INFLUENCIA DE LAS FIBRAS DE POLIPROPILENO EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADOS PLÁSTICO Y ENDURECIDO

Carlos Javier Mendoza[1]; Carlos Aire[2] y Paula Dávila[3]

RESUMEN

Se estudia el efecto que tiene la incorporación de fibras cortas de polipropileno en las propiedades del concreto en estados fresco y endurecido. Las variables que se consideran son el tamaño máximo del agregado grueso, los finos en la arena y el contenido de fibras. Se fabricaron ocho mezclas de concreto las cuales se ensayaron en estado fresco y a las edades de 7 y 28 días. Al concreto en estado fresco se le determinó el revenimiento, el contenido de aire, la masa unitaria y el agrietamiento por contracción plástica; en estado endurecido, la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, la relación de Poisson, la resistencia a tensión, la tenacidad, la resistencia al impacto y la contracción por secado. La presencia de las fibras en el concreto fresco modifica la consistencia de la mezcla y reduce el agrietamiento por contracción plástica; en estado endurecido, incrementa la tenacidad y la resistencia al impacto y reduce la contracción por secado y el agrietamiento; las otras propiedades permanecen sin cambios significativos.

Palabras clave: Concreto, fibras de polipropileno, agrietamiento, contracción plástica, consistencia de la mezcla, resistencia a compresión, tensión, módulo de elasticidad, tenacidad, impacto, contracción por secado.

ABSTRACT

The effect in properties of fresh and hardened concrete of incorporating short propylene fibers is discussed in this paper. The factors that are studied are the maximum coarse aggregate size, fines in sand and fiber content. Eight trial batches were made and were tested in fresh state and after 7 and 28 days of hardening. Slump, air content, unit mass and plastic shrinkage cracking were measured in the fresh state; compression strength, modulus of elasticity, Poisson ratio, tensile strength, toughness, impact strength and drying shrinkage were measured in the hardened state. The presence of fibers in fresh concrete modifies the mix consistency and decreases plastic shrinkage cracking; in hardened concrete, it increases toughness and impact strength and decreases drying shrinkage and cracking; the other properties stay without relevant changes.

Keywords: Concrete, fibers of propylene, cracking, plastic shrinkage, mix consistency, strength compression, tension, modulus of elasticity, toughness, impact, drying shrinkage.

RESUMO

Estuda-se o efeito que tem a incorporação de curtas fibras de polipropileno nas propriedades do concreto em estados fresco e endurecido. As variáveis que se consideram são: o tamanho máximo do agregado graúdo, os finos na areia e o conteúdo de fibras. Fabricaram-se oito misturas de concreto das quais foram experimentadas em estado fresco e com as idades de 7 e 28 dias. Ao concreto em estado fresco, foi determinada a redução, o conteúdo de ar, a massa unitária e a fissuração por retração plástica; em estado endurecido, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a relação de Poisson, a resistência à tensão, a tenacidade, a resistência ao impacto e a contração por secado. A presença das fibras no concreto fresco modifica a consistência da mistura e reduz as fissuras por contração plástica; em estado endurecido, incrementa a tenacidade e a resistência ao impacto e reduz a contração por secado e a fissuração; as outras propriedades permanecem sem mudanças significativas.

Palavras chave: Concreto, fibras de polipropileno, fissuração, contração plástica, consistência da mistura, resistência à compressão, tensão, módulo de elasticidade, tenacidade, impacto, contração por secado.

[1, 2] y [3] son miembros del Instituto de Ingeniería-Estructuras y Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México.

INTRODUCCIÓN

Las fibras sintéticas se fabrican de materiales tales como acrílico, aramida, carbón, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno. En general, las fibras sintéticas se caracterizan por tener elevada resistencia a la tensión y, entre ellas, se definen dos categorías: las de alto y las de bajo módulo de elasticidad.

Las principales ventajas de la adición de fibras sintéticas en el concreto son, en estado endurecido, el incremento de la tenacidad y de la resistencia al impacto y, en el estado fresco, el control de la contracción plástica. Adicionalmente, controla la aparición de fisuras durante la vida útil de la estructura y brinda mayor resistencia a la fatiga.

Durante los últimos años se han realizado diversos estudios para evaluar las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de polipropileno, en los que el porcentaje de fibras ha variado entre 0.1 y 10% del volumen. Algunos de estos resultados son contradictorios respecto a los efectos de las fibras de polipropileno en las resistencias a compresión y flexión del concreto[1]. Algunos estudios indican que la presencia de las fibras tiene efectos negativos en la resistencia a compresión, aunque se alcanzan ligeros incrementos en la resistencia a flexión, cuando el contenido de fibra es relativamente alto[2]. Otros estudios presentan efectos favorables de la adición de fibra sobre la tenacidad e incremento en la resistencia a compresión, del orden de 25%, cuando se emplea un porcentaje volumétrico de 0.5% de fibras de polipropileno[3, 4, 5].

El uso de concreto reforzado con fibra ha pasado de la experimentación a pequeña escala a aplicaciones de rutina en plantas de prefabricados y en campo que incluye la colocación de muchos miles de metros cúbicos en todo el mundo. En la práctica actual de la construcción a la matriz de concreto se añaden fibras discontinuas en volúmenes relativamente bajos, usualmente en porcentajes menores a 2%, aunque lo más común es que varíe entre 0.1 y 0.7%.

El concreto con fibra se ha empleado en variadas aplicaciones siendo las más frecuentes en la construcción de pisos industriales de alto desempeño, pavimentos, cubiertas para puentes, concreto lanzado para la estabilización de taludes, revestimiento de túneles, elementos estructurales prefabricados, bóvedas, entre otras. Este trabajo presenta los resultados de un estudio experimental realizado en el Laboratorio de Materiales del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el que se evalúa el comportamiento del concreto por la adición de fibras de polipropileno. El estudio comprende la fabricación de mezclas de concreto con dos tamaños de agregado grueso (9.5 y 19.0 mm), y cuatro contenidos de fibra de polipropileno (0, 1, 3 y 5 kg/m^3), en mezclas con revenimiento promedio de 100 mm y una resistencia nominal a compresión de 300 kg/cm^2. Se evalúan las propiedades, en estado plástico, de revenimiento, masa unitaria, aire atrapado y agrietamiento por contracción plástica, así como las propiedades mecánicas de resistencia a compresión, a tensión por compresión diametral, a flexión, al impacto, módulo elástico, contracción por secado y tenacidad.

DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES COMPONENTES DEL CONCRETO CON FIBRAS

Cemento

Para el estudio se empleó cemento CPO 30R (Cemento Portland Ordinario), que cumple con las características establecidas en la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE.

Agregados

En la fabricación de los concreto se empleó agregado grueso (grava) de origen calizo en dos tamaños máximos, 19.0 y 9.5 mm (3/4" y 3/8"). Por su parte, como agregado fino (arena) se empleó agregado de origen andesítico, el cual es usual que tenga

Tabla 1. Propiedades de los agregados pétreos.

Propiedad	Arena		Grava	
	natural	lavada	9.5 mm	19.0 mm
Peso específico (seco)	2.11	2.28	2.46	2.46
Peso específico saturado superficialmente (seco)	2.31	2.40	2.51	2.51
Absorción, %	9.05	5.63	1.73	1.73
Peso volumétrico seco suelto, kg/m^3	1562	1539	1439	1450
Peso volumétrico seco compactado, kg/m^3	1662	1644	1583	1613
Módulo de finura	2.84	3.10	----	----

exceso de finos que pasan la malla 200 (75 μm). Para subsanar esta deficiencia se lavó parte de la arena empleada para dejarla en condiciones aceptables. No obstante que el agregado de origen andesítico es potencialmente reactivo con los álcalis del cemento, no hay evidencia de que esta reacción se haya presentado en toda la historia del uso de este agregado en los concretos de la ciudad de México. Las propiedades de estos agregados pétreos se indican en la Tabla 1.

Fibra de polipropileno

La fibra copolimérica es de tipo monofilamento, no fibrilada, totalmente orientada, con un perfil que permite anclarla a la matriz cementicia. En la Tabla 2 se presentan las propiedades de la fibra sintética empleada.

Tabla 2. Propiedades de la fibra de polipropileno.

Fibra	Monofilamento de copolímero virgen
Color	Gris
Longitud, mm	38
Resistencia a tensión, kg/cm²	6328-7031
Módulo elástico, kg/cm²	43000
Peso específico	0.93
Punto de ignición, ºC	177

Aditivo

Cuando fue necesario, se usó, un superfluidificante de nueva generación (ASTM C494, Tipo F) en las mezclas de baja trabajabilidad con el fin de mantener el revenimiento de las mezclas en el límite establecido de 100±25 mm. El aditivo empleado es un compuesto a base de cadenas de éteres policarboxílicos modificados, propio para concretos empleados en climas cálidos.

Agua

Se empleó agua proveniente de la red de agua potable de la ciudad de México; el agua debe satisfacer la norma NMX-C122-ONNCCE, Agua para concreto.

MEZCLAS DE CONCRETO CON FIBRAS

Diseño

El diseño de las mezclas se llevó a cabo de acuerdo con las recomendaciones de ACI 211.1 "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete"[6] por el método de volúmenes absolutos. El objetivo principal fue alcanzar mezclas de consistencia media (revenimiento de 100 ± 25 mm) para facilitar la manipulación, colocación y compactación y una resistencia a compresión de 300 kg/cm^2 a 28 días de edad.

Por cada tamaño máximo de agregado grueso (19.0 y 9.5 mm) se realizaron cuatro mezclas, una de referencia (M1 y M5, sin fibras) y las otras tres con consumo de fibras de 1, 3 y 5 kg/m^3 de concreto (M2 a M4, y M6 a M8, respectivamente), que corresponden a porcentajes volumétricos de 0.11, 0.32 y 0.54%, respectivamente. Para las mezclas con fibras de polipropileno, los consumos de los materiales componentes del concreto fueron los mismos, simplemente se le agregaron las fibras en la cantidad prevista al final del mezclado. La mezcla M4 con un consumo de fibra de 5 kg/m^3 de concreto requirió agregarle aditivo superfluidificante (1373 ml/m^3) para restaurar el revenimiento requerido de 100 ±25 mm. Los consumos de los materiales componentes de las mezclas se indican en la Tabla 3.

Mezclado

Las fibras sintéticas que se diseñan y producen específicamente para concreto pueden resistir a largo plazo el medio altamente alcalino del concreto. Las fibras se añaden al concreto durante la operación de mezclado. Usualmente se empacan de manera suelta en bolsas degradables que se agregan a la mezcla en la planta de dosificación y mezclado, o se vierten al camión mezclador en el lugar de la obra. Se prefiere la primera opción porque se puede tener mejor control en su consumo y permitir un mezclado eficiente que garantice la uniformidad de su distribución en la masa de concreto.

Tabla 3. Consumo y proporción de los componentes de los concretos.

Material	Consumos de material en kg/m³	
	Grava de 19.0 mm	Grava de 9.5 mm
Cemento	362	426
Agua	177	214
Arena	742	772
Grava	936	836
Aditivo (solo en M4), ml	1373	-
Relación agua/cemento	0.49	0.50
Proporción arena-grava	0.44-0.56	0.48-0.52

El mezclado del concreto utilizado en el estudio se realizó en una revolvedora de 90 litros de capacidad. Primero se incorporaron la arena, la grava y el agua de absorción, dejándolos mezclar por un minuto; enseguida se añadieron el cemento y el agua restante y se continuó el mezclado por otros tres minutos, seguido de un reposo de tres minutos y de dos minutos adicionales de mezclado, para romper el fraguado falso en caso de que este se presentara. Las fibras se añadieron al final del tiempo de mezclado descrito anteriormente, mezclando los materiales incluidos durante otros dos minutos. En caso de requerir añadir el aditivo para restaurar el revenimiento, este se incorporó al final de ese tiempo y se dejó mezclar por dos minutos adicionales.

COLOCACIÓN, COMPACTACIÓN Y CURADO

El concreto reforzado con fibras sintéticas se puede colocar empleando equipo convencional de colocación tal como canaletas de camión, cubos con descarga inferior, bandas transportadoras y bombas. El equipo debe estar limpio y en buenas condiciones para asegurar que el concreto fluya fácilmente. Cabe decir que la compactación se debe lograr mediante vibrado externo para garantizar una distribución uniforme de las fibras, misma que se altera con un vibrado por inmersión.

El moldeado de cilindros y vigas fue en dos capas, y los anillos en una sola. Todas las muestras fueron compactadas en una mesa de vibrado durante 25 segundos. A los especímenes empleados en el estudio se le aplicó un curado húmedo (23°C, 100% HR) por 28 días o hasta la edad de ensaye.

Acabado

Operación de enrase: Para la operación de enrase se puede emplear regla vibratoria sobre el molde, enrasadora eléctrica portátil o enrasadora guiada por láser. La vibración externa hace que la pasta salga a la superficie y cubra las fibras localizadas en la superficie de la losa, encapsulándolas en el concreto y minimizando su exposición en la superficie.

Periodo de espera: Las fibras sintéticas pueden bloquear o retardar la aparición del agua de sangrado en la superficie del concreto. Por lo tanto, es importante verificar que toda el agua de sangrado se haya evaporado antes de comenzar con el acabado del concreto. Puesto que el concreto con fibras no parece nada diferente del concreto convencional únicamente se requiere esperar un poco más de tiempo que el usual. Si se empieza la operación de acabado demasiado pronto, se incrementa la posibilidad de que las fibras queden expuestas.

Operaciones finales de acabado: Los concretos con fibras sintéticas son compatibles con casi todos los tratamientos y acabados de la superficie de concreto, incluyendo estampado de patrones, agregado expuesto, escobillado y acabado con llana manual o mecánica. Si se requiere una superficie texturizada, se puede utilizar escoba con cerdas duras o un rastrillo texturizador, a condición de que se pase en una sola dirección. Si el rastrillo o la escoba se impulsan hacia atrás y hacia adelante, se pueden desacomodar las fibras.

Fibras expuestas: Si hay fibras expuestas en la superficie de la losa de concreto, las fibras sintéticas, relativamente suaves, por lo regular desaparecen rápidamente bajo la acción de un tránsito ligero.

A los especímenes utilizados en el estudio se les dio un acabado con llana metálica.

CONCRETO EN ESTADO FRESCO

Al concreto en estado fresco se le hicieron las siguientes determinaciones: revenimiento, contenido de aire, masa unitaria y agrietamiento por contracción plástica[7]. Los ensayos de revenimiento, contenido de aire y masa unitaria se realizaron de conformidad con los métodos de ensaye NMX-C156-ONNCCE, NMX-C157-ONNCCE y NMX-C-112-ONNCCE, respectivamente.

El ensaye de agrietamiento por contracción plástica consiste en fabricar anillos de concreto de 80 mm de altura y diámetros interior y exterior de 280 y 580 mm, respectivamente, y someterlos a un flujo de viento de 4 m/s que se hace pasar por un túnel de viento en un ambiente controlado a una temperatura de 20ºC y una humedad relativa de 40%, Fig. 1[8]. Los resultados se presentan en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4. Propiedades del concreto en estado fresco de mezclas con y sin fibras.

Mezcla	Revenimiento	Masa unitaria	Aire atrapado
	cm	kg/m³	%
Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar			
M1 (0 kg de fibra/m³)	12.0	2281	2.0
M2 (1 kg de fibra/m³)	9.9	2271	2.4
M3 (3 kg de fibra/m³)	8.7	2280	2.2
M4 (5 kg de fibra/m³)	9.8*	2266	2.2
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada			
M5 (0 kg de fibra/m³)	10.0	2238	3.4
M6 (1 kg de fibra/m³)	10.7	2249	2.8
M7 (3 kg de fibra/m³)	9.2	2257	2.5
M8 (5 kg de fibra/m³)	7.1	2234	2.8

*Revenimiento restablecido con el empleo de aditivo superfluidificante.

Tabla 5. Índice de grieta por contracción plástica.

Mezcla	Número de grietas		Índice de grieta
Grava 19.0 mm	Anillo 1	Anillo 2	mm
M1 (0 kg de fibra/m³)	9	9	0.23
M2 (1 kg de fibra/m³)	4	3	0.18
M3 (3 kg de fibra/m³)	1	1	0.08
M4 (5 kg de fibra/m³)	0	0	----
Grava 9.5 mm			
M5 (0 kg de fibra/m³)	5	3	0.11
M6 (1 kg de fibra/m³)	2	1	0.07
M7 (3 kg de fibra/m³)	1	1	0.04
M8 (5 kg de fibra/m³)	0	0	----

Como es de esperar y como se observa en la tabla 4 el revenimiento de las mezclas se reduce a medida que el contenido de fibras se incrementa. En las mezclas con 5 kg de fibras por m³ de concreto (M4 y M8) el revenimiento se salió del rango establecido como aceptable (100 ± 25 mm); para restablecer la consistencia a la mezcla M4 se le agregó aditivo superfluidificante, en tanto que a la mezcla M8 no se le corrigió el revenimiento dado que se podía compactar fácilmente.

La masa unitaria no presenta cambios significativos alcanzando valores promedio de 2274 y 2244 para las mezclas M1 a M4 y M5 a M8, respectivamente, con coeficientes de variación menores a 0.5%.

El contenido de aire tampoco varió significativamente con el consumo de fibra, alcanzando valores promedio de 2.2% para las mezclas con agregado grueso de 19.0 mm de tamaño máximo, y de 2.9% para las mezclas de 9.5 mm de tamaño máximo de agregado. Esta diferencia se debe a que en estas últimas mezclas hechas con arena lavada se eliminan muchos de los finos, ya que al emplear agregados gruesos de tamaños más pequeños, se incrementan también los vacíos. En cuan-

to al índice de grieta por contracción plástica, éste se establece como el ancho promedio de grieta en las secciones 1 y 2 mostrado en el esquema de agrietamiento de la Fig 2. En la Tabla 6 se puede observar que el número de grietas y el ancho de las mismas disminuyen, tanto por el efecto del consumo de fibra como por el empleo de arena con menor cantidad de finos. En cuanto al consumo de fibras se observa que a partir de 3 kg/m^3 de concreto se tienen anchos de grietas del orden de las centésimas de milímetro y para consumos de fibra de 5 kg/m^3 de concreto ya no se presentan grietas.

Fig. 1. Anillo y equipo de la prueba de contracción plástica.

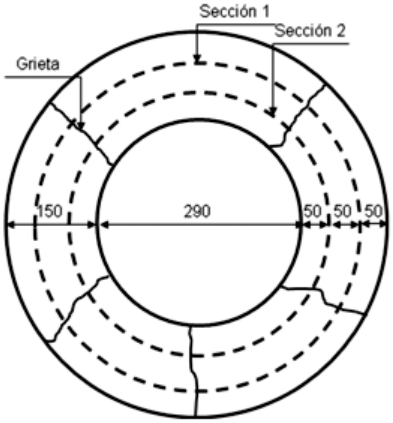

Fig. 2. Esquema de desarrollo de grietas.

Tabla 6. Resistencia a compresión de los concretos con y sin fibras.

	Resistencia a compresión, f_c, kg/cm^2		f_c 7 días/f_c 28 días
	7 días	28 días	
Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar			
M1 (0 kg de fibra/m^3)	238	366	0.65
M2 (1 kg de fibra/m^3)	241	346	0.70
M3 (3 kg de fibra/m^3)	230	334	0.69
M4 (5 kg de fibra/m^3)	252	365	0.69
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada			
M5 (0 kg de fibra/m^3)	251	350	0.72
M6 (1 kg de fibra/m^3)	264	352	0.75
M7 (3 kg de fibra/m^3)	243	336	0.72
M8 (5 kg de fibra/m^3)	247	334	0.73

CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Ensayes realizados

Al concreto endurecido se le hicieron las siguientes determinaciones: resistencia a compresión; módulo elástico y relación de Poisson; resistencia a tensión por compresión diametral; resistencia a flexión y tenacidad; resistencia al impacto, y contracción por secado[7, 9].

Los ensayes de resistencia a compresión, módulo elástico y relación de Poisson, resistencia a tensión por compresión diametral y resistencia a tensión por flexión se realizaron de conformidad con los métodos de ensaye NMX-C-083-ONNCCE, NMX-C-128-ONNCCE, NMX-C-163-ONNCCE y NMX-C-191-ONNCCE, respectivamente. El ensaye de contracción por secado se realizó de acuerdo con el método ASTM C-157.

En la Fig. 3 se presenta la instrumentación para el ensaye de tenacidad y en la 4 un esquema del dispositivo para el ensaye de impacto.

Fig. 3. Dispositivo para la prueba de flexión y tenacidad.

RESULTADOS DE LOS ENSAYES

Resistencia a compresión

En la Tabla 6 se presenta las resistencia a compresión de los concretos ensayados a edades de 7 y 28 días, para las mezclas hechas con agregados gruesos de 9.5 y 19.0 mm de tamaño máximo y arena andesítica lavada y sin lavar, respectivamente. Como se puede observar prácticamente no existe modificación en la resistencia por la incorporación de las fibras; aunque hay una tendencia a la disminución de la resistencia con el consumo de fibra, esta reducción se debe principalmente a que se reduce la consistencia y, por tanto, la compactación que se puede lograr. Al modificar la consistencia por la incorporación de un aditivo superfluidificante (mezcla M4) se incrementa la consistencia, igualando la resistencia a la alcanzada en los concretos sin fibra. A la mezcla M8 no se le incorporó el aditivo superfluidificante para restaurar el revenimiento y, por tanto, no mejoró la compactación ni la resistencia a compresión.

Módulo de elasticidad y relación de Poisson

En la Tabla 7 se presentan la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, la relación de Poisson, la deformación unitaria máxima y la relación $E/\sqrt{fc}$, obtenidas del ensaye de las diferentes mezclas. Cabe señalar que cada resultado representa el promedio de tres especímenes ensayados. De acuerdo con los resultados de los ensayes no se observan cambios en la rigidez del concreto por la incorporación de la fibra, conservando valores similares los concretos con o sin fibras sintéticas de polipropileno. La deformación unitaria máxima resultó prácticamente la misma para ambos concretos.

Tabla 7. Propiedades elásticas de los concretos con fibras.

Identificación	Resistencia a compresión, f_c, kg/cm²	Módulo de elasticidad, E, kg/cm²	Relación de Poisson, μ	Deformación unitaria máxima. ε_c	$E_c/\sqrt{f_c}$
Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar					
MI	366	241 986	0.26	0.0026	12 649
M2	346	233 255	0.22	0.0027	12 540
M3	334	248 975	0.21	0.0023	13 623
M4	365	247 108	0.24	0.0027	12 934
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada					
M5	350	235 347	0.20	0.0029	12 435
M6	352	227 437	0.21	0.0030	11 918
M7	336	236 212	0.26	0.0025	12 615
M8	334	218 428	0.23	0.0033	11 827

El tamaño del agregado grueso origina un ligero cambio en la rigidez del concreto. Las mezclas de concretos con gravas más pequeñas requieren mayor cantidad de mortero y, por tanto, son más deformables.

Tabla 8. Resistencia a tensión por flexión.

Identificación	Resistencia a compresión, f_c, kg/cm²	Resistencia a flexión, f_f, kg/cm²	f_f/f_c, %	$f_f/\sqrt{f_c}$
Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar				
M1 (0 kg de fibra/m³)	366	35	9.6	1.83
M2 (1 kg de fibra/m³)	346	39	11.3	2.10
M3 (3 kg de fibra/m³)	334	39	11.7	2.13
M4 (5 kg de fibra/m³)	365	40	11.0	2.10
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada				
M5 (0 kg de fibra/m³)	350	48	13.7	2.56
M6 (1 kg de fibra/m³)	352	35	9.9	1.89
M7 (3 kg de fibra/m³)	336	41	12.2	2.22
M8 (5 kg de fibra/m³)	334	43	12.9	2.34

Resistencia a tensión por flexión

En la Tabla 8 se presentan los resultados del ensaye a flexión de vigas de concreto reforzado con diferentes porcentajes de fibras, tanto para los concretos con gravas de 19.0 mm de tamaño máximo y arena sin lavar, como para los concretos con gravas de 9.5 mm de tamaño máximo y arena lavada. Como se puede observar de los resultados de ensayes, para los concretos con gravas de 19.0 mm hubo un incremento promedio de 12% en la resistencia a tensión por flexión en los concretos que tenían fibras, no así en los concretos con gravas de 9.5 mm de tamaño máximo donde se presentó una reducción promedio de 21% de la resistencia a tensión por flexión. No obstante lo anterior, en general, los concretos con y sin fibras con agregados de 9.5 mm de tamaño máximo tuvieron resistencias a tensión por flexión superiores a la de los concretos con agregados de 19.0 mm de tamaño máximo, pero como la resistencia del concreto sin fibra con agregado de 9.5 mm (mezcla M5) alcanzó una resistencia a tensión más elevada ($2.56\sqrt{f_c}$) de lo que era de espe-

rarse ($1.80\sqrt{f_c}$ a $2.20\sqrt{f_c}$) las resistencias a tensión de los demás concretos con fibras (M6 a M8) resultaron inferiores a la del concreto sin fibras. Por lo antes comentado, no se puede generalizar el efecto de la incorporación de las fibras en la resistencia a tensión, ya que en algunas mezclas las fibras incrementan la resistencia y en otras la reduce. Las relaciones entre las resistencias a tensión y compresión encontradas en el estudio son las usuales para los concretos sin fibras.

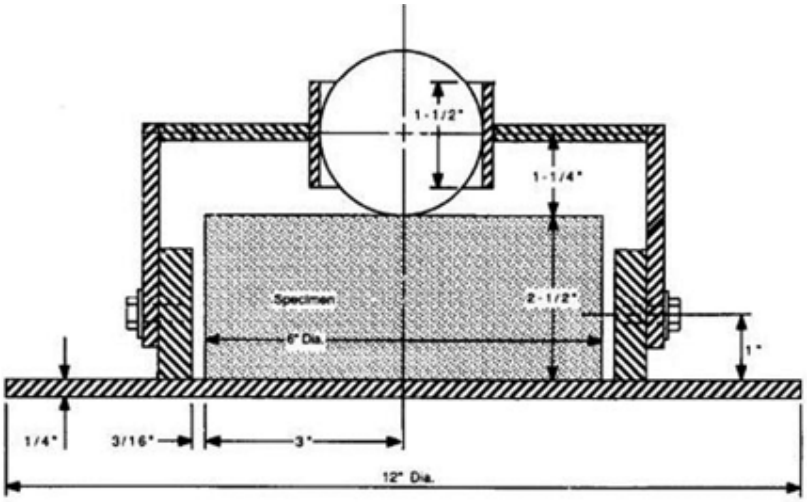

Fig. 4. Esquema del dispositivo para la prueba de impacto según (ACI 544.2R, 1989).

Resistencia a tensión por compresión diametral

Los resultados de los ensayes se presentan en la Tabla 9 y en la Fig. 5 se observa el tipo de falla que se presenta en los especímenes ensayados, siendo clara la influencia de las fibras en la ductilidad del concreto a la falla. Al igual que en el caso de la resistencia a tensión por flexión en este ensaye se encontraron ligeros incrementos y reducciones, inferiores a 9%, en la resistencia a tensión de los concretos que incluyen fibras en los porcentajes aquí estudiados, en relación con la de los concretos sin fibras.

Tabla 9. Resistencia a tensión por compresión diametral.

Identificación	Resistencia a compresión, f_c, kg/cm²	Resistencia a tensión, f_t, kg/cm²	f_t/f_c, %	$f_t/\sqrt{f_c}$
Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar				
M1 (0 kg de fibra/m³)	366	29	7.9	1.52
M2 (1 kg de fibra/m³)	346	30	8.7	1.61
M3 (3 kg de fibra/m³)	334	29	8.7	1.59
M4 (5 kg de fibra/m³)	365	32	8.8	1.67
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada				
M5 (0 kg de fibra/m³)	350	34	9.6	1.80
M6 (1 kg de fibra/m³)	352	31	8.7	1.63
M7 (3 kg de fibra/m³)	336	30	9.1	1.66
M8 (5 kg de fibra/m³)	334	33	9.9	1.80

Las relaciones entre las resistencias a tensión y compresión son las usuales para estos ensayes y como se observa no hay diferencia significativa entre los valores determinados para los concretos sin fibras y los que sí las incluyen.

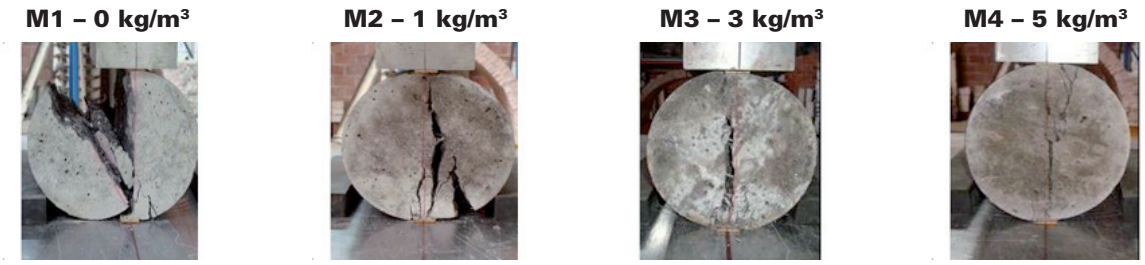

Fig. 5. Modo de falla de las muestras de resistencia a compresión diametral para las mezclas con grava de 19.0 mm.

Resistencia al impacto

En la Tabla 10 se presentan los resultados de este ensaye en términos del número de impactos requeridos para producir el agrietamiento inicial y total de las muestras de concreto con y sin fibras. De acuerdo con los resultados es posible ver que la incorporación de las fibras de polipropileno tuvo un efecto benéfico en el desempeño de los concretos, sobre todo, cuando los consumos de fibras fueron iguales o mayores a 3 kg/m³ de concreto. Por otra parte, se observa que la capacidad de los concretos para resistir los impactos fue superior cuando se fabricaron con agregados de 9.5 mm de tamaño máximo y arena lavada.

Tabla 10. Resistencia al impacto de los concretos con y sin fibras.

Identificación	Resistencia al impacto. Número de impactos	
	Primera grieta (C. con fibra/C. sin fibra)	Grieta última (C. con fibra/C. sin fibra)
Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar		
M1 (0 kg de fibra/m³)	347 (1.00)	350 (1.00)
M2 (1 kg de fibra/m³)	225 (0.65)	255 (0.73)
M3 (3 kg de fibra/m³)	446 (1.28)	490 (1.40)
M4 (5 kg de fibra/m³)	693 (2.00)	764 (2.18)
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada		
M5 (0 kg de fibra/m³)	553 (1.00)	555 (1.00)
M6 (1 kg de fibra/m³)	639 (1.15)	667 (1.20)
M7 (3 kg de fibra/m³)	706 (1.28)	776 (1.40)
M8 (5 kg de fibra/m³)	815 (1.47)	969 (1.75)

Tenacidad

La tenacidad de los concretos se mide como el área bajo la curva esfuerzo-deformación obtenida del ensaye en flexión de vigas realizado con cargas aplicadas a los tercios del claro y con control de la velocidad de desplazamiento al centro del claro. Se determinan tres índices de tenacidad (I_5, I_{10} e I_{20}) que corresponden a las relaciones de las tenacidades que se alcanzan a desplazamiento de 3.0, 5.5 y 10.5 veces el desplazamiento alcanzado para la tenacidad a la aparición de la primera grieta (resiliencia elástica), respectivamente, divididas entre la resiliencia elástica. En la Tabla 11 se presentan los resultados de estos ensayes y en la Fig. 6 las gráficas carga-desplazamiento correspondientes. Así, como se puede observar la tenacidad de los concretos con fibras se incrementa con el consumo de fibra y resultó mayor para los concretos con grava de 9.5 mm de tamaño máximo y arena lavada.

Contracción por secado

Entre las acciones que originan el agrietamiento del concreto se encuentra la contracción del concreto por pérdida de humedad, cuando los elementos estructurales están restringidos para contraerse libremente. La rapidez con que se

presenta la pérdida de humedad está asociada a la temperatura y humedad relativa ambiente, la velocidad del viento, el área expuesta del elemento y otros factores intrínsecos del concreto, como la capacidad de sus materiales componentes para retener humedad en su interior[10].

Tabla 11. Tenacidad de las mezclas de concreto con fibras.

Identificación	Tenacidad (Joules)				Índices de tenacidad		
	T_δ	$T_{3\delta}$	$T_{5.5\delta}$	$T_{10.5\delta}$	I_5	I_{10}	I_{20}
Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar							
M2 (1 kg de fibra/m³)	35.65	62.46	69.82	82.64	1.75	1.96	2.32
M3 (3 kg de fibra/m³)	27.95	50.08	70.93	99.64	1.79	2.54	3.57
M4 (5 kg de fibra/m³)	32.08	71.94	119.16	197.11	2.24	3.72	6.16
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada							
M6 (1 kg de fibra/m³)	19.20	39.15	52.69	65.43	2.00	2.62	3.25
M7 (3 kg de fibra/m³)	5.24	16.20	23.76	36.29	3.10	4.54	6.93
M8 (5 kg de fibra/m³)	4.87	17.73	29.04	48.19	3.70	6.08	10.14

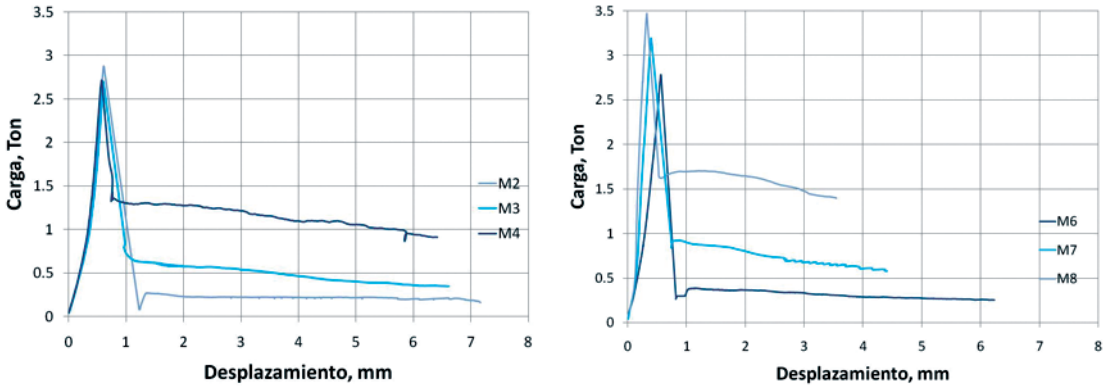

Fig. 6. Comportamiento carga-desplazamiento para las mezclas con agregado de 19.0 mm y 9.5 mm de tamaño máximo

La magnitud de la contracción está influenciada en forma importante por los consumos de agua y cemento en la mezcla, por la cantidad y rigidez del agregado grueso empleado y por la cantidad de finos menores a 75 μm que contenga la arena. En la Tabla 12 se presentan los resultados de las pruebas efectuadas a los concretos con y sin fibras, para los dos tamaños máximos del agregado grueso y para la arena con exceso de finos (arena sin lavar) y arena con cantidad reducida de finos (arena lavada). Estos resultados hacen ver la influencia que tiene el consumo de fibra en la contracción alcanzada; al aumentar la cantidad de fibra incluida se reduce la contracción última esperada a largo plazo. Por otra parte también se puede observar la influencia que tienen los finos de la arena en la magnitud de la contracción al comparar la contracción de los concretos sin fibra y con arena sin lavar (558×10^{-6}) y la del concreto sin fibra y arena lavada (466×10^{-6}). Asimismo, se observa la eficacia de la inclusión de fibras en los concretos con arena sin lavar y lavada, al comparar la reducción de la contracción última para consumo de fibra de 0 y 5 kg/m³ en los concretos con arena sin lavar (14%) y la alcanzada para los mismos consumos de fibra (0 y 5 kg/m³) en los concretos con arena lavada (54%)

En la Fig. 7 se presenta la contracción alcanzada a través del tiempo por los concretos con y sin fibras, con agregado grueso de 19.0 mm y arena sin lavar y por los concretos con agregado grueso de 9.5 mm de tamaño máximo y arena lavada.

CONCLUSIONES

El empleo de fibras de polipropileno en las mezclas de concreto modifica su consistencia cuando los consumos de fibra son elevados (del orden de 5 kg/m³ o superiores). La masa unitaria y el contenido de aire atrapado se modifican lige-

ramente. Por su parte, los consumos de fibras de polipropileno igual o mayor a 3 kg/m^3 de concreto, reducen en forma importante el agrietamiento por contracción plástica.

Tabla 12. Contracción por secado de los concretos con y sin fibras.

Identificación	$\varepsilon_t = \frac{t^a}{b + t^a}(\varepsilon_c)u$		
	a	b	$(\varepsilon_c)u$ x 10^{-6}
Mezclas con gravas de 19.0 mm y arena sin lavar			
M1 (0 kg de fibra/m^3)	1	7.31	558
M2 (1 kg de fibra/m^3)	1	11.3	535
M3 (3 kg de fibra/m^3)	1	16.5	492
M4 (5 kg de fibra/m^3)	1	10.9	483
Mezclas con gravas de 9.5 mm y arena lavada			
M5 (0 kg de fibra/m^3)	1	13.0	466
M6 (1 kg de fibra/m^3)	1	9.15	394
M7 (3 kg de fibra/m^3)	1	5.05	308
M8 (5 kg de fibra/m^3)	1	1.74	217

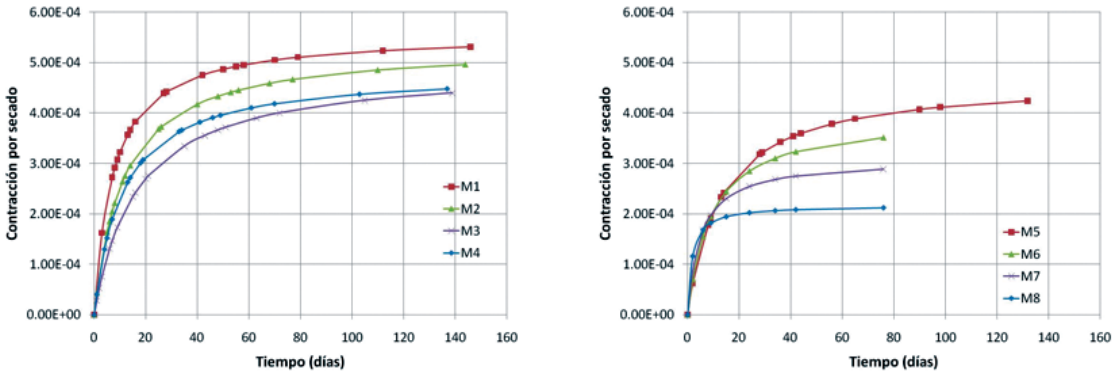

Fig. 7. Contracción por secado a través del tiempo para las mezclas con grava de 19.0 y 9.5 mm de tamaño máximo

La resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, la relación de Poisson y la deformación unitaria a la falla por compresión no se modifican en forma significativa por la inclusión de fibras hasta para consumos de 5 kg/m^3. La resistencia a tensión por flexión se modifica, aunque la tendencia no queda definida totalmente ya que en algunos casos la incrementa y en otros la reduce. La resistencia a tensión determinada en forma indirecta se modifica en menor cuantía, pero también sin tendencia definida.

La resistencia del concreto al impacto se incrementa en forma significativa con el consumo de fibras de polipropileno, siendo en algunos casos, mayor al doble para consumos de fibra de 5 kg/m^3 de concreto.

La tenacidad del concreto se incrementa en forma importante con el consumo de fibra, sobre todo en las mezclas con agregado grueso de 9.5 mm y arena lavada. La contracción por secado se reduce en forma importante con el consumo de fibras, sobre todo en las mezclas con agregado grueso de 9.5 mm y arena lavada.

REFERENCIAS

1. Alhozaimy, A.; Soroushian P.; Mirza F., "Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials", en *Cement & Concrete Composites*, 18, pp 85-92, 1996.

2. Hughes B.; Fattuhi, N., "Improving the toughness of high strength cement paste with fiber reinforcement", en *Composite*, 7(4), 185-188, 1976.

3. Malisch W., "Polypropylene fibers in concrete, What do the test tell us?, en *Concrete Construction*, 31, 363-368, 1986.

4. Kraii, P., "Proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete", en *Concrete Construction*, 30, pp 775-778, 1985.

5. Mindness, S.; Vondran, G., "Properties of concrete reinforced with fibrillated polypropylene fibers under impact loading", en *Cement and Concrete Research*, 109-115, 1988.

6. ACI 211.1, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete. Reported by ACI Committee 211, 1991.

7. ACI 544.2R, Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete. Reported by ACI Committee 544, 1989.

8. Dahl, PA, "Plastic shrinkage and cracking tendency of mortar and concrete containing fiber mesh", FCB Cement and Concrete Institute, Trondheim, Norway, 1985.

9. ASTM C 1018 Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack. Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using beam with third-point loading), 1985.

10. Comisión Federal de Electricidad, "Manual de Tecnología del Concreto", Limusa, México, 1994.