

# *La influencia de fibras sintéticas en las propiedades de hormigones frescos*

## *The synthetics fibers effect in the concrete plastic properties*

Julio Portella Montardo\*

\* *Desarrollos de Productos FITESA S.A, BRASIL*  
juliom@fitesa.com.br

Fecha de recepción: 20/01/05  
Fecha de aceptación: 25/03/05

### *Resumen*

*Este trabajo es fundamentalmente una revisión bibliográfica respecto de las propiedades físicas y mecánicas de las fibras sintéticas y su incorporación en hormigones. La incorporación de refuerzos de fibras en materiales cementicios está aumentando. Esta utilización es demasiado experimental y no se utilizan algunos conceptos teóricos que podrían ayudarnos a comprender mejor el mecanismo de interacción fibra-matriz. Con esto, nuestra capacidad de desarrollar nuevos materiales está limitada y algunas conclusiones sea de trabajos de laboratorio o de la experiencia práctica pueden contener errores. Por eso este artículo tiene como objetivos principales: 1) presentar los conceptos respecto de los materiales compuestos y 2) presentar la influencia de las fibras sintéticas en las propiedades plásticas de los hormigones. Se puede afirmar que las fibras sintéticas, por tener bajo módulo de elasticidad y una elongación bastante elevada afectan algunas importantes propiedades de los hormigones frescos. Las fibras sintéticas reducen la ocurrencia de fisuras por retracción plástica y disminuyen la cantidad de exudación. Este artículo tiene la pretensión de explicar las razones de acuerdo con la óptica de los materiales compuestos con fibras.*

*Palabras Clave: Fibras sintéticas, materiales compuestos, fisuras por retracción plástica, exudación, propiedades de los hormigones frescos*

### *Abstract*

*This paper provides a bibliographic review regarding some physical and mechanical properties of polypropylene fibers and their use in concrete. The inclusion of fibrous reinforcements in concrete is growing up. However this association is only experimental and some theoretical concepts which could help us to understand the interaction mechanism fiber-matrix are passed over. Therefore the new materials development potential and its experimental results comprehension are restricted. This paper has two purposes: 1) to present the concepts regarding composite materials and 2) to present the polypropylene fibers effect in the concrete plastic properties. The conclusion is that the low elasticity modulus and the high elongation of polypropylene fibers reduce the bleeding and plastic shrinkage cracking in concrete, enhancing the surface properties and the durability of hardened concrete products. This review intends to connect some experimental results to theoretical concepts about composite materials.*

*Keywords: Synthetics fibers, composite materials, plastic shrinkage cracking, bleeding, concrete plastic properties*

## **1. Introducción**

*Este artículo presenta la influencia de las fibras sintéticas en las propiedades de hormigones frescos y consecuentemente los beneficios que este tipo de micro refuerzo puede traer cuanto a la durabilidad de hormigones a largo plazo.*

*Sin embargo, antes de abordar directamente el tema de*

*este trabajo, se presentará los diferentes tipos de fibras actualmente disponibles en el mercado y una breve definición de materiales compuestos y compuestos fibrosos. Así esperase que el lector tenga una noción al respecto del campo de la ingeniería de los materiales que fundamenta el artículo.*

## 2. Materiales compuestos

*La utilización correcta de las fibras pasa por el concepto del nuevo material resultante que es el compuesto.*

*Un material compuesto es la combinación de dos o más materiales que tienen propiedades que los materiales componentes aisladamente no presentan. Ellos son, por lo tanto, constituidos por dos fases: la matriz y el elemento de refuerzo, y son desarrollados para optimizar los puntos fuertes de cada una de las fases (Budinski, 1996). En la industria mecánica, los compuestos son ampliamente utilizados y generalmente están constituidos por matriz dúctil y fibra de rotura frágil, como por ejemplo, los plásticos reforzados con fibras de vidrio. En la construcción civil, los compuestos son típicamente constituidos por matriz frágil reforzada con fibra dúctil, como los morteros reforzados con fibras sintéticas, aunque hay excepciones, como el cemento amianto, tal vez el compuesto más popular de la ingeniería civil, en la cual la matriz (pasta de cemento) y las fibras (amianto) presentan rotura frágil. Según Budinski (1996), los materiales compuestos más importantes son combinaciones de polímeros y materiales cerámicos. Bajo la óptica de la ciencia de los materiales, los productos basados en cemento Portland son considerados como materiales cerámicos porque presentan características típicas a este grupo de materiales, como por ejemplo, alta rigidez, fragilidad, baja resistencia a tracción y tendencia de fisura por secado.*

*Los polímeros se caracterizan por tener bajo módulo de elasticidad, ductilidad variable y resistencia a tracción moderada. Son extremadamente versátiles y, dentro de ciertos límites, pueden ser modificados para adaptarse de acuerdo a las necesidades específicas (Taylor, 1994).*

*Los cerámicos y los polímeros pueden considerarse materiales de grupos opuestos, una vez que las primeras son más rígidas y frágiles y, los segundos son menos rígidos y dúctiles (Taylor, 1994).*

*Los materiales compuestos, originados por la combinación de los cerámicos y de los polímeros, presentan características más apropiadas de resistencia mecánica, rigidez, ductilidad, fragilidad, capacidad de absorción de energía de deformación y comportamiento por fisuración cuando los comparan con los materiales que les dieron origen.*

*En todas las áreas de conocimiento un gran número de materiales nuevos pueden ser desarrollados a partir de la combinación de otros. Para ello, es necesario que se conozcan las propiedades mecánicas, físicas y químicas de los materiales de constitución y, como éstos*

*pueden ser combinados.*

*Budinski (1996) dice: "nosotros conocemos lo suficiente sobre el porqué de las cosas y cómo hacer una amplia variedad de materiales de ingeniería. Aún así, el desarrollo de futuros materiales dependerá de nuevos conocimientos de química y de estructura atómica. Probablemente no encontremos ningún otro elemento químico estable, por lo tanto, deberemos ser más creativos con lo que tenemos".*

### 2.1 Materiales Compuestos Con Fibras

*La historia de la utilización de compuestos reforzados con fibras como materiales de construcción tiene más de 3.000 años. Hay ejemplos del uso de paja en adobe de arcilla, mencionados en Éxodo, y crines de caballo reforzando materiales cimentados. Otras fibras naturales han sido utilizadas para comprobar la ductilidad de los materiales de construcción esencialmente frágiles (Illston, 1994).*

*En contraste con estos antiguos materiales naturales, el desarrollo de polímeros en los últimos cien años fue impulsado por el crecimiento de la industria del petróleo. Desde 1930 el petróleo ha sido la principal fuente de materia prima para la fabricación de productos químicos orgánicos, a partir de los cuales son fabricados plásticos, fibras, gomas y adhesivos (Illston, 1994). Desde 1955, han sido desarrollados una gran cantidad de polímeros, con variedad de propiedades y formas. Para Taylor (1994), los materiales basados en cemento Portland son una opción natural para la aplicación de materiales a base de fibras poliméricas, éstos son baratos pero presentan problemas relativos a ductilidad, resistencia al impacto y capacidad de absorción de energía. Según Johnston (1994), las fibras en una matriz cimentada pueden, en general, tener dos efectos importantes. Primero, ellas tienden a reforzar el compuesto sobre todos los modos de carga que provocan tensiones de tracción, o sea, retracción restringida, tracción directa o en la flexión y corte y, secundariamente, ellas mejoran la ductilidad y la tenacidad de una matriz frágil.*

*El desempeño de los compuestos reforzados con fibras es controlado principalmente por la dosis, por la longitud de la fibra, por las propiedades físicas de la fibra y de la matriz y por la adherencia entre las dos fases (Hannant, 1994).*

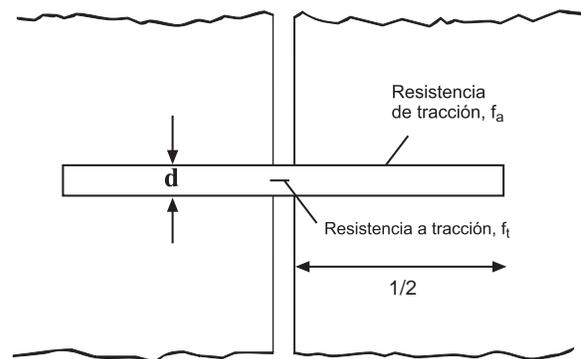
*Johnston (1994) agrega el efecto de orientación de una fibra en la matriz. La orientación de una fibra relativa al plano de rotura, o fisura, influye fuertemente su habilidad en transmitir cargas. Una fibra que se posiciona paralela al plan de rotura no tiene efecto,*

mientras que una perpendicular tiene efecto máximo. Taylor (1994) presenta los principales parámetros relacionados al desempeño de los materiales compuestos cimentados, asumiendo que las variaciones de las propiedades descritas a continuación se logran independientemente:

- Dosis de la fibra.** Una alta dosis de fibras otorga una mayor resistencia posfisuración y menor dimensión de fisuras, desde que las fibras puedan absorber las cargas adicionales ocasionadas por la fisura;
- Módulo de elasticidad de la fibra.** Un alto valor del módulo de elasticidad causaría un efecto similar a la dosis de fibra, pero, en la práctica, cuanto mayor sea el módulo, mayor será la probabilidad de que haya un arrancamiento de las fibras;
- Adherencia entre la fibra y la matriz.** Las características de resistencia, deformación y patrones de rotura de una gran variedad de compuestos cimentados reforzados con fibras dependen fundamentalmente de la adherencia fibra-matriz. Una alta adherencia entre la fibra y la matriz reduce el tamaño de las fisuras y amplía su distribución por el compuesto;
- Resistencia de la fibra.** Aumentando la resistencia de las fibras, aumenta también la ductilidad del compuesto, desde que no ocurra la rotura en las ligaciones de adherencia. La resistencia de la fibra dependerá, en la práctica, de las características pos-fisuración deseadas, así como la dosis de fibra y de las propiedades de adherencia fibra-matriz;
- Deformidad de la fibra.** La ductilidad se puede aumentar con la utilización de fibras que presenten alta deformación de rotura. Esto se debe al hecho de que compuestos con fibras de alto grado de deformidad consuman energía bajo la forma de estiramiento de la fibra;
- Compatibilidad entre la fibra y la matriz.** La compatibilidad química y física entre las fibras y la matriz es muy importante. A corto plazo, las fibras que absorben agua pueden ocasionar una excesiva pérdida de trabajabilidad del hormigón. Además, las fibras que absorben agua sufren una variación de volumen y, la adherencia fibra-matriz queda comprometida. A largo plazo, algunos tipos de fibras poliméricas no poseen estabilidad química frente a la presencia de álcali, como sucede en los materiales a base de cemento Portland. En esos casos, el deterioro con una pérdida rápida de las propiedades de la fibra y del compuesto puede ser significativa;

g) **Longitud de la fibra.** Cuanto menor sea la longitud de la fibra, mayor será la posibilidad de que sean arrancadas. Para una tensión dada de cizalladura superficial aplicada a la fibra, ésta será mejor utilizada si su comportamiento es lo suficientemente capaz de permitir que la tensión cizallante desarrolle una tensión de tracción igual a su resistencia a tracción. En verdad, no basta tan solo razonar sobre de la longitud de la fibra. Hay que tener en cuenta su diámetro. Pues depende de él la capacidad de que la fibra desarrolle las resistencias a la cizalladura y a la tracción.

La Figura 1 presenta una disposición idealizada de la fibra en relación a la fisura, seguida de una ecuación, donde es evidente la importancia de la relación  $l/d$ , donde "l" es la longitud y "d" el diámetro de la fibra. La relación  $l/d$  es proporcional al cociente entre la resistencia a tracción ( $f_t$ ) de la fibra y a su resistencia de adherencia fibra-matriz ( $f_a$ ), en la rotura. En gran parte, la tecnología de los materiales compuestos depende de esta simple ecuación: si la fibra tiene una resistencia alta a tracción, por ejemplo como el acero, entonces, la resistencia de adherencia necesaria deberá ser alta para impedir que sean arrancadas antes de que la resistencia a tracción sea totalmente movilizada, o deberá usarse fibras de alta relación  $l/d$ .



$$\frac{\pi d^2}{4} \times f_t = \pi d \times \frac{l}{2} \times f_a$$

$$\frac{1}{d} = \frac{f_t}{2f_a}$$

Figura 1. Disposición idealizada fibra-fisura

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas de algunos tipos de fibra

Tipo de fibra	Densidad relativa	Diámetro (microns)	Longitud (mm)	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Deformación na rotura (%)	Compatibilidad con la pasta de cemento (b)
Acero	7,86	100 – 600	10 – 60	200	700 - 2000	3 - 5	Buena
Amianto	2,55	0,02 - 30	5 – 40	164	200-1800	2 - 3	Satisfactoria
Vidrio (E-glass)	2,70	12,5	10 – 50	70	600 - 2500	3,6	Pobre
Poliéster (b)	1,34 – 1,39	20 - 25	20 – 30	< 17	800 - 1300	8 - 15	Variable
Polipropileno (fibrilada) (b)	0,91	500 - 400	20 – 75	< 8	400	8	Buena
Polipropileno (micro-fibra)	0,91	18 - 32	6 – 24	4	450	80	Buena
Nylon	1,15	21	10 – 20	8	800	25	Buena
Celulosa	1,50	20 - 120	0,5 – 5	10 - 50	300 - 1000	20	Satisfactoria

## 2.2 Propiedades Físicas y Mecánicas de Algunos Tipos de Fibras

En la construcción civil se emplean diversos tipos de fibras: las naturales – como las de celulosa, amianto, yute y sisal – y las artificiales, como las sintéticas, vidrio y acero.

Dentro del universo de las fibras sintéticas, las más conocidas son las de polipropileno, nylon y poliéster.

Como las fibras de polipropileno son más estudiadas y utilizadas que las fibras de nylon y poliéster, las próximas secciones darán énfasis a las fibras de polipropileno. La Tabla 1 presenta las principales propiedades de estos tipos de fibras. Para cada tipo y aplicación de fibra, existe una dosis recomendado que maximiza las propiedades deseadas. Uno de los factores determinantes para que haya un buen desempeño del compuesto con fibras es el número de fibras por metro cúbico de hormigón. El número de fibras necesario para mejorar alguna propiedad del hormigón en estado plástico, como por ejemplo, disminuir la incidencia de fisuras de retracción plástica, o disminuir la exudación y la segregación, es un poco menor que el número de fibras necesario para alterar alguna propiedad del hormigón en estado endurecido, como por ejemplo, la resistencia al impacto o tenacidad. El número de fibras por metro cúbico de hormigón varía mucho, en función del diámetro y la densidad de la fibra. La Figura 2 muestra en un gráfico esta variación, en que fue calculado el número de fibras por kilogramo, considerándolas con 10 mm de longitud. Se puede ver claramente que cuanto menor es la densidad de la fibra y su diámetro, mayor será el número de fibras por unidad de masa. Por otro lado, fibras con mayor densidad y diámetro presentan una frecuencia de fibras considerablemente menor.

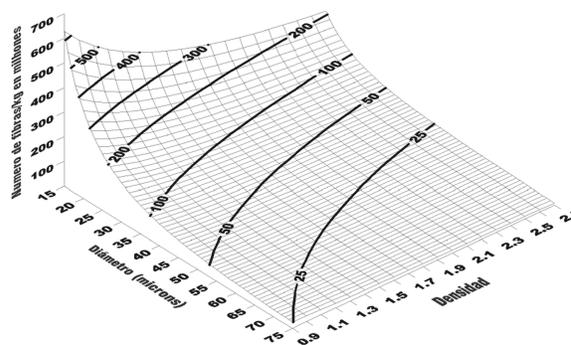


Figura 2. Relación densidad x diámetro x número de fibras

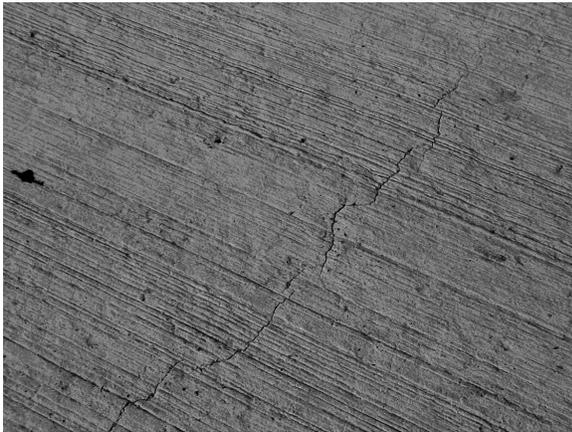
## 3. Las fibras de polipropileno y la fisuración plástica del hormigón

El hormigón reforzado con fibras de polipropileno es un tipo de material compuesto. De acuerdo a lo expuesto en las secciones precedentes, el hormigón y las fibras de polipropileno son materiales que se complementan porque, al ser combinados, forman un material más completo y versátil. Se busca en esta sección, justificar el efecto de las fibras de polipropileno en la disminución de la formación de fisuras de retracción plástica en el hormigón y explicar el mecanismo por el cual este beneficio puede ser alcanzado.

### 3.1 La Retracción del Hormigón

Luego de la colocación, el hormigón sufrirá variaciones volumétricas debido a los cambios térmicos e hidrométricos en su estructura a lo largo de su vida útil y esas variaciones serán más intensas en los primeros meses de vida de la obra.

*En el caso de pisos de hormigón, importan más las variaciones conocidas como retracción hidráulica, que en verdad ocurren en dos fases diferentes del hormigón: una, cuando él está endurecido o en proceso de endurecimiento, que es más conocida y siempre en proyecto se toman precauciones para controlarla, como el proyecto de juntas y los refuerzos tradicionales. La otra fase se denomina retracción inicial o plástica, porque ocurre cuando el hormigón aún está en su estado plástico, período en que el hormigón está más vulnerable para la pérdida de agua. En caso de que ocurra, tendremos la presencia de fisuras típicas, normalmente agrupadas, paralelas entre sí y ortogonales en dirección al viento. La Figura 3 muestra una foto en la que se puede evidenciar una fisura de retracción plástica típica, ocurrida en una placa de pavimento de hormigón.*



*Figura 3. Fisura de retracción plástica típica*

*La Portland Cement Association (PCA, 1995) desarrolló gráficos para estimar el nivel de evaporación en función a la humedad relativa del aire, temperatura del hormigón y velocidad del viento. Según ese trabajo, si la tasa de evaporación alcanza 1 litro/m<sup>2</sup>/hora es aconsejable que se tomen precauciones contra la fisuración por retracción plástica. Para ejemplificar, la condición climática con temperatura del aire a 25° C, humedad relativa del aire de 40 %, temperatura del hormigón de 30° C y velocidad del viento de 15 km/h, es suficiente para alcanzar un nivel de evaporación de 1 litro/m<sup>2</sup>/hora. Las fisuras de retracción plástica son ocasionadas por el cambio de volumen del hormigón en estado plástico. Las retracciones que ocurren en el hormigón antes de su endurecimiento se pueden dividir en cuatro fases (Wang et al., 2001):*

*Primera fase – asentamiento plástico: ocurre antes de la evaporación del agua del hormigón; cuando del lanzamiento, el espacio entre las partículas sólidas está lleno de agua; cuando las partículas sólidas se asientan, existe la tendencia a que el agua, que es el elemento más liviano de la mezcla, suba para su superficie, formando una película. Ese fenómeno es conocido como exudación, y se desarrollará más adelante. Segunda fase – retracción plástica primaria: es la clásica fisura plástica. El agua superficial comienza a evaporarse por razones climáticas -calor, viento, insolación y, cuando la tasa de evaporación excede a la de la exudación, el hormigón comienza a contraerse. Este tipo de retracción ocurre antes y durante el fraguado y es atribuida a las presiones que se desarrollan en los poros capilares del hormigón durante la evaporación.*

*Tercera fase – retracción autógena: en este caso, cuando la hidratación del cemento se desarrolla, los productos que se forman envuelven agregados manteniéndolos unidos; en esta fase, la importancia de la capilaridad disminuye y el asentamiento plástico y la retracción plástica primaria disminuyen también, tomando su lugar la retracción autógena, que cuando el hormigón está aún en estado plástico es pequeña, ocurriendo casi totalmente después el fraguado del mismo. En el pasado, esa parte de retracción era prácticamente rechazada, pero hoy, principalmente con la utilización de bajas relaciones de agua/cemento, la retracción autógena ocupó un lugar importante.*

*Cuarta fase – retracción plástica secundaria: ocurre durante el inicio del endurecimiento del hormigón. En cuanto el hormigón comience a ganar resistencia, la retracción plástica tenderá a desaparecer.*

*Las combinaciones más comunes de ocurrencia de la retracción plástica son las tres primeras fases: asentamiento plástico, retracción por exudación y la autógena. Siempre que hay restricciones en esas variaciones volumétricas, tanto internas como externas, se desarrollan tensiones de tracción con probabilidad de formaciones de fisuras. En los últimos años se ha observado un aumento significativo en las patologías asociadas a la retracción plástica del hormigón, que pueden estar ligadas a relaciones agua/cemento más bajas y, a la utilización de cementos de finuras más elevada, además del empleo de otros materiales cementicios adicionados a él, como la escoria de alto horno, puzolanas, filler calcáreo, que son generalmente muy finos; se sabe que esas condiciones incrementan la retracción del hormigón (Kejin et al., 2001 e Neville, 1997).*

*Ese aumento en la retracción plástica generalmente está asociado a tres factores: bajas tasas de exudación, elevada retracción autógena y elevadas presiones capilares provenientes de altas finuras de los materiales cementicios. Hace algún tiempo, se imaginaba que las fisuras de retracción plástica eran inofensivas, ya que, presentaban una pequeña profundidad, sin que haya progreso con el pavimento en utilización. Eso seguramente era real cuando las tensiones de utilización – aquellas provenientes de las cargas – eran pequeñas, debido principalmente a las elevadas espesores.*

*Hoy en día, además de las expresivas retracciones de los concretos modernos los pisos son, en su totalidad, utilizados con refuerzos, con mallas electrosoldadas o fibras de acero, que llevaron a una reducción en la espesura con el incremento de las tensiones actuantes. Como consecuencia, hoy se puede observar un gran número de fisuras, cuyo aspecto sólo puede ser explicado por la evolución de las antiguas e inofensivas fisuras plásticas.*

### *3.2 Mecanismo de Actuación de la Fibra de Polipropileno*

*La utilización de fibras de polipropileno como auxiliares en el combate o reducción de las fisuras de retracción plástica han sido ampliamente difundidos por diversos investigadores, aunque el mecanismo por el cual eso sucede no se conozca bien. Hay vertientes que defienden que los complejos mecanismos de la presión de los poros capilares, desempeñan un papel importante en la reducción de la retracción y, consecuentemente, de las fisuras, mientras otros prefieren atribuirle a las fibras la reducción de los efectos dañinos de la retracción (Padron et al., 1990). Probablemente y, por los resultados de investigaciones experimentales, ambas teorías son válidas, siendo que el tema de la reducción de la porosidad capilar afectará básicamente la retracción por exudación, así como la fibra, como material de refuerzo, debe actuar en los niveles subsecuentes, mientras el módulo de elasticidad de la fibra de polipropileno es superior al de la pasta de cemento.*

*Por ejemplo, Padron y Zollo (Padron et al., 1990), investigando hormigones y morteros con refuerzos de fibras de polipropileno, observaron que, en condiciones severas, la cantidad de fisuras fue entre 18 % y 23 % en relación al hormigón simple, mientras que la retracción total de las probetas varió de 52 % a 100 % en relación al patrón de hormigón simple. Curiosamente la muestra con fibras que presentó la misma retracción del patrón fue la que exhibió menor cantidad de fisuras, 18 % de la observada en el hormigón simple; vemos que esos*

*datos indican que los dos factores estuvieron presentes. El principal mecanismo de actuación de las fibras puede ser modelado como:*

- a) El hormigón simple, después del lanzamiento, es fluido. De a poco el hormigón se endurece y con eso pierde su fluidez y, consecuentemente, su capacidad de deformación;*
- b) Por otro lado, con la evaporación del agua de exudación, la retracción aumenta hasta que, en determinado momento, el nivel de deformación de retracción es mayor que la capacidad de hormigón para absorber estas deformaciones y, así aparecen las fisuras;*
- c) El hormigón con fibras de polipropileno de elevado nivel de deformación y de bajo módulo, es más deformable en las primeras edades. Las fibras transfieren su natural capacidad de deformación para el hormigón. La deformación de retracción puede ser la misma, sin embargo, no mayor que la capacidad del hormigón en absorberlas. Así, las fisuras son inhibidas, o su frecuencia y tamaños serán reducidos. La Figura 4 ilustra de manera cualitativa la explicación anterior.*

*En la investigación citada (Padron et al., 1990), los autores efectuaron las medidas luego de 16 horas de exposición en túnel de viento, siendo que las primeras fisuras fueron observadas cerca de dos horas después del moldeado. Una de las dificultades observadas en diversas investigaciones es el tipo de ensayo que se empleó. Los ensayos normalizados, como el ASTM E157, no son adecuados a determinación de la retracción en las primeras edades y, en verdad, cada investigador termina adoptando un procedimiento diferente. Por lo tanto, los ensayos tienen un valor comparativo, pero no son, en la mayoría de los casos, intercambiables. Esos ensayos tienen en común la utilización de cámaras de viento, humedad y temperatura controladas, y la muestra es sometida a algún tipo de restricción, como un o-ring, adherencia en la base simulando un overlay adherido u otras restricciones al movimiento.*

*La eficiencia de las fibras depende de diversos factores como, su relación l/d, longitud, módulo de elasticidad, dosificación y hasta las características del propio hormigón: por ejemplo, matrices más ricas (mayor relación cemento/arena) responden más eficientemente a la adición de las fibras y, el hormigón liviano presenta mayor potencial de reducción de fisuras que el convencional, cuando se utilizan dosis y tipos idénticos de fibras (Balaguru, 1994).*

Balaguru desarrolló un extenso programa de ensayos con diversos tipos de fibras sintéticas y también de acero y, sus principales conclusiones pueden resumirse en:

- La adición de fibras sintéticas, en dosis tan bajas como  $0,45 \text{ kg/m}^3$ , promueve alguna reducción en la cantidad de fisuras;
- Reducciones más acentuadas se logran con dosificaciones entre  $0,45 \text{ kg/m}^3$  y  $0,90 \text{ kg/m}^3$ ;
- Para fibras largas, aquellas que presentan menor módulo de elasticidad son las que propician un mejor desempeño;
- Para dosificaciones de  $0,90 \text{ kg/m}^3$ , prácticamente no se observan, en los experimentos, fisuras de retracción plástica;
- La cantidad de fibras - número de fibras por kilogramo - es un parámetro importante de dosificación;
- Fibras largas presentan mejor desempeño en morteros más pobres y concretos, mientras que las fibras cortas presentan mejores resultados en las mezclas más ricas;
- Las fibras sintéticas reducen la cantidad de fisuras y el tamaño de las fisuras.

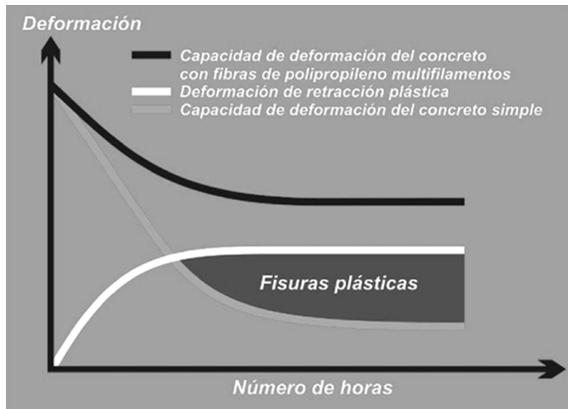


Figura 4. Gráfico de representación del mecanismo de combate a las fisuras de retracción plástica con la incorporación de fibras de polipropileno.

Por lo tanto, vemos que la dosificación de concretos con fibras sintéticas no puede ser generalizada para cualquier tipo de fibra, pero, sí como resultado de análisis experimental que conducirá al mejor resultado final.

Aunque las fibras se estén empleando en pavimentación, desde 1978, aún hoy observamos algunas fallas que podrían mejorar la comprensión de su forma de acción y contribuir para un mejor desempeño del

hormigón, pero la dosificación todavía es hecha con cierto grado de empirismo, lo que muchas veces puede ocasionar dudas al usuario.

#### 4. La influencia de las fibras de polipropileno en la exudación del hormigón

La exudación es un problema que ocurre con el hormigón en las primeras edades pero puede comprometer su durabilidad a largo plazo. Esta sección presenta las principales consideraciones sobre la exudación y su efecto nocivo en las propiedades del hormigón, que se notan en las fisuras de asentamiento y la pérdida de la resistencia al desgaste.

##### 4.1 La Exudación del Hormigón

El hormigón está constituido por materiales de diferentes masas específicas, que pueden variar aproximadamente de  $1000 \text{ kg/m}^3$ , es el caso del agua, alcanzando valores más expresivos para los agregados, que giran en torno a  $2700 \text{ kg/m}^3$ , mientras que, para el cemento, oscilan entre  $3000 \text{ kg/m}^3$  y  $3100 \text{ kg/m}^3$ . Cuando la mezcla está en estado fresco, el hormigón pasa a tener un comportamiento de fluido viscoso, sólo que uno de sus componentes, el agua, presenta una viscosidad mucho más baja que la mezcla, además de ser más liviana, ocurriendo naturalmente la tendencia de aflorar en la superficie.

Se define como exudación al fenómeno de separación de parte del agua del hormigón, que aflora en la superficie de acabamiento. Con ella, hay un aumento en relación a/c en la región de la superficie de la placa, perjudicando la integridad superficial del hormigón. El período en que la exudación ocurre es suficientemente claro, siendo caracterizado por la presencia de una película de agua que confiere un brillo superficial, iniciándose después las operaciones de terminación y prolongándose hasta el inicio de fraguado del hormigón, cuando el gran aumento de la superficie específica, ocasionado por el crecimiento de los cristales de la hidratación del cemento, disminuye la permeabilidad de la pasta de cemento.

Las causas de la exudación están estrechamente ligadas a las dosis de finos del hormigón - formados por el cemento y una fracción fina de los agregados-, al dosis de agua de la mezcla y también de los aditivos, habiendo otros que pueden incrementarlas.

Otros factores que aumentan la exudación son las operaciones de vibrado y acabamiento excesivas del hormigón, que están relacionadas con su trabajabilidad. En la dosificación experimental del hormigón, debe analizarse cuidadosamente la exudación, a fin de minimizarla y reducir sus efectos nocivos en el hormigón.

#### 4.2 Fisuras de Asentamiento

Son bastante comunes en vigas y losas de espesura elevada y que presentan armaduras negativas elevadas y posicionadas en el lado superior de la pieza, como muestra la Figura 5.

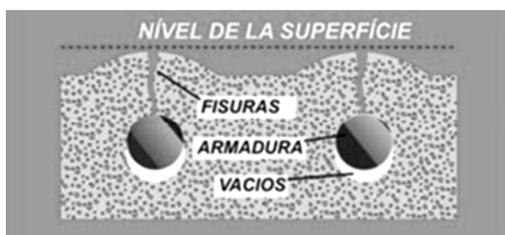


Figura 5. Fisuras de asentamiento

El mecanismo de formación de esas fisuras que ocurren antes de la evaporación del agua del hormigón puede explicarse como:

- a) Cuando del lanzamiento del hormigón, el espacio entre las partículas sólidas está lleno de agua; en cuanto esas partículas sólidas se asientan, existe la tendencia de que el agua suba para la superficie formando una película como fue descrito anteriormente, que es la exudación;
- b) En este nivel, el cambio de volumen del hormigón es muy pequeño. La retracción por asentamiento plástico ocurre cuando la exudación es elevada y el cubrimiento de la armadura es reducido;
- c) La combinación de esos factores provoca un elevado grado de asentamiento y, si él es restringido por la armadura, a punto de generar tensiones internas de tracción, ciertamente aparecerán fisuras originadas del asentamiento plástico.
- d) Debe notarse que estas fisuras son independientes de la evaporación y del secado de la superficie.
- e) Además de la espesura del recubrimiento, cuanto mayor sea el asentamiento del hormigón y el diámetro de la malla, mayor será la posibilidad de que aparezcan fisuras de asentamiento plástico (Suprenant, 1990).

#### 4.3 Resistencia al Desgaste

La resistencia al desgaste del hormigón está estrechamente relacionada a la resistencia a compresión del hormigón, pero también – y muchas veces más importante – a las alteraciones que ocurren en el hormigón aún en estado fresco.

Con la resistencia mecánica está estrechamente ligada la relación  $a/c$  de la mezcla (Rodrigues, 1995), es fácil comprender que con la exudación existe la tendencia de un aumento gradual de la dosis de agua en la superficie, formando una nata porosa superficial de baja resistencia mecánica.

Situación más crítica es cuando la película formada en la superficie es incorporada al hormigón por el acabado efectuado fuera de hora, formando una superficie frágil y propensa al desgaste, proporcionando así el surgimiento de polvo y erosión acentuada en el piso, muy común en garajes de edificios residenciales y comerciales.

#### 4.4 Exudación y las Fibras de Polipropileno

Las fibras de polipropileno disminuyen la incidencia de fisuras de asentamiento y aumentan la resistencia a la abrasión por el control de exudación.

El comportamiento de las fibras de polipropileno en el control de la exudación – sea para reducirla o disminuir la velocidad en que ella ocurre – puede explicarse como la capacidad que tiene la fibra de retener el agua en el interior del hormigón. Eso se debe a dos mecanismos:

- a) El polipropileno no absorbe agua, es un polímero hidrofóbico. Sin embargo, los millones de filamentos incorporados al hormigón se comportan como barreras contra el ascenso del agua, como muestra la Figura 6. De esa manera las fibras retienen el agua en el interior de la pieza de hormigón por un período mayor de tiempo, promoviendo mejoras en las condiciones de hidratación del cemento y disminuyendo la exudación;
- b) Las fibras de polipropileno de pequeño diámetro (micro-fibras), presentan elevada área superficial específica y baja densidad. Aunque no absorban el agua, las fibras, por adsorción, mantienen el agua junto a ellas, disminuyendo así la cantidad de agua libre a ser exudada.

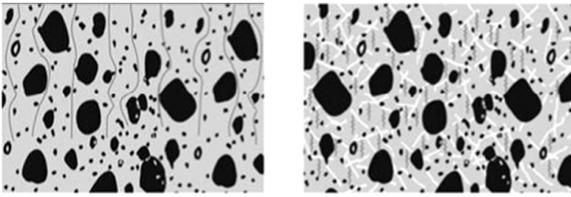


Figura 6. Mecanismo de acción de las fibras de polipropileno en el control de la exudación.

Aunque los actuales ensayos que procuran medir la exudación no puedan evaluar de modo adecuado la influencia de las fibras, diversos estudios internacionales - generalmente utilizando túnel de viento - comprueban la expresiva contribución de la fibra en el control de la exudación. Los efectos de las fibras de polipropileno en el control de exudación pueden ser mejor vistos en hormigones de pisos y losas.

Así, si la exudación es una de las causas de la formación de fisuras de asentamiento y de la disminución de la resistencia al desgaste, queda más fácil comprender porqué las fibras mejoran esas propiedades del hormigón. Complementariamente, por la formación de un micro refuerzo tridimensional que "suspende" o "sustenta" los agregados, se le puede atribuir a las fibras la disminución de la segregación en el hormigón. Con eso se tiene una mezcla más homogénea y consecuentemente un hormigón con las propiedades estructurales más uniformes (Rodríguez y Montardo, 2002).

## 5. Conclusiones

- 1) Los conceptos teóricos de los materiales compuestos y, en particular, de los materiales compuestos con fibras son herramientas sumamente importantes para la comprensión de los fenómenos envolviendo las fibras de polipropileno y hormigones;
- 2) Las fibras de polipropileno por tener bajo módulo de elasticidad y elevado grado de alargamiento consiguen afectar algunas propiedades de hormigones en el estado fresco. Fibras de alto módulo como las fibras de acero y las fibras de vidrio no tienen esta capacidad porque en el estado fresco no hay agarre hormigón-fibra suficiente para que las propiedades mecánicas de las fibras de alto módulo sean movilizadas.
- 3) Según la revisión hecha en la literatura académica internacional las fibras sintéticas reducen la ocurrencia de fisuras por retracción plástica y disminuyen la exudación del hormigón. Entretanto las fibras deben respetar una dosis mínima. Asimismo los trabajos

apuntaron que diferentes propiedades físicas de las fibras como diámetro, longitud, la relación  $l/d$  y densidad pueden ocasionar diferentes desempeños.

- 4) Es sumamente importante considerar que la utilización de las fibras sintéticas debe respetar las condiciones de mezcla y trabajabilidad del hormigón para cada aplicación. Muchas veces la dosis está limitada a las condiciones de utilización, equipaje y mezclador disponible en el sitio de construcción.
- 5) Otro aspecto muy importante es evaluar la facilidad con que las fibras sintéticas se mezclan en el hormigón. Fibras realmente desarrolladas para hormigones deben tener algunos aditivos especiales en su superficie para que tengan mayor facilidad de mezcla. Esta es una observación que no es normalmente comentada en los trabajos académicos porque generalmente las mezclas son pequeñas y no hay preocupación con el tiempo de mezcla. Todavía es algo muy importante en la obra.

## 6. Referencias Bibliográficas

- American Concrete Institute. ACI 302. (1997), *Guide for concrete floor and slab construction*. Michigan.
- American Concrete Institute (2001), *Plastic shrinkage cracking in concrete materials - Influence of fly ash and fibers*. Journal of Materials. Michigan.
- Balaguru, P. (1994), *Contribution of fibers to crack reduction of cement composites during the initial and final setting period*. Journal of Materials. American Concrete Institute.
- BUDINSKI, K. G. (1996), *Engineering Materials; properties and selection*. New Jersey: Prentice Hall International, 5ed, 653 p.
- HANNANT, L. (1994), *Fibre-reinforced cements and concretes*. In: J. M. ILLSTON. *Construction Materials; their nature and behaviour*. 2 ed. London: J. M. Illston/E & FN SPON, p. 359-403.
- ILLSTON, J. M.. (1994), *Construction Materials; their nature and behaviour*. London: E & FN Spon, 2 ed., 518 p.
- JOHNSTON, C. D. (1994), *Fibre-reinforced cement and concrete*. In: V. M. MALHORTA. *Advances in concrete technology*. 2 ed. Ottawa: V. M. Malhorta, P. 603673.
- Neville, Adam M. (1997), *Propriedades do Concreto*. Ed. Pine 2. São Paulo.
- Padron, Isabel and Zollo, Ronald F. (1990), *Effect of synthetic fibers on volume stability and cracking of Portland Cement and Mortar*. Journal of Materials. American Concrete Institute.

Rodrigues, Públio P. F. (1995), *Parâmetros de dosagem do concreto. Associação Brasileira de Cimento Portland, ET - 67 2a edição. São Paulo/Brasil.*

Rodrigues, Públio P. F. e Montardo, Júlio P. (2002), *A influência da Adição de Fibras de Polipropileno nas Propriedades dos Concretos para Pisos e Pavimentos. 44º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, Belo Horizonte/Brasil.*

SUPRENANT, B. A. ; MALISCH, W.R. (1999), *The fiber factor. The Aberdeen Group Hanley -Wood, Inc., Concrete Construction.*

TAYLOR, G.D. (1994), *Materials in Construction. London: Longman Scientific & Technical, 2 ed, 284p.*

