

# Efecto de las fibras poliméricas en la permeabilidad y características mecánicas del concreto con agregado calizo de alta absorción

Moreno E. I.<sup>1</sup>, Varela-Rivera J.<sup>1</sup>, Solís-Carcaño R.<sup>1</sup> Sánchez-Pech O.<sup>2</sup>

*Fecha de recepción: 07 de noviembre de 2013 - Fecha de aprobación: 17 de diciembre de 2013*

## RESUMEN

Los edificios ubicados en ambiente tropical marino y construidos con elementos de concreto reforzado están sujetos a una fuerte agresión ambiental producto del clima cálido y de la alta concentración de cloruros. Ante esta problemática, una posible solución para incrementar la calidad del concreto es utilizar fibras poliméricas. El objetivo de este trabajo consistió en determinar las propiedades del concreto que son beneficiadas por el uso de dichas fibras, y evaluar su efecto en la permeabilidad del concreto.

Se realizaron especímenes de prueba con dos relaciones agua/cemento, de 0.80 y 0.62, reforzados con fibras de polipropileno (900 g por m<sup>3</sup>) y sin refuerzo. Se analizó la influencia de las fibras en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido; en el primer caso se estudiaron el revenimiento, el contenido de aire y el peso volumétrico, y en el segundo caso la resistencia a tensión, compresión, flexión y cortante, así como la permeabilidad al aire.

**Palabras claves:** concreto, durabilidad, fibras poliméricas, permeabilidad al aire, resistencia

## Effect of polymeric fibers on permeability and mechanical characteristics of concrete with high absorption limestone aggregate

### ABSTRACT

Buildings made with reinforced concrete elements under tropical marine environments are subject to an aggressive environmental loading due to the climate and the high chloride concentration. Against this problem, one possible solution to increase the concrete quality is the use of polymeric fibers. The aim of this work consists in the determination of the concrete properties that benefit from the use of fibers, and the evaluation of their effect on the concrete permeability.

Testing specimens were made with two water-to-cement ratio, 0.80 and 0.62, reinforced with polymer fibers (900 g per m<sup>3</sup>). It was analyzed the influence of the fibers in the properties of fresh and dried concrete; in the former case slump, air content and unit weight were studied, in the latter case tension, compressive, flexural and shear strength as well as air permeability were studied.

**Key words:** air permeability, concrete, durability, polymeric fibers, strength

---

<sup>1</sup> Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México. Correo electrónico: emoreno@uady.mx

<sup>2</sup> Estudiante de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.

**Nota:** El período de discusión está abierto hasta el 1° de julio de 2014. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 17, No. 3, 2013, ISSN 1665-529-X.

## **INTRODUCCIÓN**

En muchos países se han implementado aditivos en el concreto y se ha comprobado que sí resultan ser eficientes, beneficiando tanto a la empresa constructora como a los usuarios, ya que se logra una mejor calidad de la obra terminada y la vida útil es más amplia. El uso de las fibras como refuerzo secundario es una manera de proveer al concreto un refuerzo adicional aparte del acero, el cual permite mejorar su desempeño y por consiguiente el del elemento estructural ante las acciones que será sometido durante su vida útil.

Uno de los principales problemas de las construcciones en zonas costeras es la corrosión del acero de refuerzo utilizado en los elementos estructurales de concreto. Este problema ha sido estudiado en diversas investigaciones, pero ninguna relaciona el uso de fibras con la durabilidad.

La durabilidad de los elementos estructurales de concreto reforzado en ambiente marino se ve muy afectada debido a que se encuentran expuestos a un ambiente de alta salinidad y alta temperatura. Los elementos estructurales como los castillos, cadenas y cerramientos se han protegido en algunas ocasiones recubriendo las varillas de acero con pintura anticorrosiva. Para el caso de las viviendas, en su mayoría, no utilizan alguna técnica protectora y son las principales afectadas no sólo en lo estructural sino también en la economía de los propietarios por los constantes trabajos de reparación y mantenimiento.

Existen dos tipos de refuerzo para el concreto, el primario que corresponde al acero estructural y el secundario en el que se encuentran las fibras. Hoy en día el uso de las fibras es muy común para aplicar recubrimientos a estructuras marítimas para mitigar el problema de la corrosión del acero, como los pilares de puentes de concreto que se encuentren sumergidos en aguas marinas.

Con el uso de las fibras se busca mejorar ciertos comportamientos de los elementos y en algunos casos sustituir a otros tipos de refuerzo secundario (Alhozaimy *et al.* 1996). Por ejemplo, las fibras de polipropileno (PP) pueden sustituir el uso de la malla electro soldada como refuerzo de temperatura por una cantidad de fibras; además se podría reducir la permeabilidad del concreto endurecido ya que se disminuye la segregación de los agregados y del sangrado cuando el concreto se está secando. Otros beneficios adicionales de las fibras de PP son de tipo estructural, debido a la mejora de algunas propiedades mecánicas del elemento, y en aplicaciones especiales al reducir los índices de sonido que normalmente

tiene una capa de mortero (Bartos 1993)

El uso de fibras también trae consigo algunos inconvenientes que deben ser tomados en cuenta; por ejemplo, cuando la cantidad de fibra es muy elevada, en relación con la cantidad de concreto, se afecta la trabajabilidad disminuyendo el revenimiento porque las fibras se traban entre ellas impidiendo el flujo de la mezcla. Otra situación que puede presentarse es la formación de oquedades durante la colocación del concreto en el molde si no se tiene un vibrado adecuado o no se siguen las recomendaciones de los fabricantes (Bartos 1993).

Las fibras sintéticas más utilizadas son las de polipropileno como un refuerzo secundario por temperatura, principalmente en pisos industriales y elementos prefabricados de concreto. Esta investigación buscó conocer qué propiedades mecánicas y de durabilidad son mejoradas al adicionar las fibras de polipropileno al concreto y así proponer algunas posibles aplicaciones. Tal es el caso de la factibilidad de utilizarlas para disminuir el riesgo de corrosión en elementos de concreto reforzado, por la posible reducción de la permeabilidad del concreto al adicionar las fibras, o incluso podrían sustituir parte del acero de refuerzo.

## **METODOLOGÍA**

Para la elaboración de los especímenes se utilizaron los agregados calizos de alta absorción (fino y grueso), Cemento gris tipo Portland (CPC 30) de marca nacional y fabricación local, así como fibras de polipropileno (tipo multifilamento) de marca y fabricación local.

Las pruebas realizadas para obtener las propiedades de los agregados fueron: Tamaño máximo de agregado (NMX-C-77 1997, NMX-C-111 2004), Peso volumétrico seco suelto y seco compactado (NMX-C-73 2004), y Densidad y capacidad de absorción de agua (NMX-C-164 2002) para el agregado grueso. Para el agregado fino las pruebas fueron: Módulo de finura (NMX-C-77 1997), Peso volumétrico seco suelto (NMX-C-73 2004), y Densidad y capacidad de absorción de agua (NMX-C-165 2004).

El diseño de mezclas se realizó siguiendo el método de volúmenes absolutos del ACI 211.1-91 (2002). Se utilizaron dos relaciones agua/cemento (A/C) de 0.8 ( $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$ ) y de 0.62 ( $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ ), con el objetivo de verificar si existe alguna diferencia en la acción de las fibras. Las pruebas al concreto fresco consistieron en la determinación del revenimiento (NMX-C-156 1997), contenido de aire (NMX-C-157

2006) y peso volumétrico (NMX-C-162 2000). Se colaron dos tipos de especímenes: vigas, probadas con 90 días de edad, y cilindros, probados a 28 y 90 días de edad. Para los especímenes de 90 días se les dio un curado por inmersión de 28 días en pileta y 62 días al medio ambiente (dentro de las instalaciones del laboratorio). Para los de 28 días de edad, estuvieron los 28 días en curado por inmersión y el mismo día que eran sacados de las piletas se probaron

Para el caso de las vigas se hicieron cuatro tipos (de 60 cm x 15 cm x 15 cm) para cada relación de A/C; el primer tipo estaba conformado por vigas de concreto simple. El segundo tipo estaba formado por piezas con la mezcla del concreto y refuerzo de fibras de polipropileno de acuerdo a la proporción de 900 gramos por metro cúbico de concreto. El tercer tipo de viga estaba compuesto por concreto más un porcentaje de acero de refuerzo, que fue determinado en función de la carga que se le iba aplicar al espécimen para que éste falle por cortante y no por flexión, ya que el procedimiento de la prueba era el mismo que el de la prueba de flexión. El cuarto tipo es similar al anterior pero agregándole el refuerzo de fibra correspondiente.

Se elaboraron cilindros (15 cm de diámetro y 30 cm de altura) de dos tipos para cada relación A/C; un primer tipo de concreto simple y otro tipo reforzado con fibra de polipropileno según la proporción de 900 g/m<sup>3</sup> de concreto. En la Tabla 1 se identifican los especímenes de concreto simple como C, los reforzados con fibra como C+F. En el caso de las vigas de concreto reforzado, se identifican como C+A, y las reforzadas con fibra como C+F+A. El número total de especímenes probados en toda la investigación fue de 24 vigas y 64 cilindros. En total se hicieron 8 colados y en cada uno se hacía la corrección por humedad de los agregados.

El proceso de elaboración de las vigas reforzadas con acero fue igual al de las vigas simples, a diferencia que a este tipo de especímenes se les incorporaron dos barras de acero de refuerzo corrugado ( $f_y = 4200$

kg/cm<sup>2</sup>) de 70 cm de largo y 12.5 mm (½”) de diámetro. El área de acero es de 2.54 cm<sup>2</sup> para una  $\rho$  de 0.013. Se verificó que con esta cuantía de acero el espécimen, para ambas relaciones A/C, fallaría por cortante antes de fallar por flexión. En particular, se estimó la falla a una carga de 6,700 y de 7,750 kgf para 0.80 A/C y 0.62 A/C, respectivamente.

Para las pruebas en el concreto endurecido se clasificaron los especímenes de acuerdo al tipo de prueba que iban a ser sometidos (Tabla 1). Para los especímenes de 28 días de edad, las pruebas se realizaban a las tres horas de haberlos sacado de la pileta.

**Resistencia a compresión en cilindros de concreto:** La prueba realizada consistió en aplicar una carga uniaxial a los cilindros de concreto y determinar el esfuerzo máximo alcanzado al ir aumentando la carga gradualmente (NMX-C-83 2002). Una vez obtenidos los esfuerzos a compresión individuales se calculó la resistencia promedio.

**Resistencia a tensión en cilindros de concreto (ensaye brasileño):** Consistió en aplicar una carga uniaxial a un cilindro de concreto, aplicada longitudinalmente en dirección del diámetro del cilindro (NMX-C-163 1997).

**Resistencia a flexión en vigas simples de concreto:** Esta prueba consiste en aplicar cargas concentradas a los tercios del claro de la viga (NMX-C-191 2004). El agrietamiento se debe formar en el tercio central de la viga en forma vertical.

**Resistencia a cortante en vigas de concreto reforzadas con barras de acero:** Procedimiento análogo al de flexión (NMX-C-191 2004). La diferencia entre estas pruebas estuvo en el tipo de grieta que se generaba al momento de fallar la viga. El agrietamiento se debe formar en cualquier tercio de los extremos pero con una inclinación de 45° aproximadamente.

**Tabla 1.** Tipo de especímenes por prueba.

Elemento	VIGAS			
Prueba	Flexión		Cortante	
Composición	C	C+F	C+A	C+F+A
Edad de 90	3 pzas.	3 pzas.	3 pzas.	3 pzas.
Elemento	CILINDROS			
Prueba	Compresión		Tensión	
Composición	C	C+F	C	C+F
Edad de 28 días	4 pzas.	4 pzas.	4 pzas.	4 pzas.
Edad de 90 días	4 pzas.	4 pzas.	4 pzas.	4 pzas.

Donde: C, Cemento; F, Fibra; A, acero.

**Tabla 2.** Características físicas de los agregados.

Propiedad	Arena	Grava
Peso Volumétrico Seco Suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1,151	1,198
Peso Volumétrico Seco Compacto (kg/m <sup>3</sup> )	--	1,310
Densidad	2.42	2.36
Absorción (%)	7.62	5.63
Módulo de Finura	3.17	--
Tamaño Máximo Nominal (mm)	--	19

**Tabla 3.** Diseño de mezclas (kg/m<sup>3</sup>).

Material	0.80 A/C	0.62 A/C
Cemento	281	363
Agua	225	225
Arena	774	711
Grava	817	817

**Permeabilidad al aire en vigas simples de concreto:**

Realizada siguiendo el procedimiento de la norma SIA 262/1E (2003) y aplicada a las vigas simples de 90 días de edad. Se utilizó un sistema de medición de permeabilidad de TORRENT (Torrent 1999) que permite obtener el valor de la permeabilidad sin destruir alguna sección del elemento. El sistema consiste en una celda de vacío de dos cámaras que es colocada en la superficie del espécimen y un regulador de presión. El equipo arrojó los valores de  $kT$ , que es la permeabilidad del concreto al aire y sus unidades de medición es por área (m<sup>2</sup>). Dicha permeabilidad está basada en la fórmula de Hagen-Poiseuille para fluidos comprimibles (Torrent et al. 2012).

$$kT = \left(\frac{V_c}{A}\right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon P_a} \left(\frac{\ln \frac{P_a + \Delta P_i}{P_a - \Delta P_i}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_o}}\right)^2$$

donde  $kT$  es el coeficiente de permeabilidad al aire (m<sup>2</sup>),  $V_c$  es el volumen de la celda interna del sistema (m<sup>3</sup>),  $A$  es el área de la sección de la celda (m<sup>2</sup>),  $\mu$  es la viscosidad del aire a 20° C ( $2 \times 10^{-5}$  Ns/m<sup>2</sup>),  $\varepsilon$  es la porosidad del concreto,  $P_a$  es la presión atmosférica (N/m<sup>2</sup>),  $\Delta P_i$  es el aumento de presión al final de la prueba (N/m<sup>2</sup>),  $t_f$  es el tiempo al final de la prueba (s), y  $t_o$  es el tiempo al inicio de la prueba (s).

Esta fórmula considera la porosidad del medio y el equipo utilizado asume una porosidad de 15%. En cada espécimen se realizaba el promedio de tres mediciones en la misma cara con una separación aproximada de 20 cm una de otra.

**RESULTADOS**

Los resultados de la caracterización de los materiales

pétreos se presentan en la Tabla 2. Se observa la alta absorción de los agregados por arriba de lo esperado para agregados normales.

En la Tabla 3 se presenta el diseño de mezclas antes de la corrección por humedad de los agregados. Se observa una mayor cantidad de agua para compensar la falta de trabajabilidad inducida por el agregado triturado.

Los resultados de las pruebas en el concreto fresco proporcionan parte de la información de la calidad del concreto. Como se puede ver en la Tabla 4, casi la totalidad de las mediciones del contenido de aire está dentro del rango esperado (entre 2 y 3%) de acuerdo al tamaño máximo del agregado. En la prueba del peso volumétrico los valores quedaron en el rango esperado (entre 1,842 y 2,483 kg/m<sup>3</sup>).

En el caso de los resultados del revenimiento para el concreto reforzado con fibras se tuvieron valores cercanos a los deseados, a pesar de que en ocasiones se agregaban cantidades similares de agua que las utilizadas en el concreto simple por la condición de los agregados; por lo tanto se puede apreciar el efecto de las fibras en el revenimiento. Para la relación A/C de 0.80 el revenimiento promedio del concreto simple fue de 17 cm y para el concreto reforzado con fibras fue de 11 cm, por lo que se tuvo una disminución de 6 cm. En la relación A/C de 0.62 en el concreto simple el revenimiento promedio fue de 16 cm y en el concreto reforzado con fibras fue de 13 cm, la diferencia promedio fue de 3 cm.

Tabla 4. Resultados de las pruebas en el concreto fresco.

	Edad y tipo de prueba de concreto endurecido	Relación A/C	Revenimiento (cm)		Contenido de aire (%)		Peso volumétrico (kg/m <sup>3</sup> )	
			C	C+F	C	C+F	C	C+F
			Colados para cilindros	28 días/Compresión y tensión	0.80	17	8	2.3
0.62	13	11			2.2	2.2	2,157	2,140
90 días/Compresión y tensión	0.80	17		12	2.3	2.3	2,120	2,131
	0.62	16		15	2.2	2.1	2,125	2,132
Colados para vigas	90 días/Flexión y permeabilidad	0.80	16	10	2.0	2.2	2,136	2,133
		0.62	17	10	1.8	2.0	2,140	2,149
	90 días/Cortante	0.80	19	13	2.0	2.3	2,125	2,127
		0.62	19	15	1.6	2.2	2,145	2,131

Tabla 5. Resultados de la prueba de compresión uniaxial.

Edad	Relación A/C	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )		C+F C (%)
		C	C+F	
		28 días	0.80	163
0.62	254		256	1
90 días	0.80	218	204	---
	0.62	333	297	---

Tabla 6. Resultados de la prueba de tensión.

Edad	Relación A/C	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )		f <sub>t</sub> /f'c (%)		f <sub>t</sub> /f'c <sup>1/2</sup>		C+F C (%)
		C	C+F	C	C+F	C	C+F	
		28 días	0.80	18	17	11.0	9.3	1.41
0.62	22		24	8.7	9.4	1.38	1.50	9
90 días	0.80	22	28	10.1	13.7	1.49	1.96	27
	0.62	27	30	8.1	10.1	1.48	1.74	11

Tabla 7. Resultados de la prueba de resistencia a la flexión en vigas.

Edad	Relación A/C	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )		f <sub>t</sub> /f'c (%)		f <sub>t</sub> /f'c <sup>1/2</sup>		C+F C (%)
		C	C+F	C	C+F	C	C+F	
		90 días	0.80	23	29	10.6	14.2	1.56
0.62	26		28	7.8	9.4	1.42	1.62	8

**Determinación de la resistencia a compresión en cilindros:** En esta prueba se tuvieron dos edades de ensaye, de 28 y 90 días, para analizar como las fibras contribuyeron a la resistencia de compresión del concreto. En la Tabla 5 se presentan los resultados agrupados de acuerdo a la edad y la composición de cada espécimen. En la última columna se presenta el porcentaje de incremento en los resultados por efecto de la presencia de las fibras.

**Resistencia a la tensión por compresión diametral en cilindros (ensaye brasileño):** En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la tensión. La tabla también presenta el porcentaje que representa la resistencia a la tensión con respecto de la resistencia a la compresión, y el factor de dicha resistencia a la tensión con respecto a la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión. En la última columna se presenta el porcentaje de incremento en los resultados por efecto de la presencia de las fibras.

**Tabla 8.** Resultados de la prueba de resistencia a cortante en vigas.

Edad	Relación A/C	Carga promedio máx.(kg)		$\frac{C+F}{C}$ (%)
		C+A	C+F+A	
90 días	0.80	9,594	10,062	5 %
	0.62	12,710	13,708	8%

**Tabla 9.** Resultados de la prueba de permeabilidad.

Edad	Relación A/C	Coeficiente promedio Kt (m <sup>2</sup> )		Rango Kt (m <sup>2</sup> )	
		C	C+F	C	C+F
90 días	0.80	5.58 x10 <sup>-16</sup>	2.17 x10 <sup>-16</sup>	4.73 x10 <sup>-16</sup> / 6.53 x10 <sup>-16</sup>	1.81 x10 <sup>-16</sup> / 2.69 x10 <sup>-16</sup>
	0.62	1.89 x10 <sup>-16</sup>	1.31 x10 <sup>-16</sup>	1.34 x10 <sup>-16</sup> / 2.25 x10 <sup>-16</sup>	0.73 x10 <sup>-16</sup> / 1.93 x10 <sup>-16</sup>

**Tabla 10.** Resultados de la prueba de permeabilidad ajustado por la porosidad del concreto.

Edad	Relación A/C	Coeficiente promedio Kt (m <sup>2</sup> )		Rango Kt (m <sup>2</sup> )		% de disminución de la permeabilidad
		C	C+F	C	C+F	
90 días	0.80	3.18 x10 <sup>-16</sup>	1.24 x10 <sup>-16</sup>	2.70 x10 <sup>-16</sup> / 3.72 x10 <sup>-16</sup>	1.03 x10 <sup>-16</sup> / 1.53 x10 <sup>-16</sup>	60 %
	0.62	1.13 x10 <sup>-16</sup>	0.78 x10 <sup>-16</sup>	0.80 x10 <sup>-16</sup> / 1.34 x10 <sup>-16</sup>	0.43 x10 <sup>-16</sup> / 1.15 x10 <sup>-16</sup>	30 %

**Resistencia a la flexión en vigas simples:** En la prueba de flexión se obtuvo la carga máxima resistida por el espécimen y se calculó el módulo de ruptura acorde con la norma NMX-C-191 (2004). Posteriormente se promediaron los resultados obtenidos (Tabla 7). La tabla también presenta el porcentaje que representa la resistencia a la flexión con respecto de la resistencia a la compresión, y el factor de dicha resistencia a la flexión con respecto a la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión. En la última columna se presenta el porcentaje de incremento en los resultados por efecto de la presencia de las fibras.

**Resistencia a cortante en vigas reforzadas con barras de acero:** El procedimiento de la prueba se basó en el mismo que la de flexión, pero se limitó a determinar la carga máxima resistida. Esta carga fue obtenida del equipo de ensaye al momento que la viga fallaba. La carga de diseño estimada para 0.80 A/C a 90 días (f'c de 200 kg/cm<sup>2</sup>) era de 7,400 kg, mientras que para 0.62 A/C a 90 días (f'c de 300 kg/cm<sup>2</sup>) era de 8,000 kg. En la Tabla 8 se pueden ver los resultados obtenidos. En la última columna se presenta el porcentaje de incremento en los resultados por efecto de la presencia de las fibras.

**Permeabilidad al aire del concreto:** La prueba de permeabilidad fue realizada a las vigas con edad de 90 días. En la Tabla 9 se presentan los datos promedio obtenidos y en la cual se puede apreciar el efecto de la

presencia de las fibras en el concreto en la disminución del coeficiente. La tabla también presenta el rango de los datos obtenidos para poder discriminar los resultados con respecto a las calidades del concreto según la norma SIA 262/1E (2003).

Sin embargo, tomando en cuenta que el equipo utilizado está diseñado para considerar en el cálculo de Kt una porosidad de 15% (Torrent et al. 2012), y que debido a la alta absorción de los agregados, los valores medios de la porosidad son mayores, procedemos a ajustar estos valores utilizando porosidades medidas en especímenes de concreto con estas relaciones A/C y tipo de agregado. Para 0.80 A/C se usó una porosidad del concreto de 26.3%, mientras que para 0.62 A/C se usó una porosidad de 25.2%; estos datos fueron tomados de una investigación previa con agregados similares a los utilizados en esta investigación (Moreno et al. 2008a). Los coeficientes ajustados se presentan en la Tabla 10.

**DISCUSIÓN**

**Análisis de las pruebas en concreto fresco**

De las pruebas realizadas durante la elaboración de los especímenes, sólo el revenimiento presentó variaciones significativas por lo que el efecto de las fibras se puede considerar despreciable. Con base en los resultados (Tabla 4) se puede constatar el efecto de las fibras en el revenimiento por la disminución de la capacidad de fluidez del concreto. En dicha tabla la

columna de resultados de concreto simple muestra valores mayores a los del concreto reforzado con fibra.

El revenimiento disminuyó para el concreto de 0.80 A/C un promedio de 7 cm y para el de 0.62 A/C un promedio de 3 cm. Este efecto es debido a que las fibras sujetan a los agregados para evitar que se desplacen, funcionando como una red o malla interna dentro del concreto lo que propicia que la mezcla tenga una apariencia más espesa y menos fluida. A pesar del efecto de las fibras no fue requerido adicionar agua para mejorar la trabajabilidad.

La presencia de las fibras no afectó el llenado ni el acomodo del concreto en los moldes, pero a simple vista se constató la disminución del sangrado y la segregación de los agregados. Al principio del proceso de revoltura de los componentes se observó que la fibra se concentraba en las paredes de la revolvedora, pero al ir agregando el resto del agua y el cemento junto con el paso del tiempo de revoltura se lograba una mejor dispersión de las fibras.

#### **Análisis de resultados de la prueba de compresión**

La prueba se hizo para determinar si existía alguna variación en la resistencia por la presencia de las fibras, pero de acuerdo a los resultados obtenidos (Tabla 5) no se logró incrementar la capacidad del concreto considerablemente. La capacidad de carga en los cilindros de 0.80 A/C reforzados con fibras, a 28 días, tuvo un incremento aparente del 12% comparados con los de concreto simple. En el caso de los cilindros de 0.62 A/C a 28 días sólo se tuvo un incremento del 1% por lo que se puede considerar despreciable. Zollo (1984), en un trabajo con 0.65 A/C y 0.1% de fibras en volumen ( $900 \text{ g/m}^3$ ), reporta una disminución del 5% de la resistencia a la compresión y una mayor desviación estándar en los especímenes con fibra en comparación con los especímenes sin fibra. Por su parte, Alhozaimy *et al.* (1996) reportan un aumento del 8% para especímenes con 0.45 A/C y 0.1% de fibras en volumen ( $900 \text{ g/m}^3$ ), con respecto a los especímenes de control. Basado en estos y los resultados con otros porcentajes de fibras (0.05, 0.2 y 0.3%), ellos concluyen que el efecto de la fibra no es estadísticamente significativo a un nivel de confianza de 95%.

En nuestro caso los especímenes ensayados a 28 días tenían la cualidad de que al momento de ser probados se encontraban húmedos, lo cual afecta negativamente al comportamiento mecánico del concreto al disminuir la resistencia a compresión (Moreno *et al.* 2008b). Los cilindros ensayados a 90 días de edad se encontraban secos al momento de la prueba y

lograban resistir cargas más elevadas que podrían sobrepasar la capacidad de interacción entre las fibras y el concreto.

#### **Análisis de resultados de la prueba de tensión**

El comportamiento del concreto ante esfuerzos de tensión sí se vio afectado por la presencia de las fibras. En las pruebas a 28 días de edad se logró un ligero incremento en la resistencia del concreto de 0.62 A/C, pero el de 0.80 A/C no siguió el mismo comportamiento (Tabla 6). Tal como sucedió en la prueba de compresión, los especímenes ensayados a esta edad estaban húmedos al momento de hacerles la prueba y el exceso de agua pudo afectar la adherencia entre las fibras y las partículas del concreto, ocasionando resultados diferentes para ambas relaciones A/C.

En el caso de las pruebas de 90 días de edad, sí se pudo apreciar una aportación de las fibras para ambas relaciones A/C, la de 0.80 con una aportación del 27% y la de 0.62 del 11%. El incremento de la capacidad de resistencia no fue proporcional entre ambas relaciones A/C, debido a que el primer concreto es de baja resistencia, por lo cual un incremento en su capacidad de carga es más representativo que en el de mayor resistencia. Por su parte, Zollo (1984) reporta un incremento del 5% de la resistencia a tensión en los especímenes con fibra (0.65 A/C y 0.1% de fibras en volumen), en comparación con los especímenes sin fibra.

Con base en los resultados obtenidos se puede deducir que la presencia de las fibras a mediano plazo sí representa una aportación considerable a la resistencia de tensión del concreto.

Las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTC-RCDF) estipulan que para concreto clase 1  $f_t = 1.5 f'c^{1/2}$ , mientras que para concreto clase 2  $f_t = 1.2 f'c^{1/2}$ . Modelando los resultados a 28 y 90 días se pueden obtener las siguientes expresiones,  $f_t = 1.44 f'c^{1/2}$  para el caso del concreto simple, y  $f_t = 1.62 f'c^{1/2}$  para el caso del concreto con fibras; en ambos casos, las NTC-RCDF definen estos concretos como clase 2. Mendoza *et al.* (2011), en una investigación con 0.49 A/C y para un kg de fibras obtuvo  $f_t = 1.52 f'c^{1/2}$  y  $f_t = 1.61 f'c^{1/2}$  para concreto (clase 1) simple y con fibras, respectivamente. Estos valores de concreto clase 1 son muy semejantes a los obtenidos en esta investigación a pesar de que se consideren concreto clase 2.

#### **Análisis de resultados de la prueba de flexión**

Los resultados de la prueba de flexión demostraron

que la presencia de las fibras sí fue satisfactoria al mejorar la capacidad de resistencia de las vigas (Tabla 7). Las fibras lograron una adecuada interacción con la matriz de concreto lo que les permitió mejorar el desempeño del concreto durante la aplicación de las cargas. En los especímenes con relación A/C de 0.80 las fibras contribuyeron con un 26% de incremento en la capacidad de carga, mientras que con la 0.62 A/C se obtuvo una ganancia del 8%. De nueva cuenta, en el concreto de menor resistencia es donde se obtiene el mayor porcentaje de aportación de las fibras. Por su parte, Zollo (1984) reporta para 0.65 A/C y 0.1% de fibras en volumen ( $900 \text{ g/m}^3$ ), un incremento del 20% de la resistencia a flexión en los especímenes con fibra en comparación con los especímenes sin fibra.

Las NCT-RCDF estipulan que para concreto clase 1  $f_f = 2.0 f'c^{1/2}$ , mientras que para concreto clase 2  $f_f = 1.4 f'c^{1/2}$ . Modelando los resultados se pueden obtener las siguientes expresiones,  $f_f = 1.49 f'c^{1/2}$  para el caso del concreto simple, y  $f_f = 1.83 f'c^{1/2}$  para el caso del concreto con fibras. Mendoza et al.,<sup>21</sup> en la misma investigación con 0.49 A/C y para un kg de fibras obtuvo  $f_f = 1.83 f'c^{1/2}$  y  $f_f = 2.10 f'c^{1/2}$  para concreto simple y con fibras, respectivamente. Es de notar que en ambas investigaciones no se alcanzó el factor estipulado para concreto clase 1 en el caso del concreto simple.

Por otra parte, los módulos de ruptura obtenidos son valores cercanos a las resistencias obtenidas con el ensayo brasileño, lo cual indica que el comportamiento del concreto con y sin fibras mantuvo una regularidad y uniformidad.

Con los resultados de las pruebas a tensión por compresión (ensayo brasileño) y de flexión, se puede establecer una tendencia generalizada en el comportamiento del concreto a tensión, para una relación A/C de 0.80 se obtiene un incremento medio de la capacidad de resistencia, mientras que para una relación de 0.62 A/C se obtienen beneficios mínimos.

**Análisis de resultados de la prueba de cortante**

La resistencia del concreto cuando estuvo sujeto a esfuerzos de cortante presentó una ligera variación

entre los especímenes simplemente armados y los reforzados con fibras (Tabla 8). El concreto con 0.80 A/C presentó un incremento en su capacidad de carga del 5% y el de proporción 0.62 A/C una ganancia del 8%. El incremento proporcionado por las fibras aparentemente es bajo. Sin embargo, las fibras mejoraron el desempeño del concreto ligeramente así que se podría considerar que fue satisfactoria su implementación (Balaguru et al. 1992).

Es de notar que la carga real que produjo la falla por cortante a 90 días fue cuando menos un 25 % superior a la de diseño para el caso de 0.80 A/C, y más de 50% para el caso de 0.62 A/C. Esto nos lleva a considerar que las NTC-RCDF son conservadoras en el cálculo del esfuerzo cortante que puede tomar el concreto.

**Análisis de resultados de la prueba de permeabilidad al aire**

La disminución de la permeabilidad por la presencia de las fibras fue evidente. Los especímenes que tenían una relación de 0.80 A/C tuvieron una disminución del 60% del coeficiente de permeabilidad y la de 0.62 A/C una baja del 30% (Tabla 10). Esta disminución para los especímenes de 0.80 A/C puede atribuirse a la menor cantidad de material cementante lo cual facilita la formación de espacios vacíos. Sin embargo, el porcentaje de disminución para 0.62 A/C se correlaciona bien con el encontrado en otra investigación (34% para  $600 \text{ g/m}^3$  y 43% para  $1200 \text{ g/m}^3$  de fibra) utilizando el mismo tipo de fibra pero en pruebas de permeabilidad al agua (Vondran 1984).

De acuerdo a la clasificación propuesta (SIA 262/IE 2003), el concreto simple para 0.80 A/C tuvo una calidad mala (Tabla 11), ya que el valor promedio obtenido del coeficiente  $K_t$  queda dentro del rango entre  $1 \times 10^{-16}$  y  $10 \times 10^{-16}$ . En el caso de 0.62 A/C, el valor promedio quedó en el límite de una calidad normal. En el caso del concreto con fibra, se obtiene para 0.80 A/C la misma calidad de concreto que para 0.62 A/C sin fibra. En el caso de 0.62 A/C con fibra se obtuvo una calidad normal pero con una tendencia hacia el límite superior.

La reducción de la permeabilidad podría atribuirse

Tabla 11. Clasificación de la calidad del concreto en base a la permeabilidad al aire.

Clasificación de la calidad del concreto	$K_t$ medido a 28 días ( $\times 10^{-16}$ )
Muy bueno	$K_t < 0.01$
Bueno	$0.01 < K_t < 0.1$
Normal	$0.1 < K_t < 1.0$
Malo	$1.0 < K_t < 10$
Muy malo	$K_t > 10$



principalmente a la acción de las fibras durante la etapa del concreto en estado fresco. Como tuvieron una distribución uniforme, contribuyeron con la disminución tanto del sangrado como de la segregación del material. Estas condiciones redujeron la formación de poros capilares que son los que rigen la porosidad del concreto. Otro factor que influyó fue la disminución de las fisuras provocadas por la contracción plástica del concreto gracias a la ayuda de las fibras.

#### **CONCLUSIONES**

- Con la dosificación utilizada de fibras de polipropileno (900 g), las propiedades del concreto fresco no sufrieron afectaciones considerables que afectarían la resistencia o la fluidez del concreto.

- La resistencia a compresión del concreto, así como el esfuerzo cortante, no sufrieron cambios considerables por la presencia de las fibras, por lo que se puede considerar despreciable su aportación a estas propiedades.
- La resistencia a tensión y a flexión del concreto se incrementó significativamente con el uso de las fibras, observándose que la mejoría fue mayor en el concreto de baja resistencia.
- La permeabilidad disminuyó ampliamente, sobre todo en el concreto de baja resistencia. Por lo que las fibras de polipropileno sí podrían tener un uso con fines de protección, principalmente cuando los agresores entran al concreto a través de los poros capilares.

#### **REFERENCIAS**

ACI 211.1-91 (2002) “*Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete*” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, Estados Unidos.

Alhozaimy, A.M., Soroushian, P. y Mirza F. (1996), “*Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials*”, Cement & Concrete Composites, Vol. 18, No. 1, páginas 85-92.

Balaguru N. Perumalsamy y Surendra P. Shah (1992) *Fiber-Reinforced Cement Composites*, 1ª ed., McGraw-Hill, Estados Unidos, pp 530.

Bartos Peter J.M. (1993) *Special Concretes*, 1ª ed., E & FN Editions, Gran Bretaña, pp 264.

Mendoza C. J., Aire C. y Dávila P. (2011) “*Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido*”, Concreto y Cemento: Investigación y Desarrollo, Vol. 2, No. 2, páginas 35-47.

Moreno E. I., Solís Carcaño R. G. y Arias-Palma C. A. (2008a) “*Desempeño de las pinturas vinil-acríticas contra la carbonatación del concreto*”, Ingeniería—Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 12, No. 1, páginas 31-39.

Moreno, E.I., Solís Carcaño, R. y Serrano Zebadua, C. (2008b), “*Natural concrete curing under hot sub-humid climate*”. Proc. Fifth CANMET/ACI Int’l. Conf. on High Performance Concrete Structures and Materials, ACI SP-253, Eds. Pazini, Holland, Malhotra & Helene, American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, Estados Unidos, pp. 291-303.

NMX C 73 ONNCCE (2004) “*Industria de la construcción – agregados – masa volumétrica – método de prueba*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.

NMX C 77 ONNCCE (1997) “*Industria de la construcción – agregados para concreto – análisis granulométrico – método de prueba*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.

NMX C 83 ONNCCE (2002) “*Industria de la construcción –concreto – determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto – método de prueba*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.

NMX C 111 ONNCCE (2004) “*Industria de la construcción – agregados para concreto hidráulico – especificaciones y métodos de prueba*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.

NMX C 156 ONNCCE (1997) “*Industria de la construcción –concreto – determinación del revenimiento en el concreto fresco*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.

NMX C 157 ONNCCE (2006) “*Industria de la construcción –concreto – determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.

NMX C 162 ONNCCE (2000) “*Industria de la construcción –concreto – determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.

NMX C 163 ONNCCE (1997) “*Industria de la construcción –concreto – determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.

NMX C 164 ONNCCE (2002) “*Industria de la construcción – agregados – determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.

NMX C 165 ONNCCE (2004) “*Industria de la construcción – agregados – determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino – método de prueba*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.

NMX C 191 ONNCCE (2004) “*Industria de la construcción –concreto – determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.

Norma Suiza SIA 262/1E (2003) “Concrete structures – complementary specifications: Air permeability in structures”, Swiss Society of Engineers and Architects, Zürich.

Torrent R. (1999) “*Gas Permeability of High-Permeability of High-Performance Concrete Site and Laboratory Tests*”, ACI SP-186, American Concrete Institute, Farmington Hill, Estados Unidos, pp 291-308.

Torrent R., Denarié E., Jacobs F., Leemann A. y Teruzzi T. (2012) “*Specification and site control of the permeability of the cover concrete: The Swiss approach*” Materials and Corrosion, Vol. 63, No. 12, páginas 1127-1133.

Vondran G. L. (1984) “*Making more durable concrete with polymeric fibers*”. Concrete Durability: Katharine and Bryant Mather International Conference, ACI SP-100, Ed. Scanlon J. M., Vol. 1, American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, Estados Unidos, pp. 377-396.

Zollo, R.F. (1984), “*Collated fibrillated polypropylene fibers in FRC*”, en Fiber Reinforced Concrete International Symposium, ACI SP-81, American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, Estados Unidos, pp. 397-409.

---

Este documento debe citarse como: Moreno E. I., Varela-Rivera J., Solís-Carcaño R., Sánchez-Pech O. (2013). **Efecto de las fibras poliméricas en la permeabilidad y características mecánicas del concreto con agregado calizo de alta absorción.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 17-3, pp 205-214, ISSN 1665-529-X.