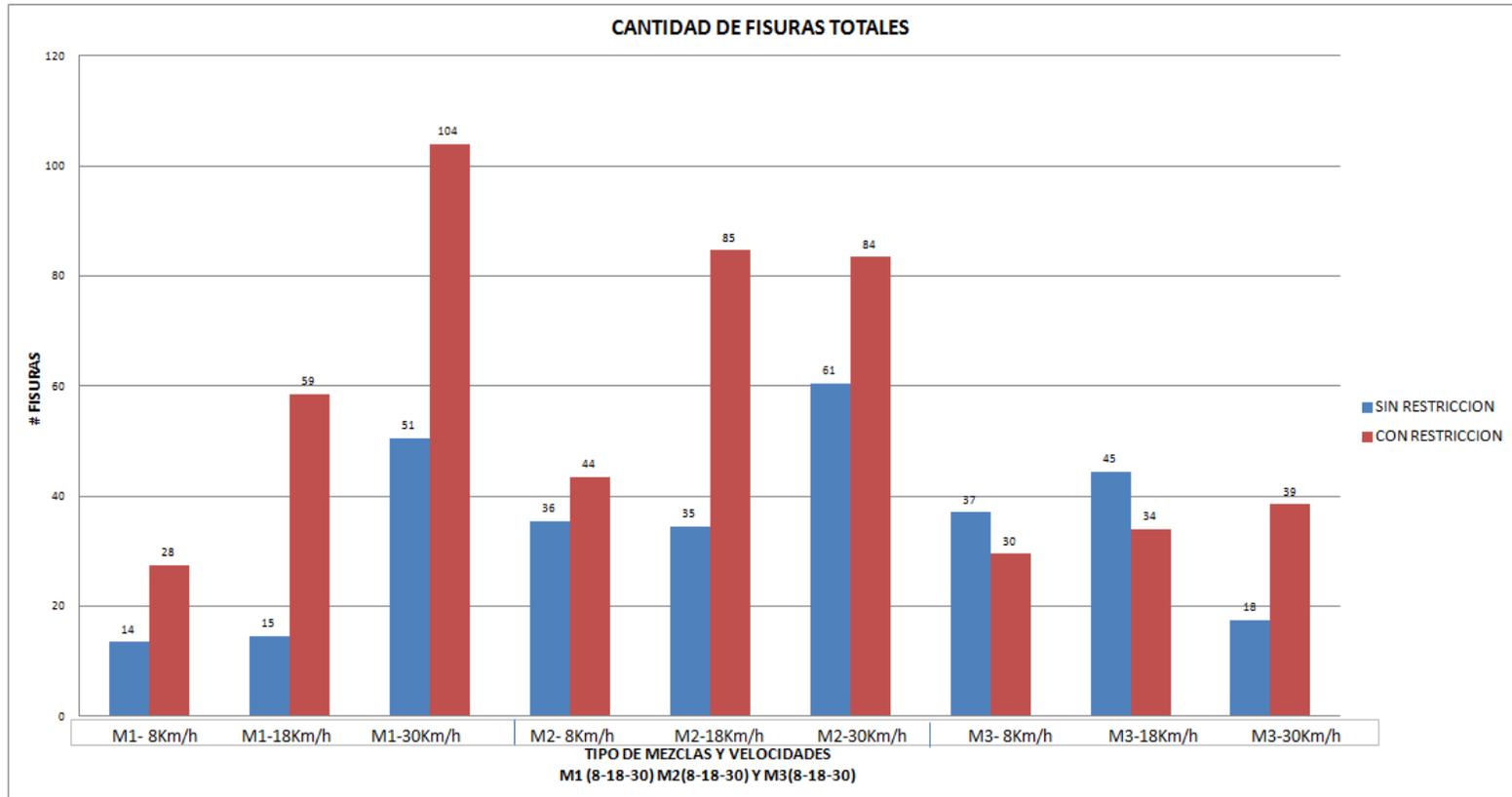
La toma de resultados se realizó de dos formas, al término de las 5 horas en el túnel del viento, se sacaron las losas y posteriormente se realizó evaluación visual con lupa, para determinar las fisuras en toda la superficie de la losa incluyendo sus bordes, a cada una se tomó la longitud y el espesor con un comparador de fisuras. Los datos de temperatura y pérdida de peso, fueron tomados por las termocuplas y los sensores de carga, registrados en el programa de computador y descargados en hoja excel.

3.2.1. Efecto de la restricción en el grado de fisuración por contracción plástica en losas de concreto con ACR.

3.2.1.1. Cantidad de fisuras

Realizadas las pruebas en las diferentes losas, se encontró que el número de fisuras en las losas con restricción fue mayor a las losas sin restricción, con excepción en la muestra M3 (con remplazo del 100% ACR) con velocidad de viento de 8 y 18 km/h.

Figura 4 Cantidad total de fisuras en losas de mezclas con diferentes remplazos de agregado



Adicionalmente, se ve un incremento en el número de fisuras al aumentar la velocidad del viento en las mezclas M1 (0%ACR) y M2 (50%ACR). En las mezclas M3, el aumento del viento no incrementa el número de fisuras. Lo cual puede indicar que tiene mayor influencia el tipo de agregado en la fisuración. No es posible determinar un punto de comparación ya que en la bibliografía consultada, no se encuentran estudios que analicen la incidencia de la restricción en losas de concreto con ACR.

El comportamiento del número de fisuras, puede tener influencia del ancho de fisuras y el porcentaje de área fisurada, por lo que más adelante se analizará esta característica en la fisuración de las losas.

Realizando un análisis comparativo, sobre los espesores de las fisuras, se encuentra que en las mezclas M1 (0%ACR) y M2 (50%ACR) la cantidad de fisuras es mucho mayor en las losas con restricción respecto a sin restricción, siendo estas del orden del 200% en la M1, y del 250% al 150% de la M2 respecto a las losas sin restricción.

Un comportamiento en el número de fisuras similar en la M3 a velocidad de 30 km/h, respecto a las mezclas 1 y 2. Pero se evidencia que las muestras M3 a velocidades de 8 y 18 km/h tienen mayor número de fisuras que a velocidad de viento de 30 km/h. Con lo cual podría afirmarse a mayor remplazo de agregado, la velocidad del viento tiene menor influencia en la fisuración que el efecto del agregado reciclado, por factores como la alta absorción de agua y el efecto de adherencia entre el ACR con la pasta.

Así mismo, al observar la tendencia de cantidad de fisuras en la figura 4, la incidencia de la restricción es mayor en muestras sin remplazo de agregados y al aumentar el % de ACR disminuye, a diferente velocidad de viento, por lo cual podría llegar a afirmarse que la incidencia del %ACR es mayor que la restricción lateral.

En todos los casos comparativos, se muestra que la mayoría de fisuras tienen espesores menores a 0.2mm tanto en las losas sin y con restricción.

A continuación se muestra la tabla de cantidades de fisuras clasificadas según espesor:

Tabla 6 Cantidad de fisuras por espesor

VELOCIDAD (km/h)	MEZCLA	e:0.1 a 0.2 mm	e:0.2a 0.4 mm	e:>0.4 mm	MEZCLA	e:0.1 a 0.2 mm	e:0.2a 0.4 mm	e:>0.4m m
8	1-S-0	11	2	1	1-C-0	23	5	1
18		7	5	3		51	6	3
30		50	1	0		100	3	1
8	2-S-0	34	2	0	2-C-0	39	3	2
18		33	1	1		81	3	1
30		57	3	1		81	3	0
8	3-S-0	32	4	2	3-C-0	22	5	3
18		41	3	2		27	5	3
30		17	1	0		37	2	0

Figura 5. Fisura de espesor 0.02mm. Fisura # 32 M1-18-C-0 (14 marzo/14)



Figura 6. Fisura de espesor entre 0.2 a 0.4mm. Fisura #34 M 3-30-C-0 (02 jun/14)



Figura 7. Fisura de espesor mayor a 0.4mm. Fisura # 28 M 2-18-C-0 (04 abr/14)



Figura 8 Cantidad de fisuras en mezclas con diferentes remplazos de agregados expuestas a diferentes velocidades de viento.



Analizando el número de fisuras, se observó en todas las muestras que el mayor número de fisuras es de espesores menores a 0.2 mm. Así mismo, para muestras M1(0%ACR) y M2(50%ACR) los comportamientos de cantidades de fisuras son similares, aumentando con el incremento de velocidad del viento, en contraste con las muestras M3 (100% ACR), son menores que para muestras con menores remplazos de ACR. Además en losas sin restricción se presentaron menos fisuras que en losas con restricción.

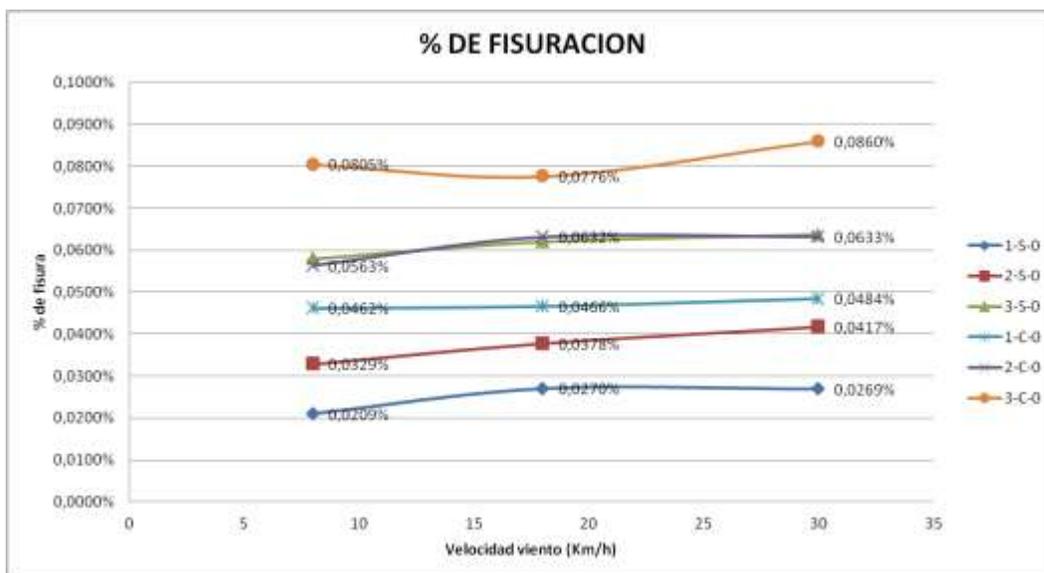
Realizando un análisis teniendo como referencia el área de la superficie expuesta de la losa, calculando el porcentaje de área fisurada, y comparar el efecto de la restricción con los resultados de las losas sin restricción se muestra en la tabla 7. El cálculo del área fisurada se realizó con la siguiente fórmula:

$$\text{Área fisurada} = [\sum (\text{Long} \times \text{Ancho}) / (600 \times 1000)] * 100$$

Tabla 7 Porcentaje de fisuración para cada tipo de mezcla

VELOCIDAD	MEZCLA	% fisuración	MEZCLA	% fisuración
8	1-S-0	0,0196%	1-C-0	0,0462%
18		0,0246%		0,0466%
30		0,0277%		0,0484%
8	2-S-0	0,0329%	2-C-0	0,0563%
18		0,0378%		0,0632%
30		0,0417%		0,0633%
8	3-S-0	0,0579%	3-C-0	0,0805%
18		0,0620%		0,0776%
30		0,0637%		0,0860%

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



En la figura 6 se observa que las muestras con restricción tienen un porcentaje de área fisurada mayor que las losas sin restricción. Así mismo que al aumentar la velocidad, aumenta el porcentaje de fisuración.

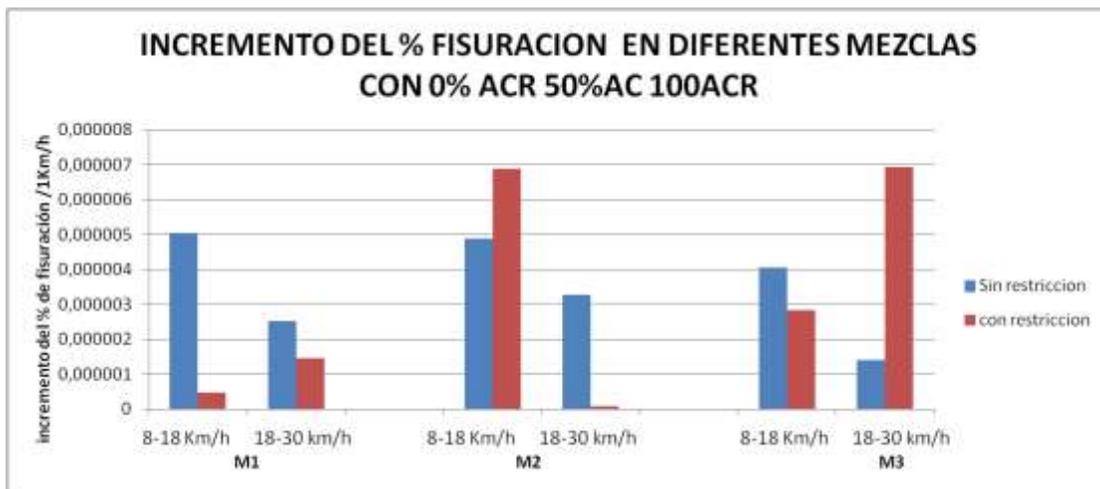
Al realizar un análisis del aumento de fisuración para todas las muestras, respecto al aumento de velocidad del viento, se calculó la diferencia (Δ) de aumento del área fisurada, de los datos tomados de las muestras con velocidad del viento de 18km/h a 8 km/h, y de 30km/h a 18 km/h, y se calculó el aumento de porcentaje (%) de área fisurada en una unidad de velocidad de viento (km/h); obteniéndose que este incremento no tiene un patrón similar para losas sin restricción y con restricción.

En la figura 7, se observa que en losas sin restricción, con diferentes remplazos de ACR, al aumentar la velocidad aumenta la fisuración de forma más sensible en velocidades menores a 18 km/h. Un comportamiento diferente se da en muestras homogéneas (0% y 100% ACR) con restricción, ya que a velocidades altas (superiores a 18 km/h), el aumento de fisuración es mayor más sensible.

Tabla 8 Incremento de fisuración en losas a con incrementos de velocidad del viento de 10 y 12 km/h, con diferentes contenidos de ACR, sin adición de fibra y relación a/C=0,5

Δ velocidad viento	mezcla	Δ %fisuración	Δ %fisuración /1km/h	mezcla	Δ %fisuración	Δ %fisuración / 1km/h
8 A 18	1-S-0	0,0050%	5,04167E-06	1-C-0	0,0004%	4,71708E-07
18 A 30		0,0031%	2,52701E-06		0,0018%	1,47454E-06
8 A 18	2-S-0	0,0049%	4,90157E-06	2-C-0	0,0069%	6,88194E-06
18 A 30		0,0039%	3,28993E-06		0,0001%	7,63889E-08
8 A 18	3-S-0	0,0041%	4,04877E-06	3-C-0	0,0029%	2,84546E-06
18 A 30		0,0017%	1,40901E-06		0,0007%	6,9403E-06

Figura 10 Gráfico incremento de fisuración en losas a con incrementos de velocidad del viento de 10 y 12 km/h, con diferentes contenidos de ACR, sin adición de fibra y relación a/c=0,5.



3.2.1.2. Longitud de Fisuras

Dentro de la toma de datos, para cada muestra se midió el espesor y longitud de cada una de las fisuras presentadas sobre la superficie superior de las losas, en este numeral se muestran los datos de las fisuras máximas observadas en cada prueba, en la tabla 9 contiene los datos de las longitudes máximas y mínimas observadas en las pruebas, realizando un promedio ya que para cada tipo de muestra se realizaron dos pruebas en laboratorio.

Tabla 9. Longitudes máximas y mínimas de fisuras en losas sin y con restricción en mezclas con diferentes remplazos de agregados, expuestas a diferentes velocidades de viento.

VELOCIDAD	MEZCLA	L max (cm)	Lmin (cm)	MEZCLA	L max (cm)	Lmin (cm)
8	1-S-0	16,5	2,25	1-C-0	13,5	1
18		13	2,25		13,9	0,95
30		11,5	0,5		14	0,5
8	2-S-0	10,05	0,85	2-C-0	10,5	1
18		15,25	1		12	0,5
30		8,15	0,75		19,5	0,75
8	3-S-0	24,5	0,55	3-C-0	44,5	1,25
18		8	9		19	1,25
30		1,35	7		11	1

Figura 11 Longitudes máximas y mínimas de fisuras en losas sin y con restricción en mezclas con diferentes remplazos de agregados, expuestas a diferentes velocidades de viento.

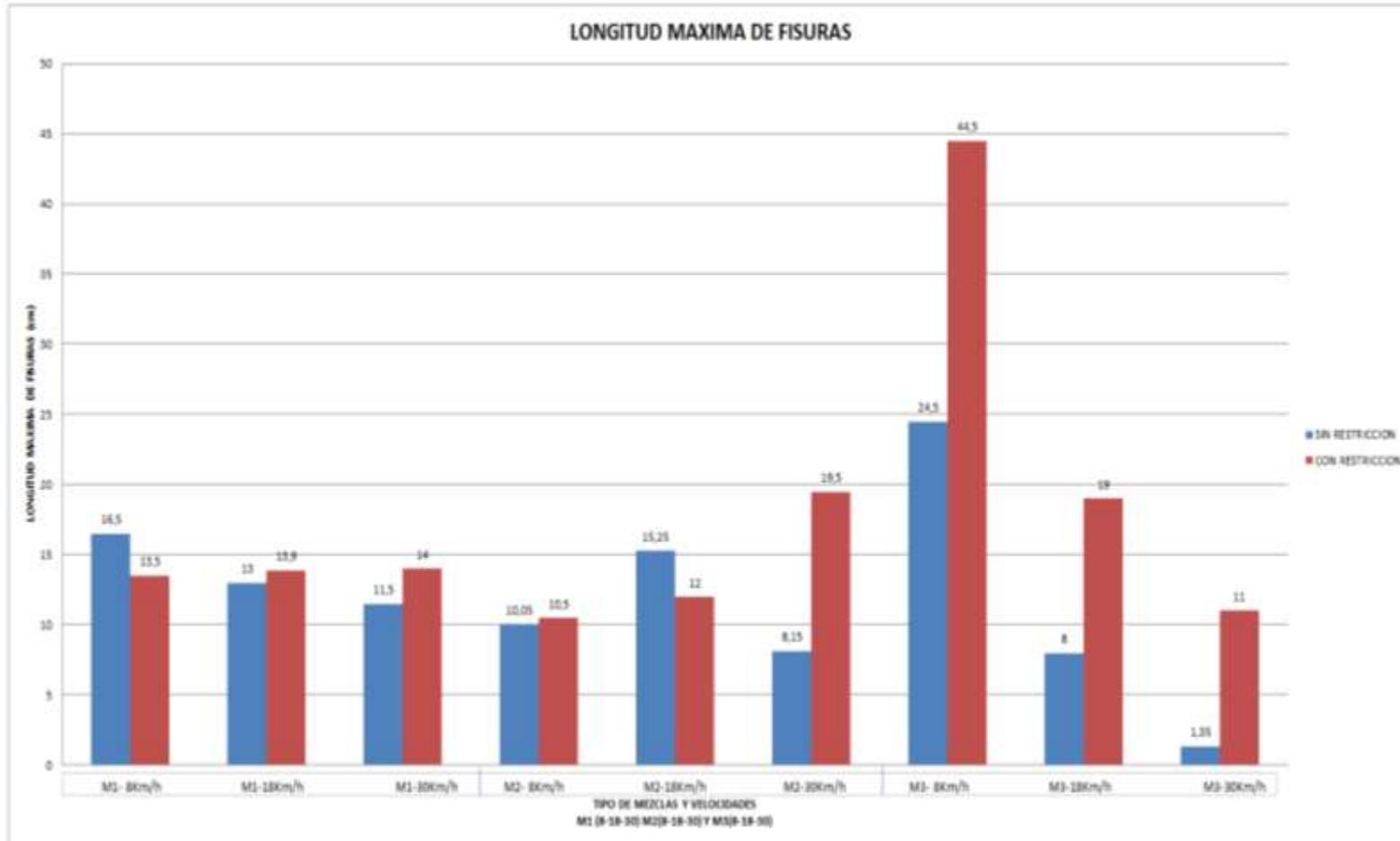
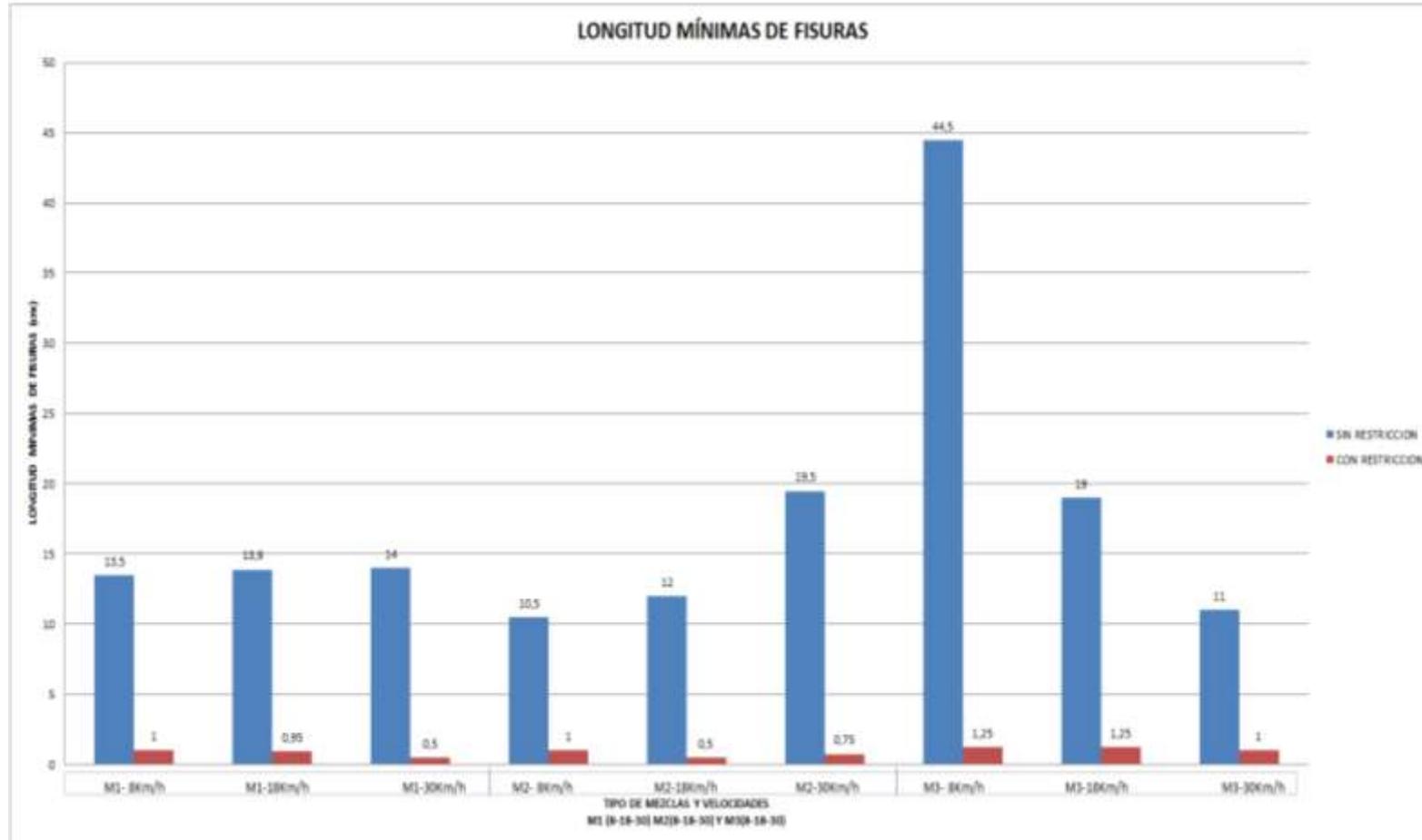


Figura 12 Longitudes mínimas de fisuras en losas sin y con restricción en mezclas con diferentes remplazos de agregados, expuestas a diferentes velocidades de viento.



Realizando un análisis de las máximas y mínimas longitudes de fisuras, acuerdo figura 11 se observó que las fisuras de mayor longitud se presentan en mezclas con el mayor % de ACR, así mismo esta tendencia esta en las longitudes mínimas, acuerdo figuras 11 y 12.

Así mismo, realizando una caracterización cualitativa, sin tener en cuenta la velocidad del viento, se hizo una observación de las longitudes máximas y mínimas frente a su espesor, y acuerdo las figuras 13 y 14 se muestra que en general las fisuras máximas de las muestras son de mayor espesor cuando estas son más largas, mientras que las fisuras de longitud mínima de las muestras tienden a ser de espesor de 0.1 y 0.2 mm.

Figura 13 Características de fisuras de longitud máxima – Longitud v/s espesor

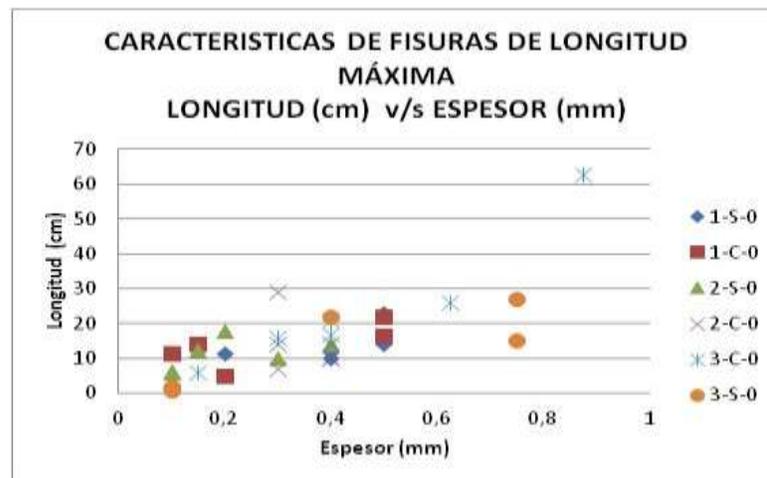


Figura 14 Características de fisuras de longitud mínima – Longitud v/s espesor

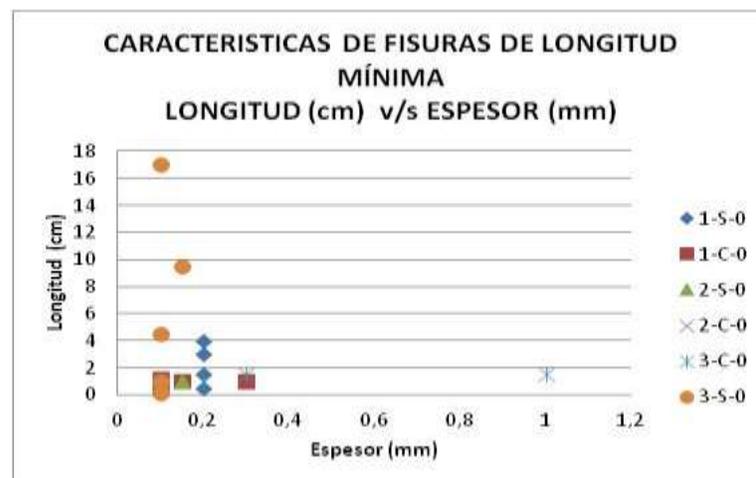


Tabla 10. Características de las fisuras de longitud máxima y mínima en losas sin y con restricción en mezclas con diferentes remplazos de agregados, expuestas a diferentes velocidades de viento.

VELOCIDAD	MEZCLA	L Max (cm)	e (mm)	L Min (cm)	e (mm)	L max promedio (cm)	Lmin promedio (cm)	MEZCLA	L Max (cm)	e (mm)	L Min (cm)	e (mm)	L max promedio (cm)	Lmin promedio (cm)
8	1-S-0	10	0,4	4	0,2	16,5	2,25	1-C-0	5	0,2	1	0,15	13,5	1
		23	0,5	0,5	0,2				22	0,5	1	0,3		
12		0,4	3	0,2	13	2,25	16,5		0,5	1,2	0,1	13,9	0,95	
18		14	0,5	1,5	0,2				11,3	0,1	0,7	0,1		
30		11,5	0,2	0,5	0,1	11,5	0,5		14	0,15	0,5	0,1	14	0,5
		11,5	0,2	0,5	0,1				14	0,15	0,5	0,1		
8	2-S-0	6,1	0,1	0,7	0,1	10,05	0,85	2-C-0	7	0,3	1	0,1	10,5	1
		14	0,4	1	0,1				14	0,4	1	0,1		
12,5		0,15	1	0,15	15,25	1	14		0,3	0,5	0,1	12	0,5	
18		18	0,2	1	0,15				10	0,4	0,5	0,1		
30		6,3	0,1	0,5	0,1	8,15	0,75		10	0,4	0,5	0,1	19,5	0,75
		10	0,3	1	0,1				29	0,3	1	0,1		
8	3-S-0	27	0,75	1	0,1	24,5	0,55	3-C-0	26	0,625	1	0,1	44,5	1,25
		22	0,4	0,1	0,1				63	0,875	1,5	1		
15		0,75	1	0,1	8	9	21		0,4	1	0,1	19	1,25	
18		1	0,1	17	0,1				17	0,4	1,5	0,3		
30		2	0,1	9,5	0,15	1,35	7		6	0,15	1	0,2	11	1
		0,7	0,1	4,5	0,1				16	0,3	1	0,1		

3.2.1.3. Fisuras de borde

La restricción lateral de las losas desarrolla tensiones de tracción dentro del hormigón por la combinación de las fuerzas de retracción y restricción. En las pruebas realizadas a las diferentes muestras, se puede evaluar que la restricción lateral redujo la fisuración de borde de las losas, ya que no permite la contracción libre del concreto.

Figura 15 Espesor promedio de fisuras de borde en losas sin y con restricción en mezclas con diferentes remplazos de agregados expuestas diferentes velocidades de viento.

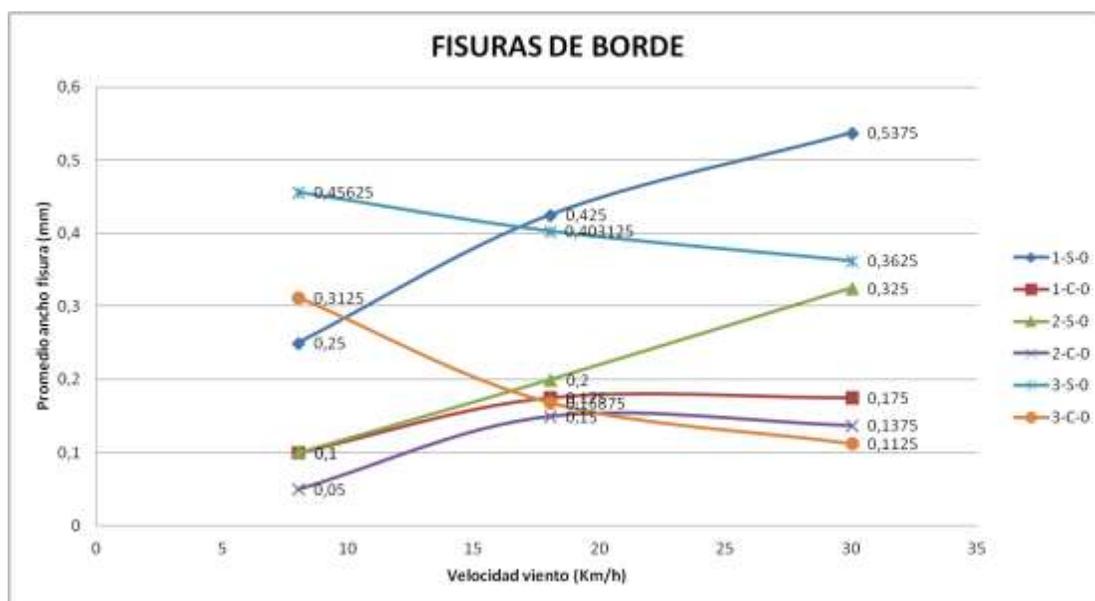


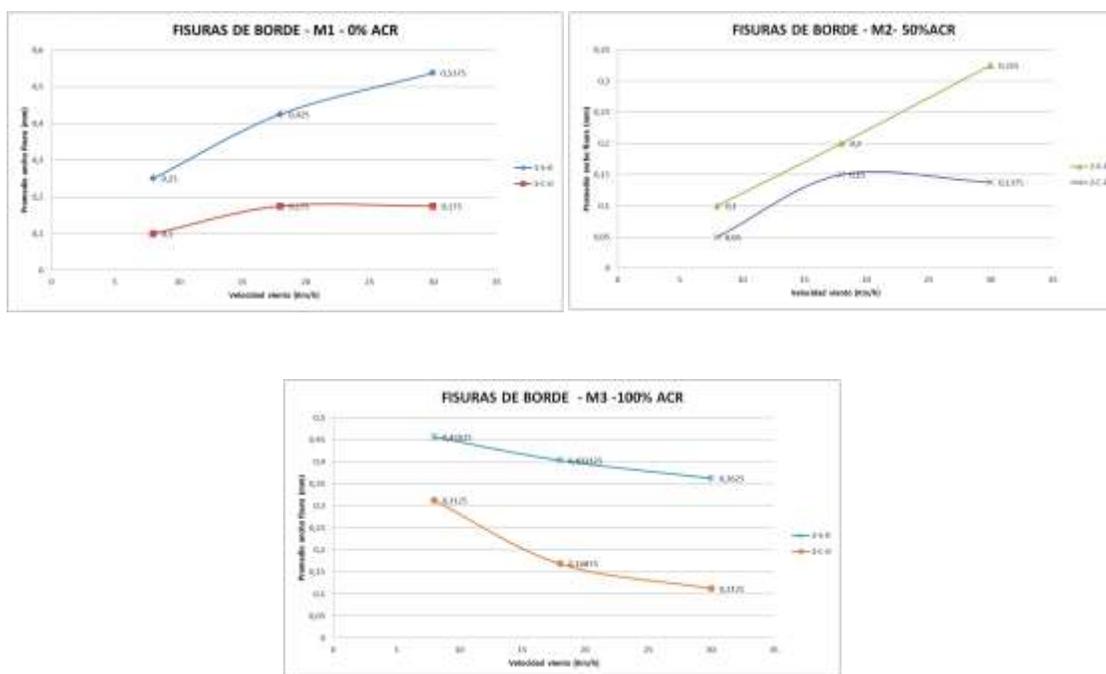
Tabla 11 Valores de espesores promedio de las fisuras de borde en losas sin y con restricción en mezclas con diferentes remplazos de agregados, expuestas a diferentes velocidades de viento.

VELOCIDAD	FISURA DE BORDE			
	MEZCLA	e (mm)	MEZCLA	e (mm)
8	1-S-0	0,250	1-C-0	0,100
18		0,425		0,175
30		0,538		0,175
8	2-S-0	0,100	2-C-0	0,050
18		0,200		0,150
30		0,325		0,138
8	3-S-0	0,456	3-C-0	0,313
18		0,403		0,169
30		0,363		0,113

Si bien no se evidencia un patrón de comportamiento de la fisuración de borde de las losas, esto puede ser debido a las diferentes variables que no son controladas en el laboratorio, como los son la temperatura y humedad, ya que influyen directamente sobre las muestras. Pero los resultados nos permiten observar que a mayor velocidad de viento el espesor de fisura de borde es menor para las muestras con restricción lateral.

Para todos los casos analizados, el ancho de fisura de borde fue menor en las losas con restricción lateral, acuerdo como se muestra en la figura 9. Así mismo, se analizará más adelante los patrones de fisuración de las losas con restricción lateral.

Figura 16 Comparativo entre muestras con restricción y sin restricción, en mezclas con diferentes remplazos de agregados expuestas diferentes velocidades de viento.



3.2.1.3. Patrón de fisuración

El patrón de fisuración de las losas muestra los diferentes comportamientos de las losas con mezclas de concreto con diferentes remplazos de ACR por el efecto de los ganchos que proporcionan restricción de borde, así mismo el efecto de la velocidad de

viento a cual fueron expuestas las muestras en la fisuración, a continuación se presenta un comparativo de las losas y su análisis.

Figura 17 Patrones de fisuración de losas con y sin restricción, para mezcla con 0% de ACR

M1-8-S-0 (08 marzo/14)



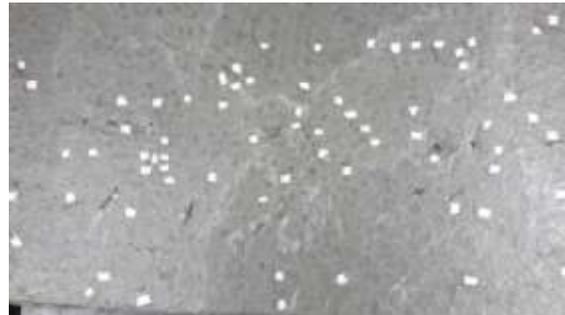
M1-8-C-0 (01 marzo/14)



M1-18 -S-0 (02 mar/14)



M1-18 -C-0 (14 mar/14)



M1-30-S-0 (06 abr/14)



M1-30-C-0 (26 abr/14)



En las fotografías se muestra la numeración de las fisuras, con cinta de enmascarar, con lo que a simple vista, se puede apreciar comparativamente la diferencia del número de fisuras entre las placas. Además se observa que sin tener como referencia el número de fisuras de cada losa, las que tienen restricción, tienen un mayor número de fisuración hacia los bordes. Las losas sin restricción tienen tendencia de fisurarse en el área central. Así mismo, el patrón de fisuración mayor es perpendicular a la corriente de viento, sin importar si la losa tiene o no restricción lateral.

Figura 18 Patrones de fisuración de losas con y sin restricción, para mezcla con 50% de ACR

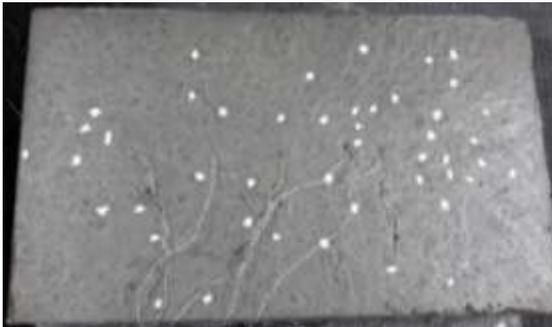
M2-8-S-0 (21 mar/14)



M2-8-C-0 (22 mar/14)



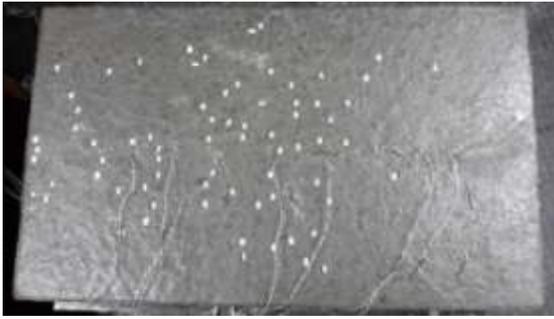
M2-18-S-0(21 mar/14)



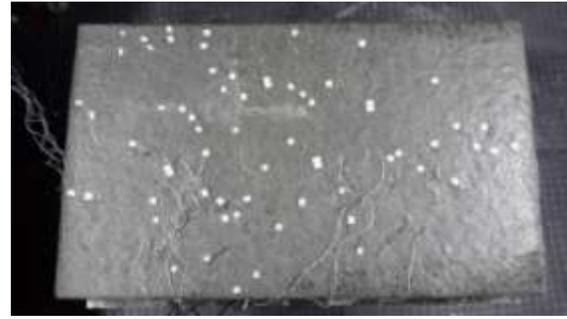
M2-18-C-0 (5abr/14)



M2-30-S-0 (5abr/14)



M2-30-C-0 (02 may/14)



Mientras que las losas de la mezcla M1 sin restricción, tienen un patrón de fisuración hacia el centro de la losa, las M2 sin restricción tienen un patrón de fisuración más cercanas al punto de contacto con la corriente de viento. Así mismo se observa que la tendencia de fisuración de las losas con restricción es más homogénea incluyendo las áreas cercanas a los bordes de losa.

Figura 19 Patrones de fisuración de losas con y sin restricción, para mezcla con 100% de ACR

M3-8-S-0 (03 may/14)



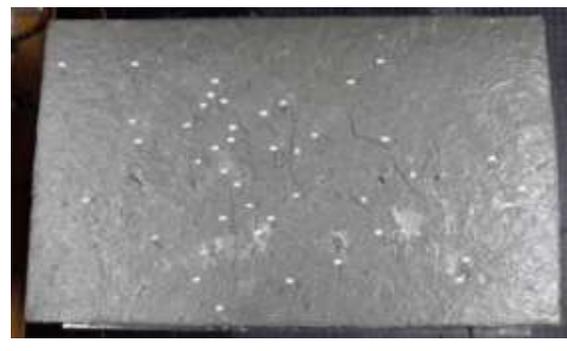
M3-8-C-0(11 may/14)



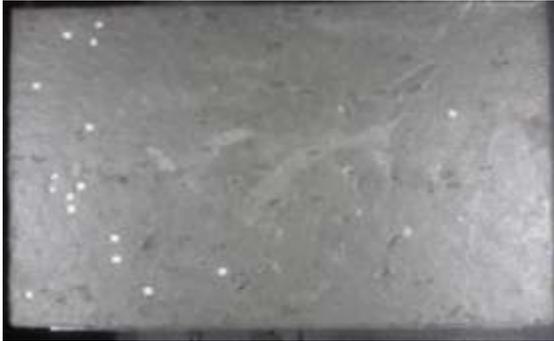
M3-18-S-0 (10 may/14)



M3-18-C-0 (31 may/14)



M3-30-S-0 (17 may/14)



M3-30-C-0 (02 jun/14)



Los resultados obtenidos muestran que si bien es cierto que el efecto de la restricción lateral incrementó el número de fisuras y el porcentaje de área fisurada de las losas, el aumento de la velocidad del viento influye en el aumento la longitud de las fisuras, el espesor y su cantidad, sin importar el porcentaje de ACR.

3.2.2. Efecto del remplazo de agregado con ACR en el grado de fisuración plástica en losas de concreto

Dentro del programa experimental se evaluaron 72 muestras, variando la velocidad del viento de exposición durante el tiempo de fraguado, a diferentes muestras de concreto con remplazo de agregados en proporciones de 0%, 50% y 100%.

Analizando el efecto del remplazo de agregado con ACR, se obtuvo que a mayor remplazo de agregado, mayor área fisurada. Siendo este comportamiento similar a diferentes velocidades.

Así mismo, en la siguiente figura, se muestra el porcentaje de fisuración de las losas es directamente proporcional a la velocidad de exposición y porcentaje de remplazo de ACR.

Figura 20 Curvas porcentaje de remplazo de ACR V/S fisuración para diferentes muestras con restricción y sin restricción, en mezclas expuestas diferentes velocidades de viento.

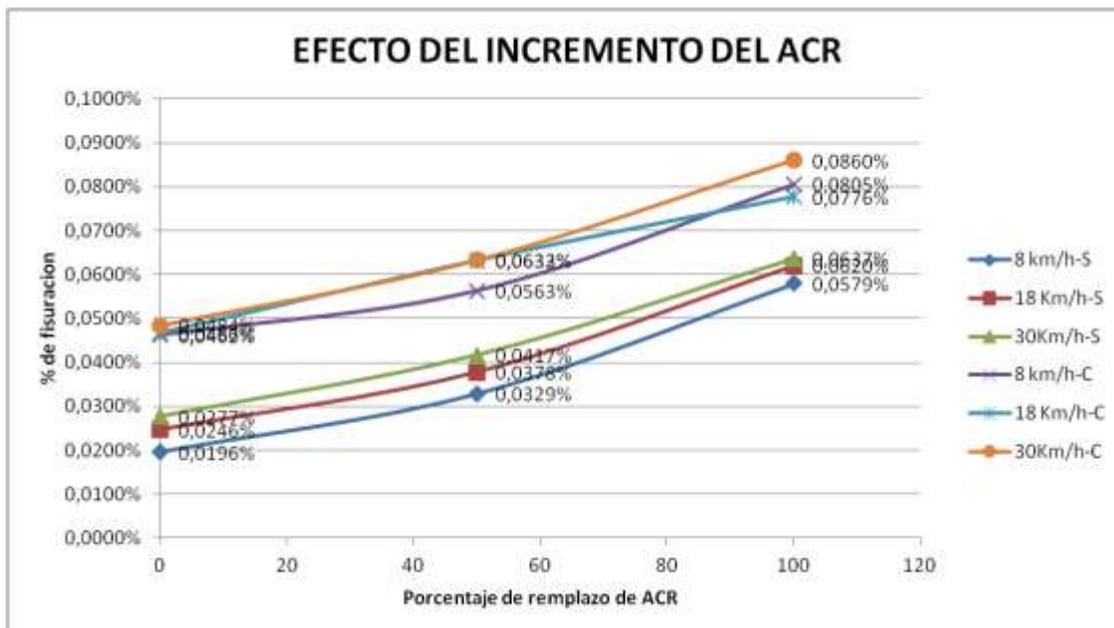


Tabla 12. Fisuración de diferentes muestras con restricción y sin restricción, en mezclas con diferentes remplazo de ACR expuestas diferentes velocidades de viento

% ACR	% fisuración a diferentes velocidades de viento muestras sin restricción			% fisuración a diferentes velocidades de viento muestras con restricción		
	8 km/h-S	18 km/h-S	30km/h-S	8 km/h-C	18 km/h-C	30km/h-C
0	0,0196%	0,0246%	0,0277%	0,0462%	0,0466%	0,0484%
50	0,0329%	0,0378%	0,0417%	0,0563%	0,0632%	0,0633%
100	0,0579%	0,0620%	0,0637%	0,0805%	0,0776%	0,0860%

3.2.3. Efecto del remplazo de agregado con ACR en el grado de el porcentaje de evaporación en losas de concreto.

Figura 21 Curvas porcentaje de velocidad de viento V/S tasa de evaporación para diferentes muestras con restricción y sin restricción

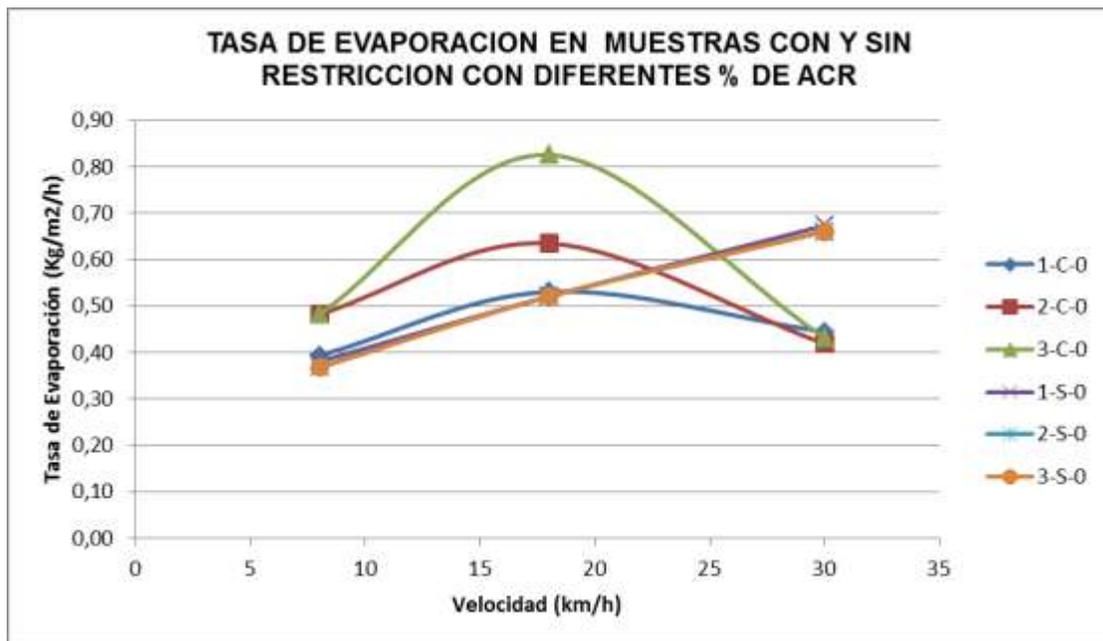


Tabla 13 velocidad de viento V/S tasa de evaporación para diferentes muestras con restricción y sin restricción

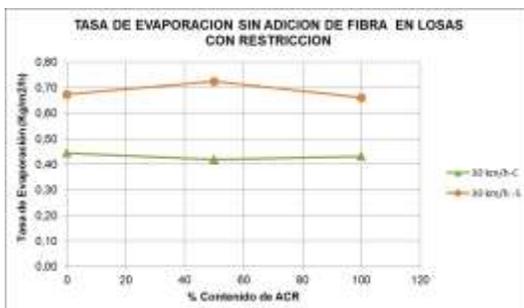
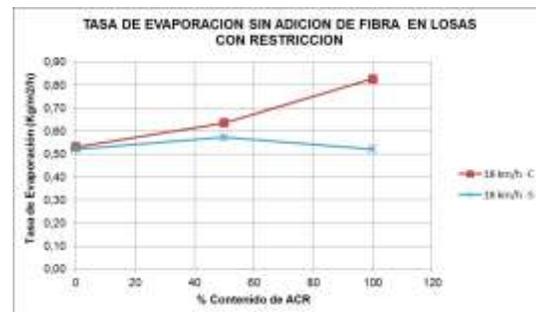
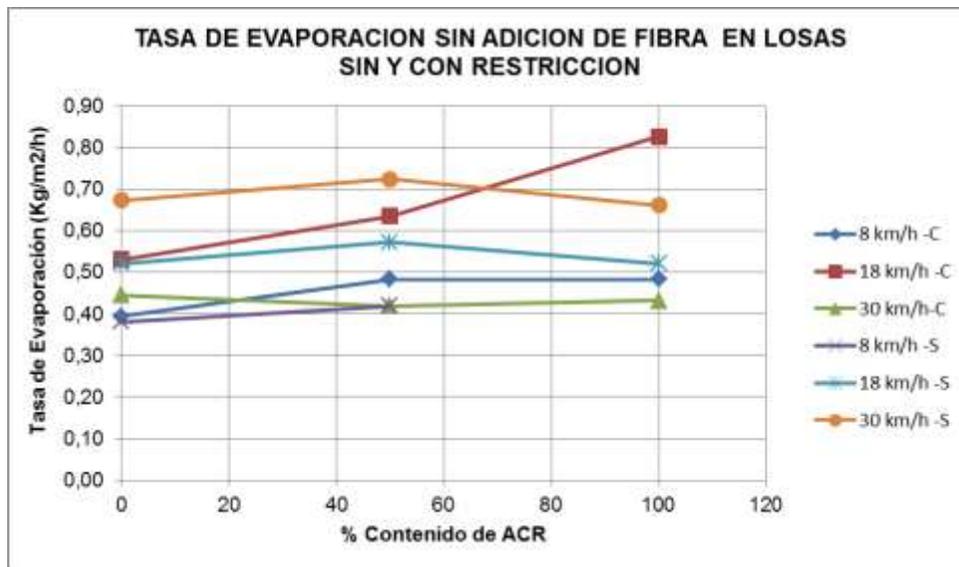
	TASA EVAPORACION			
	%ACR	8 km/h	18 km/h	30 km/h
1-C-0	0	0,39	0,53	0,44
2-C-0	50	0,48	0,64	0,42
3-C-0	100	0,48	0,83	0,43
1-S-0	0	0,38	0,52	0,67
2-S-0	50	0,42	0,57	0,72
3-S-0	100	0,37	0,52	0,66

Los datos obtenidos de la tasa de evaporación en losas a diferentes velocidades, muestran que para las losas sin restricción con diferentes porcentajes de remplazo de agregados, aumenta al aumentar la velocidad, mientras que para las losas con restricción lateral y diferentes mezclas, es mayor la evaporación a velocidades de 18 km/h. Dentro de la bibliografía consultada, no se encontró estudios que comparen el efecto de la restricción sobre la fisuración de losas a diferentes velocidades.

Al realizar un análisis desde el punto de vista del porcentaje de remplazo de ACR, acuerdo los resultados se observa que para las losas expuesta a velocidades de 8 y 18 km/h, la tasa de evaporación para las losas con restricción es mayor que para las

losas sin restricción, acuerdo como se observa en la figura 15. Mientras que este comportamiento para las losas expuestas a vientos de 30 km/h es mayor la tasa de evaporación para las losas sin restricción que las con restricción.

Figura 22 Curvas porcentaje de % contenido de ACR V/S tasa de evaporación para losas con restricción y sin restricción expuestas a diferentes velocidades de viento.



En todos los casos se observa que la tasa de evaporación fue mayor en losas con restricción, comparadas con las losas sin restricción, a diferentes velocidades y con diferentes mezclas. Pero estas no presentan un comportamiento similar, que pueda determinar un tipo de comportamiento, únicamente los valores mayores en todos los remplazos de ACR.

Se incorporó el 0.5 de fibra a las diferentes combinaciones de mezclas, y se realizaron pruebas a las losas expuestas a vientos de velocidades 8, 18 y 30 km/h, obteniéndose los siguientes resultados.

Figura 23 Curvas de velocidad de viento V/S tasa de evaporación para diferentes muestras con restricción y sin restricción y con adición de fibra en 0.5

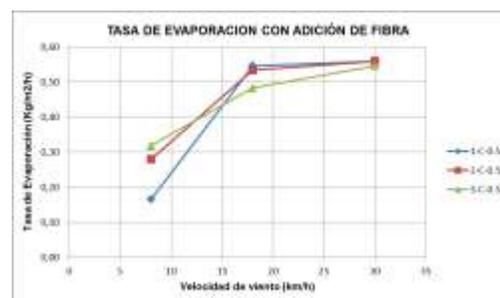
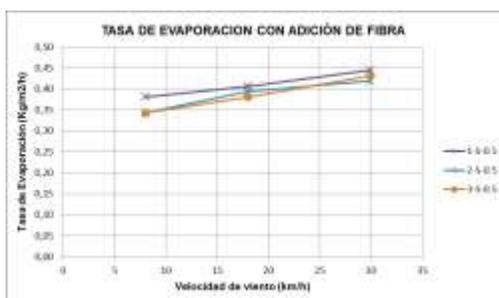
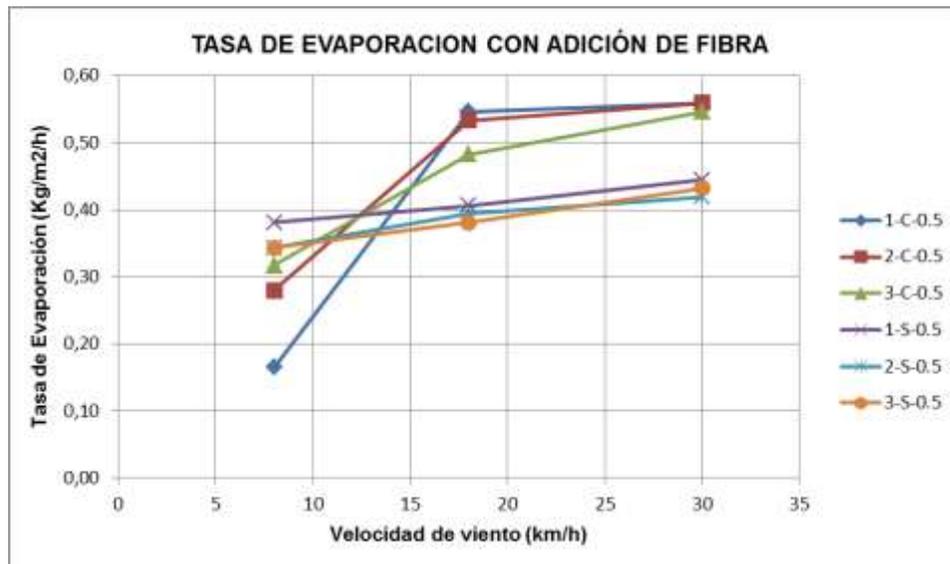


Tabla 14 Velocidad de viento V/S tasa de evaporación para diferentes muestras con adición de fibra de 0.5, en losas con restricción y sin restricción

	TASA EVAPORACION			
	%ACR	8 km/h	18 km/h	30 km/h
1-C-0.5	0	0,17	0,55	0,56
2-C-0.5	50	0,28	0,53	0,56
3-C-0.5	100	0,32	0,48	0,55
1-S-0.5	0	0,38	0,41	0,44
2-S-0.5	50	0,34	0,39	0,42
3-S-0.5	100	0,34	0,38	0,43

En los resultados se observa una tasa de evaporación menor para losas con restricción que para las losas sin restricción sometidas a velocidad del viento a 8 km/h; y para velocidades mayores, la tasa de evaporación para las losas con restricción es mayor que para las losas sin restricción.

3.2.4. Uso de microfibras en losas de concreto para reducción de fisuración.

Dentro del programa de laboratorio del presente estudio, se realizaron pruebas a losas de diferentes mezclas con remplazos de ACR del 0% 50% y 100%, con adición de microfibra, observándose que se logra evitar la fisuración con un porcentaje de fibra del 0.23%, en la tabla 13 se muestran los resultados de las pruebas realizadas.

Tabla 15 Fisuración en losas con restricción para diferentes muestras con diferentes porcentajes de adición de fibra.

	%ACR	% FIBRA	FISURACION
1_8_C_0,18	0%	0,18%	0,0024%
2_8_C_0,23	50%	0,23%	0,0000%
3_8_C_0,23	100%	0,23%	0,0000%
1_16_C_0,20	0%	0,20%	0,0025%
2_16_C_0,23	50%	0,23%	0,0000%
3_16_C_0,23	100%	0,23%	0,0000%
1_24_C_0,19	0%	0,19%	0,0110%
2_24_C_0,23	50%	0,23%	0,0023%
3_24_C_0,23	100%	0,23%	0,0000%

Adicionalmente se observan cambios en la textura de la superficie de la losa con la adición de microfibras de nylon en mezclas con agregados de concreto reciclado (ACR), esto permite disminuir notoriamente la tasa de evaporación de agua, debido a que la mayor área superficial de la microfibra permite atrapar agua al interior de la mezcla promoviendo mejoras en las condiciones de hidratación del cemento y disminuyendo la exudación. En la figura 17 a 19 se muestran las diferentes texturas según la velocidad del viento a la que se expuso las muestras.

Figura 24 Losas con restricción de mezclas de ACR a expuesta a viento de 8km/h

M1 8-C- 0.18% (21 jun/14)



M2-8-C-0.23% (16 ago/15)



M3-8-C-0.23% (26 ago/15)



Figura 25 Losas con restricción de mezclas de ACR a expuesta a viento de 16 km/h

M1-16-C-0.20% (20 jul/14)



M2-16-C-0.23% (09 ago/14)

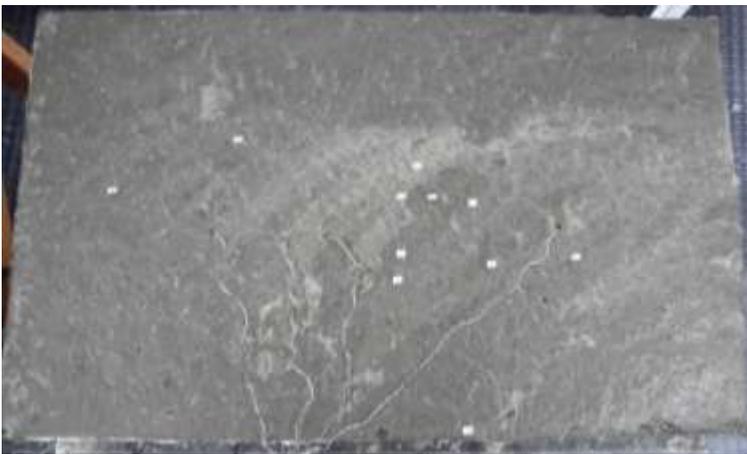


M3-16-C-0.23% (27 ago/14)



Figura 26 Losas con restricción de mezclas de ACR a expuesta a viento de 24 km/h

M1-24-C- 0.19% (19 jul/14)



M1-24-C- 0.23% (17 ago/14)



M1-24-C- 0,23% (28 ago/14)



CONCLUSIONES

Mediante el análisis y observación del comportamiento de losas de concreto con y sin restricciones laterales con diferentes remplazos de ACR, sometidos a diferentes velocidades de viento utilizando un túnel de viento, se puede concluir que:

- La incidencia en el número de fisuras por efecto de la restricción es menor que por el efecto del agregado reciclado, por factores como la adherencia entre el ACR con la pasta y la alta absorción de agua.
- La restricción lateral de las muestras aumenta la figuración en las muestras, esto debido las tensiones de tracción dentro de la mezcla de concreto y la baja resistencia a la tracción inherente al hormigón.
- La incidencia en la fisuración es mayor por efecto del agregado reciclado que por la velocidad del viento, por factores como la alta absorción de agua y el efecto de adherencia entre el ACR con la pasta. Aunque no se encuentra dentro de la bibliografía consultada, al realizar un análisis comparativo, sobre los espesores de las fisuras.
- En todas las muestras se observó que el mayor número de fisuras son espesores menores a 0.2 mm. Así mismo la fisura de longitud máxima de cada

una de las muestras aumenta el espesor al aumentar la longitud. Aunque no se puede determinar un comportamiento específico entre longitud y espesor de fisura.

- A mayor velocidad de viento el espesor de fisura de borde es menor para las muestras con restricción lateral que sin restricción. Aunque no fue posible determinar un patrón de comportamiento de la fisuración de borde de las losas, esto puede ser debido a las diferentes variables que no son controladas en el laboratorio, como lo son la temperatura y humedad, ya que influyen directamente sobre las muestras.
- Las losas con restricción, tienen un mayor número de fisuras hacia los bordes y las losas sin restricción tienen tendencia de fisurarse en el área central. Así mismo, el patrón de fisuración mayor es perpendicular a la corriente de viento, sin importar si la losa tiene o no restricción lateral.
- Los resultados obtenidos muestran que si bien el efecto de la restricción lateral incrementa el número de fisuras y el porcentaje de área fisurada de las losas, el aumento de la velocidad del viento influye en el aumento de la longitud de las fisuras, el espesor y su cantidad, sin importar el porcentaje de ACR.
- En losas sin restricción con diferentes porcentajes de remplazo de agregados reciclados, aumenta la tasa de evaporación al aumentar la velocidad, mientras que para las losas con restricción lateral y diferentes mezclas, es mayor la evaporación a velocidades de 18 km/h.
- La tasa de evaporación fue mayor en losas con restricción, comparadas con las losas sin restricción, a diferentes velocidades y con diferentes mezclas. Pero estas no presentan un comportamiento similar, que pueda determinar un tipo de comportamiento.
- Al incorporar microfibra a las diferentes combinaciones de mezclas, se observa una tasa de evaporación menor para losas con restricción que para las losas sin restricción sometidas a velocidad del viento a 8km/h; y para velocidades

mayores, la tasa de evaporación para las losas con restricción es mayor que para las losas sin restricción.

- Las microfibras de nylon mejoran las características de la mezcla reduciendo la fisuración y la tasa de evaporación, con lo cual puede ser utilizado en pavimentos, pisos y otros elementos.
- Con el uso de microfibras adicionadas a mezclas de concreto con agregados reciclados, permiten controlar la fisuración con lo cual se optimiza la estética, funcionalidad, resistencia y durabilidad de elementos de concreto, especialmente aquellos que tienen una gran superficie expuesta y bajo volumen. (Losas).
- Se recomienda realizar otros ensayos bajo condiciones ambientales de humedad y temperatura controladas y constantes, con las mismas condiciones de contenido de agregados reciclados y las mismas velocidades de viento.
- Se recomienda hacer este mismo estudio con agregados de concreto reciclados saturados, con el fin de evaluar el comportamiento del concreto con ACR, sin que sea afectado por la pérdida de agua por absorción.

BIBLIOGRAFIA

- Alhozaimy, A. M., & Al-neghimish, A. I. (2009). Plastic shrinkage in hot and arid environments. *Concrete international*, 26-32.
- ASOCRETO. (2000). Colección básica del concreto. Tecnología y propiedades. Bogotá D.C.: Asociación Colombiana del Concreto- ASOCRETO.
- Banthia, N., & Gupta, R. (2006). Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage. *Cement and concrete research*, 1263-1267.
- CómitéACI224. (2001). Control de la Fisuración en Estructuras de Concreto (ACI 224R-01). Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute.
- González Cuevas, O., & Robles, F. (2004). Aspectos fundamentales del concreto reforzado. Mexico D.F.: Limusa.
- Grzybowski, M., & Shah, S. (1990). Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete. *ACI Mat J*, 138-148.
- Kraai, P. (1985). A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete. San José CA (E.U.): The Aberdeen Group.
- McCarter, W. J., & Ben-Saleh, A. M. (2001). Influence of practical curing methods on evaporation of water from freshly placed concrete in hot climates. *Building and Environment* 36, 919-924.
- Mesbah, H. A., & Buyle-Bodin, F. (1999). Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. *Construction and Building Materials* 13, 439-447.
- Sivakumar, A., & Santhanam, M. (2007). A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites* 29, 575–581.
- Yang, J., Du, Q., & Bao, Y. (2011). Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials* 25, 1935–1945.
- (s.f.). NSR-10: "Reglamento C