

Fisuración por retracción plástica: Causas, consecuencias y paliativos

Roberto J. Torrent, Ing. Civil, PhD, Materials Advanced Services Ltd.: torrent.concrete@gmail.com

Morfología del fenómeno

La fisuración por retracción plástica (FRP) no debe confundirse con las fisuras comunes debidas a la contracción por secado que aparecen luego de un tiempo considerable.

Las fisuras por retracción plástica **se forman en las primeras 2 a 5 horas** de haber sido colocado el hormigón, aunque a menudo no se las nota hasta el día siguiente. Otra diferencia es que no pueden ser controladas mediante armaduras de acero.

La FRP es uno de los problemas más frecuentes en los pavimentos de hormigón o de cualquier superficie expuesta a evaporación (pisos y losas de hormigón armado, hormigón proyectado, etc.). Es un problema endémico que se encuentra prácticamente en todos los países del mundo.

La FRP es un fenómeno esencialmente físico, similar al que experimentan los suelos arcillosos al secarse (Fig. 1).



Fig.1 – Suelo arcilloso agrietado

En el hormigón, el fenómeno se manifiesta de dos maneras típicas (ver esquema en Fig. 2):

- Fisuras diagonales espaciadas de 30 cm a 1 m. Más comunes en losas poco o no armadas
- Fisuración extensiva en forma de mapa, usualmente para losas de hormigón armado

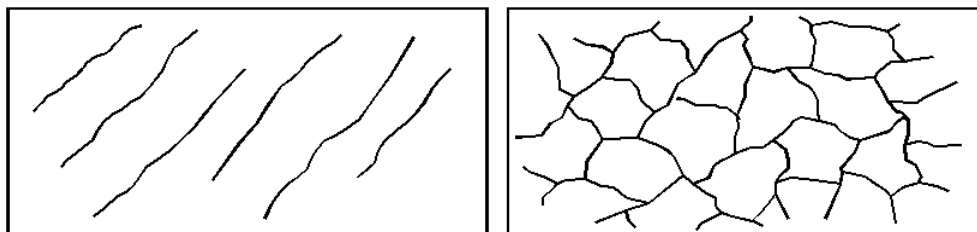
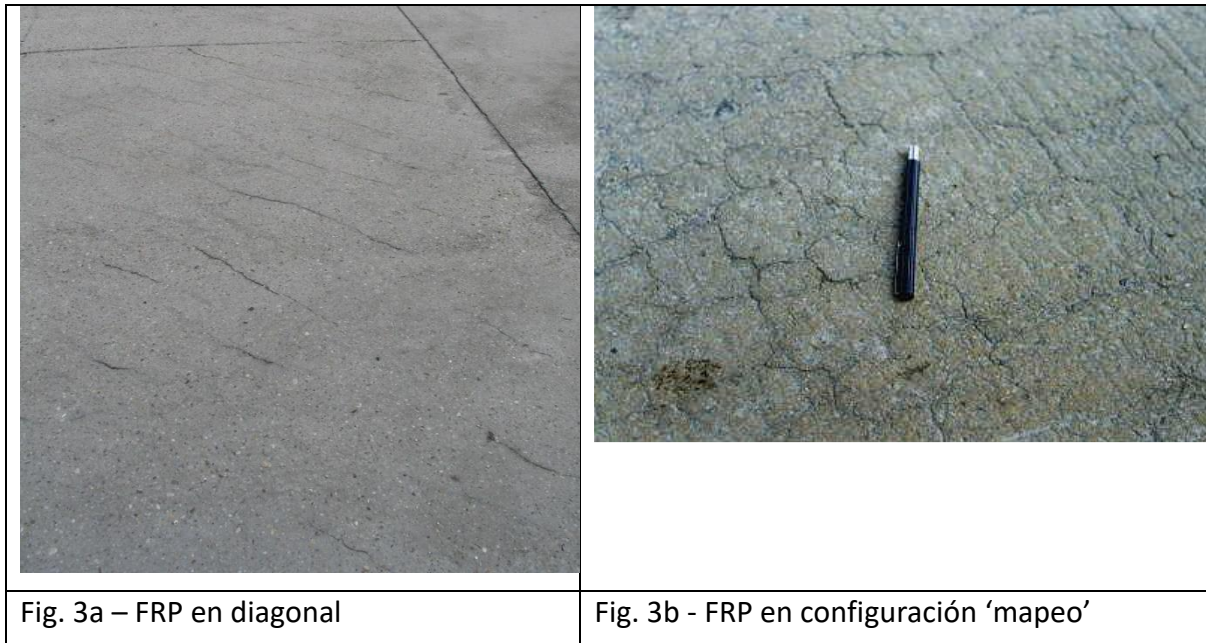


Fig. 2 – Tipos de FRP

Un aspecto notable de estas fisuras es que normalmente no se extienden hasta los bordes de las losas, pues allí no hay restricciones a la retracción. Además, pueden llegar a profundidades de 10 cm o incluso a atravesar el entero espesor de la losa, siendo relativamente anchas en la superficie (1 a 2 mm), angostándose hacia el interior.

La Fig. 3a muestra un ejemplo típico de FRP en diagonal, captado por el autor en un pavimento urbano en Hungría, en tanto que la Fig. 3b muestra el de una configuración de tipo 'mapeo' de un pavimento en una autopista de Córdoba, Argentina (no abierto al tránsito), captado

durante una investigación conducida por el ICPA [Fernández Luco & Torrent, 2003], que se trata en la sección 'Consecuencias de la FRP'. La Fig. 4 muestra la profundidad de las fisuras de este último pavimento, en zonas con tránsito medio (sobre y entre fisuras) e intenso (testigos de $\varnothing=150$ mm).



Causas de la fisuración por retracción plástica

El factor más importante que determina la FRP es el desecamiento rápido de la superficie del hormigón, que sucede cuando la tasa de evaporación de agua excede a la de exudación, tal como se muestra esquemáticamente en la Fig. 5.

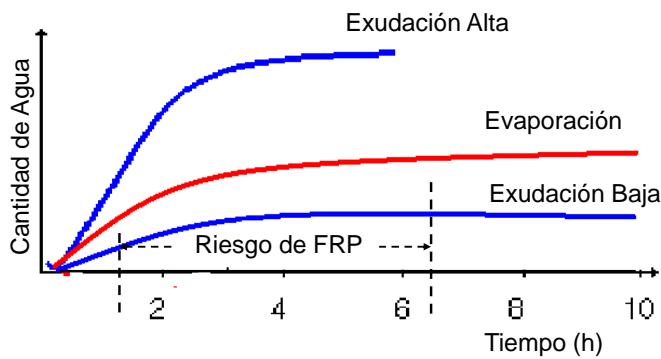


Fig. 5 - Condiciones para FRP

Niveles muy altos de exudación son perjudiciales para la calidad del hormigón [Giaccio & Giovambattista, 1986] pero, para la FRP, resultan inconvenientes los niveles bajos, típicos de hormigones de alta prestación, con altos contenidos de ligantes y otros finos.

La tasa de evaporación depende de varios factores, a saber: la temperatura del hormigón y la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire que lo rodea. Se considera que cuando la combinación de dichos factores conduce a una tasa de evaporación que exceda $1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ el hormigón corre serio riesgo de experimentar problemas de fisuración por retracción plástica y deben adoptarse medidas preventivas.

Para facilitar la estimación de la tasa de evaporación existe un nomograma clásico (Fig. 6), que se encuentra en innumerables publicaciones técnicas como por ejemplo en [ACI 305R, 2020; ACI 308.1, 2011] y que incluso ha sido incorporado en carácter orientativo en el Reglamento Canadiense.

Una buena aproximación a los valores del nomograma puede obtenerse empleando la siguiente ecuación [Uno, 1998]:

$$E = 5 \cdot [(T_h + 18)^{2,5} - 0,01 \cdot HR \cdot (T_a + 18)^{2,5}] \cdot (V_v + 4) \cdot 10^{-6}$$

donde:

- E = Tasa de evaporación ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$)
- T_h = Temperatura del agua en la superficie del hormigón ($^{\circ}\text{C}$)
- T_a = Temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)
- HR = Humedad relativa ambiente (%)
- V_v = Velocidad del viento (km/h)

De todas las variables necesarias para el uso de la fórmula precedente, la temperatura del aire y del hormigón, así como la humedad relativa del aire son relativamente fáciles de medir. Más difícil es en cambio medir la velocidad del viento, pues no es común contar con un anemómetro en una obra convencional. En el Apéndice A se dan algunos indicios que permiten estimarla.

Existen dispositivos sencillos que permiten medir simultáneamente todas las variables e indican la tasa de evaporación E estimada, como el Kestrel 4300 (Fig. 7).

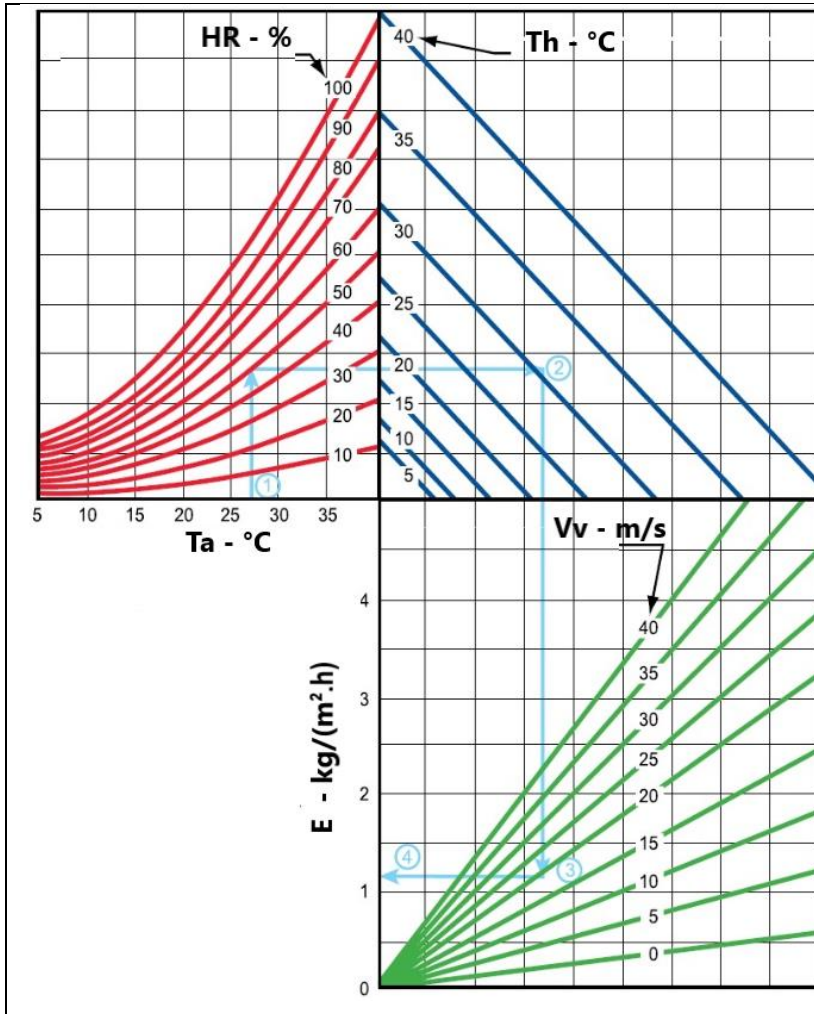


Fig. 6 – Nomograma para estimar la tasa de evaporación de la superficie del hormigón fresco (E), en función de la temperatura del aire (Ta), de la humedad relativa ambiente (HR), de la temperatura del hormigón (Th) y de la velocidad del viento (Vv).



Fig. 7 – Medidor de E

Dijimos que la retracción plástica ocurre cuando la tasa de evaporación supera a la de exudación de agua; como ésta depende de datos tecnológicos de la mezcla, no es posible fijar un límite estricto a la tasa crítica de evaporación. De allí que el valor dado más arriba de 1 kg/(m².h) es sólo orientativo, pues la fisuración plástica puede ocurrir aún con tasas de evaporación de la mitad de ese valor [ACI 305R, 2020; Anon, 1995].

Hay evidencia de que la FRP es causada por fuerzas de tensión superficial en los meniscos que se crean al evaporarse el agua de los capilares (Fig. 8), que pueden exceder la tenue resistencia a tracción del hormigón joven. Estas fuerzas generan una depresión ΔP en los poros del hormigón debajo de la superficie, que puede medirse usando dispositivos como el mostrado en la Fig. 9 [Qian Tian *et al.*, 2012].

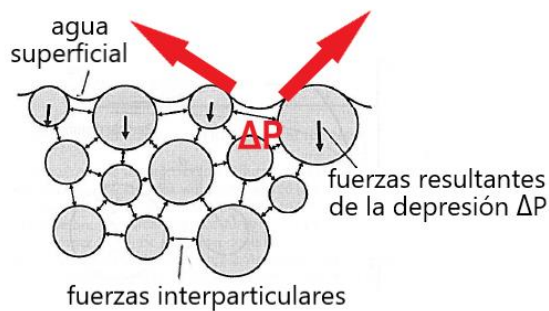


Fig. 8 – Esquema de FRP, adaptado de [Slowik *et al.*, 2009]

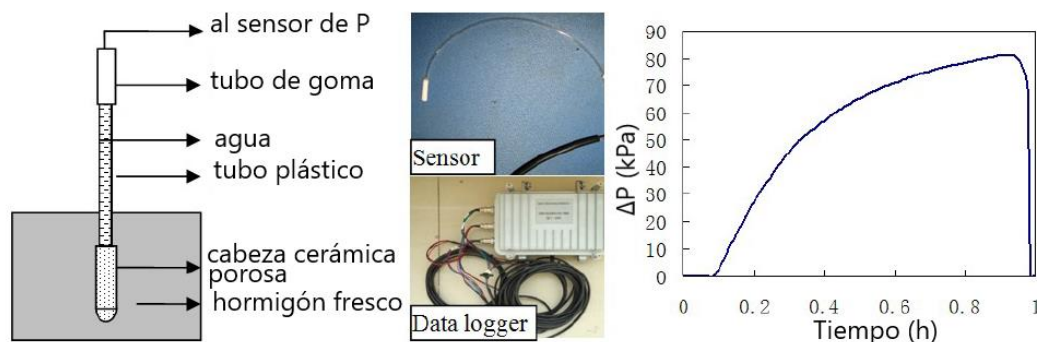


Fig. 9 – Medición de ΔP

Verdaderamente el problema de la FRP es sumamente complejo pues a edades tempranas el hormigón está experimentando cambios fundamentales en su comportamiento y propiedades. Por ejemplo, la Fig. 10 muestra la evolución de su extensibilidad con la edad [Byfors, 1980].

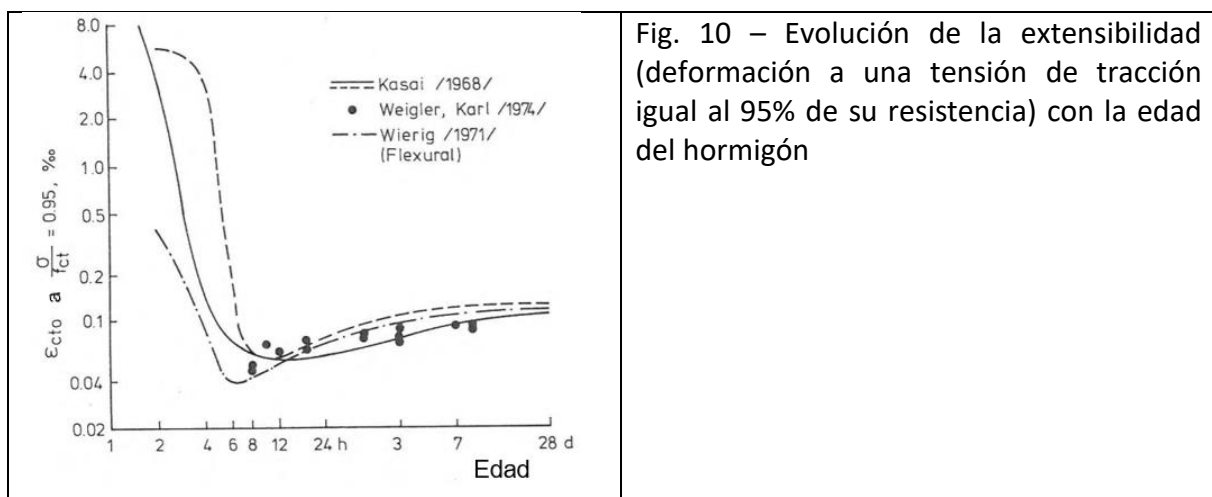


Fig. 10 – Evolución de la extensibilidad (deformación a una tensión de tracción igual al 95% de su resistencia) con la edad del hormigón

Lo que muestra la Fig. 10 es que, a partir de su estado fresco, el hormigón experimenta un proceso de rigidización paulatina y una pérdida de capacidad de deformación a tracción. Así, el hormigón joven pasa por un período crítico de muy baja extensibilidad (acompañada por una muy baja resistencia a tracción), que sucede típicamente entre las 4 y 12 horas de edad, dependiendo de las características del hormigón. Es en ese período crítico cuando se puede producir la fisuración por retracción plástica si se alcanzan entonces elevadas tasas de evaporación.

Investigaciones realizadas empleando un túnel de viento [Kral & Gebauer, 1980], han demostrado que la fisuración sucede sólo si la fuerte evaporación se registra en ese período crítico. La Fig. 11 muestra algunos resultados de esas investigaciones; se ve que en los ciclos d), f) y g), en los que el viento no actuó en el período crítico, no se registraron fisuras en el hormigón.

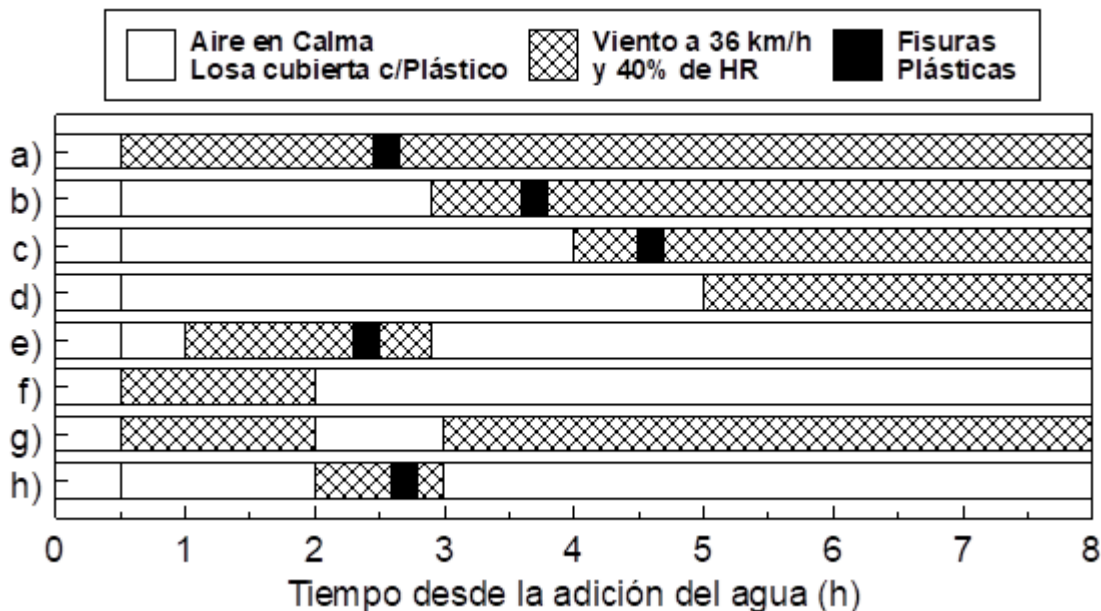


Fig. 11 – Resultados de FRP en experimentos efectuados en un túnel de viento

Consecuencias de la fisuración por retracción plástica

En el caso de los pavimentos, estas fisuras constituyen una debilidad de origen, que afean su aspecto y que pueden afectar seriamente su vida en servicio, por lo que deben extremarse las precauciones para evitarlas. La Fig. 12 muestra el aspecto del mismo pavimento mostrado en la Fig. 3, pero ahora en zonas abiertas al tráfico, pudiéndose apreciar como el deterioro en forma de fisuras se ha ido alineando en la dirección de éste. Tanto la apertura como la profundidad (ver Fig. 4) de las fisuras aumentaron por la acción mecánica del tránsito vehicular.



Fig. 12 – Fisuras orientadas al tránsito

En el caso de pisos y losas de hormigón armado, las fisuras por retracción plástica permiten el ingreso de sustancias agresivas hacia el interior aumentando el riesgo de deterioro. En [Fernández Luco & Torrent, 2003] se describe un ejemplo de esta situación, para el pavimento

mostrado en las Figs. 3, 4 y 12, cuyo deterioro había sido erróneamente atribuido a la reacción álcali-sílice (RAS). En realidad, se demostró que el origen del problema fue la FRP, que abrió el camino para el ingreso de agua de lluvia. En los períodos secos, de evaporación del agua, por el llamado “efecto mecha”, se fueron acumulando álcalis en la zona cercana a la punta de la fisura, alcanzando una concentración crítica que generó – exclusivamente en esa zona – una RAS poco nociva. Esto fue demostrado a través de microscopía óptica de láminas delgadas y con la prueba de acetato de uranilo. La Fig. 13 muestra claramente que las fisuras preexistían al corte de juntas (una fisura no puede atravesar una junta), compatibles con la FRP y no con el daño por RAS.



Fig. 13 – Fisura “pasante” la junta

Un caso especial son las estructuras en ambiente marino, donde el rápido ingreso de cloruros a través de las fisuras reducen la vida útil por la subsiguiente corrosión del acero.

Paliativos

Si nos atenemos al esquema de la Fig. 5, se puede evitar la FRP logrando un hormigón de alta exudación y/o reduciendo la tasa de evaporación.

Aumento de la Exudación: esto es más fácil decirlo que lograrlo y no hay soluciones mágicas. Ante todo, se recuerda que la exudación del hormigón fresco puede medirse de una manera bastante sencilla (IRAM 1604 o ASTM C232), por lo que se puede trabajar sobre el diseño de las mezclas, procurando aumentarla. Una forma es tratando de reducir la cantidad de partículas finas, modificando el tipo de cemento (menor finura de molienda). Se sabe que algunos aditivos reductores de agua facilitan la exudación, pero el limitado conocimiento del Autor no le permite dar recomendaciones más precisas (tal vez algún lector pueda abundar en este tema); se recomienda consultar a los proveedores de aditivos.

Reducción de la Tasa de Evaporación: esto puede lograrse mediante:

- a) Curado húmedo: nebulizar agua sobre la superficie. Un enfoque algo sofisticado es instalar el sistema de nebulización, pero activarlo automáticamente cuando sensores, como el mostrado en la Fig. 9, detectan una depresión capilar crítica de sólo 2 kPa (ver la escala del gráfico) [Qian Tian *et al.*, 2011].

- b) Cubrir las losas con láminas de polietileno inmediatamente después de haber colocado el hormigón (es engorroso, entorpece y puede afectar el trabajo de acabado superficial)
- c) Instalar barreras protectoras contra el viento
- d) Humedecer encofrados, base y armaduras
- e) Evitar hormigonar en horas críticas (calor, sequedad, viento)
- f) Reducir la temperatura de entrega del hormigón
- g) Compuestos capaces de formar membranas de curado: el uso de las membranas de curado convencionales no es recomendado para combatir este problema [Turton, 1978], pues para aplicarlas debe esperarse a que desaparezca la humedad de la superficie de las losas, lo que ya es demasiado tarde para evitar este tipo de fisuras como se discutió antes. La solución más recomendable es el empleo de compuestos de curado especiales, a base de resinas vehiculizadas en solventes, que pueden aplicarse cuando la superficie del hormigón está aún húmeda. Si bien su costo es superior al de las membranas convencionales, se las debería utilizar si las condiciones ambientales señalan tasas de evaporación cercanas o superiores a $1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. El personal involucrado debe estar protegido contra la inhalación de estos productos, que tampoco son muy amigables para el ambiente. La Fig. 14 muestra un ejemplo en la ciudad de Barranquilla, Colombia, conocida por su clima extremadamente caluroso. La ingeniera, munida del instrumento mostrado en la Fig. 7, controla las condiciones de evaporación e instruye al operador sobre la aplicación correcta y oportuna del líquido de curado. Cabe señalar que este servicio es ofrecido por la empresa productora de hormigón elaborado.



Fig. 14 – Aplicación controlada de compuesto de curado en un pavimento en Barranquilla

Incorporación de fibras sintéticas: es una solución, no tan eficaz, pero que colabora en el control de la fisuración plástica. Si bien no releva totalmente al constructor de proteger al hormigón (se recomienda siempre hacerlo), lo ayuda a combatir la fisuración plástica (aunque no la elimina completamente) cuando dicha protección es insuficiente o simplemente inexistente. Existe un ensayo [ASTM C1579, 2021] que permite evaluar el efecto de las fibras sobre la FRP.

Modificar la cinética de hidratación: consiste en modificar el comportamiento del hormigón joven para evitar que las condiciones críticas (Figs. 10 y 11) coincidan con las de mayor evaporación. Esto puede lograrse cambiando el tipo de cemento o con aditivos apropiados. La aptitud de estas medidas puede evaluarse comparativamente con el ensayo ASTM C1579, aunque no se incorporen fibras.

Referencias

ACI 305R (2020). "Hot Weather Concreting".

ACI 308.11 (2011). "Standard Practice for Curing Concrete".

ASTM C1579 (2021). "Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert)"

Anon (1995). "Plastic shrinkage cracking prediction", Concrete Construction, April 1995, p.396.

Byfors, J. (1980). "Plain concrete at early ages", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Fo. 3, n 80, 345 p.

Fernández Luco, L. and Torrent, R. (2003). "Diagnosis of a case of harmless alkali-silica reaction in a cracked concrete pavement", 6th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Thessaloniki, Greece, June 1-7, 2003.

Giaccio, G. and Giovambattista, A. (1986). "Bleeding: evaluation of its effect on concrete behavior", Mater. & Struct., v9, n112, 265-271.

Kral, S. and Gebauer, J. (1980). "Shrinkage and cracking of concrete at early ages", Advances in Concrete Slab Technology, Pergamon Press, Oxford, 412-420.

Qian Tian, Yujiang Wang, Jiaping Liu and Changwen Miao (2011). "A closed-loop controlled automatic fogging curing system based on pore water pressure measurement". RILEM Pro079, 124-131.

Slowik, V., Hübner, T., Schmidt, M. and Villmann, B. (2009). "Simulation of capillary shrinkage cracking in cement-like materials". Cem. & Concr. Composites, v31, 461-469.

Qian Tian, Yujiang Wang, Hang Zhang, Jiaping Liu and Changwen Miao (2012). "In-situ monitoring of setting of concrete based on pore water pressure measurement". Microdurability, Amsterdam, The Netherlands, 11-13 April, 8 p.

Turton, C.D. (1978). "Plastic cracking", Concrete, July, 115-116.

Uno, P.J. (1998). "Plastic Shrinkage Cracking and Evaporation Formulas", ACI Materials Journal, v.95, n.4, July-Aug, 365-375.

Apéndice A - Estimación de la Velocidad del Viento

Velocidad del Viento (km/h)	Descripción	Efectos Perceptibles
0 - 1,5	Calma	El humo sube vertical
1,5 - 6	Corriente suave	El humo sube inclinado
6 - 11	Brisa ligera	Las hojas susurran
11 - 20	Brisa suave	Las hojas se mueven
20 - 28	Brisa moderada	El polvo se arremolina; se mueven las ramas pequeñas
28 - 35	Brisa acentuada	Oscilan los arbustos pequeños
35 - 45	Viento fuerte	El viento silba; es difícil utilizar paraguas
45 - 56	Viento muy fuerte	Dificultad para andar