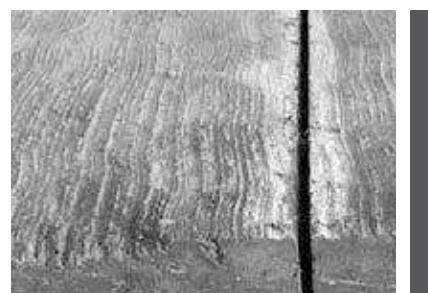


Hormigón con fibras: ¿Entre el hormigón en masa y el armado?



Fibre concrete mixes: in between plain and reinforced concrete?

C. René BRAAM ^(a)

Universidad Técnica de Delft (Países Bajos)

Adrian J. VAN LEEST

Plataforma Tecnológica CROW (Países Bajos)

Steeff B. VAN HARTSKAMP

Provincia de Brabante del Norte (Países Bajos)

George JURRIAANS

ECCRA (Países Bajos)

Corné A. VAN DER STEEN

Technoconsult (Países Bajos)

Marc J.A. STET

Via Aperta (Países Bajos)

RESUMEN

El hormigón con fibras no es algo novedoso en pavimentos. En la década de 1980 el hormigón con fibras se popularizó gracias a que proporcionaba una reducción del espesor del pavimento y a que incrementaba la distancia entre juntas. Por desgracia, las perspectivas no se mantuvieron y el hormigón con fibras desapareció “en silencio” de la escena de las construcciones de pavimentos. Sin embargo, se continuó investigando en la construcción de soleras industriales y se desarrollaron nuevas mezclas de hormigón que contenían nuevos tipos de fibras de acero. Se elaboraron directrices de diseño para armonizar las normas de diseño estructural. El historial de soleras industriales con fibras de acero es sólido.

A lo largo de los años, el nuevo hormigón con fibras ha regresado a los pavimentos. Varios proyectos se han construido con éxito y, a instancias de los creadores de estas mezclas, se constituyó un grupo de trabajo para investigar este tipo de hormigón en la Plataforma Tecnológica Holandesa para el Transporte, las Infraestructuras y los Espacios Públicos (CROW). Un equipo de productores de fibra de acero, de expertos en hormigón, de investigadores y de contratistas tuvo asignada la tarea de valorar el comportamiento de los pavimentos recientemente construidos.

El estudio puede conducir a recomendaciones prácticas para la aplicación de hormigón con fibras en los Países Bajos. Este documento versa sobre las mezclas fibrosas que se utilizan en la actualidad y presenta los resultados de los proyectos recientemente construidos.

Palabras clave: *Hormigón con fibras de acero, Pavimento, Fisuración, Hormigón en masa, Hormigón armado continuo, Monitorización, Junta de retracción.*

(a) Los autores firman en nombre del grupo de trabajo de CROW sobre Hormigón con fibras de acero para carreteras, formado por W. van de Boom, E. van Avendonk, Chr.G. Bouquet, C.R. Braam, A. Hoekstra, S.B. van Hartskamp, A. Houtepen, G. Jurriaans, H. Ouwerkerk, A.J. van Leest, H. Soen, C.A. van der Steen, M. Stet y J. Verwaard.

ABSTRACT

Fibrous concrete has a history in pavements. In the '80-s fibrous concrete became popular thanks to options such as reduced pavement thickness and increased joint distances. Unfortunately, not all promises were kept and the fibrous concrete 'silently' disappeared from the pavement construction scene. However, in industrial floor construction research continued and new concrete mixes containing different types of new steel fibres were developed. Design guidelines were developed to harmonize structural design rules. The track record in industrial floors with steel fibres has become sound.

Over the years, the new fibrous concrete returned to the pavements. Several successful projects were constructed and at the instigation of the developers of these mixes a working group for the investigation of fibrous concrete was formed by the Dutch Technology Platform for Transport, Infrastructure and Public Space (CROW). A team of steel fibre producers, concrete experts, researchers and contractors had the task to evaluate the performance of recently constructed pavements.

The study may lead to recommended practices for the application of fibrous concrete in the Netherlands. The paper elaborates on the fibrous mixes currently in use and presents the results of recently constructed projects.

Key words: *Steel fibre concrete, Pavement, Cracking, Plain concrete, Continuously reinforced concrete, Monitoring, Shrinkage joint.*

El hormigón es un material que se utiliza mucho en los pavimentos, tanto en masa como armado. En el primer caso, se construyen juntas de retracción para evitar la fisuración aleatoria, en el segundo se asegura el control de la abertura de fisura gracias al armado del hormigón. En ambos casos, estas medidas se deben a la resistencia relativamente baja a tracción del hormigón, que está en torno al 10 por ciento de su resistencia a compresión. Por tanto, se deberían evitar que se produzcan esfuerzos de tracción o se debería aceptar y controlar la fisuración mediante la armadura dispuesta, que ha de ser capaz de resistir los esfuerzos de tracción.

Las fibras de acero son una alternativa al acero de armar, ya que pueden transmitir esfuerzos de tracción en el hormigón fisurado. Las fibras tienen la ventaja de que pueden reducir las dos fases de construcción a una sola si las fibras sustituyen por completo al armado. Estas fases son:

- La colocación de la armadura, y
- El vertido del hormigón.

Las fibras se añaden a la mezcla de hormigón antes del vertido, de manera que el proceso de vertido en sí también incluye la aplicación de la armadura. Sin embargo, esto solamente se sostiene cuando toda la armadura se puede sustituir por fibras de acero. Esto apenas puede ser el caso en los pavimentos de hormigón, ya que la cantidad de armadura es relativamente alta (aprox. 0,66 por ciento). En las soleras industriales apoyadas sobre el suelo, sin embargo, la armadura dispuesta se puede sustituir casi en su totalidad por fibras. Cuando la solera se apoya sobre pilotes, los momentos máximos sobre los apoyos encima de los pilotes requieren cierta armadura adicional. Se advierte que estas soleras están principalmente sometidas a flexión.

La cantidad de armadura aplicada en los pavimentos armados continuos es de aproximadamente 61 kg/m³. La mayor parte de esto (en torno a 52 kg/m³) es el 0,66 por ciento que se corresponde con la armadura longitudinal. Los apoyos necesarios para colocar estas armaduras necesitan unos 9 kg/m³. La Tabla 1 recoge una visión de conjunto de la armadura dispuesta tradicionalmente en los Países Bajos en este tipo de estructura.

Esta cantidad de refuerzo es más bien elevada si se compara con las soleras industriales, ya que el

pavimento no solamente está sometido a cargas de tráfico, que causa deformaciones de flexión, sino también a esfuerzos axiales provocados por la restricción de los movimientos longitudinales. Sustituir toda la armadura con fibras de acero tampoco es la mejor opción: se debería tener en cuenta que las barras corrugadas se pueden colocar donde resulten más eficaces para la transmisión de esfuerzos y reducir la abertura de fisura. Dado que las fibras de acero están distribuidas aleatoriamente en la mezcla:

Clase resistente del hormigón (cilindro / cubo)	C 35/45	
Diámetro de la barra de acero [mm]	16	20
Proporción de armadura (% de la sección transversal) para una abertura de fisura máxima de 0,40 mm	0,62	0,66
Espesor específico de la capa de hormigón		
230 mm		
– Cuantía mínima de armadura [mm ² /m]	1438	1518
– Separación máxima entre las barras (centro a centro) [mm]	140	207
250 mm		
– Cuantía mínima de armadura [mm ² /m]	1547	1650
– Separación máxima entre las barras (centro a centro) [mm]	130	190
270 mm		
– Cuantía mínima de armadura [mm ² /m]	1674	120
– Separación máxima entre las barras (centro a centro) [mm]	1782	176
Longitud de solape de las barras longitudinales [mm]	370	450

Tabla 1. Características de los pavimentos de hormigón armado continuo, Acero FeB 500; límite elástico característico = 500 N/mm²

- también están presentes en la zona de compresión del hormigón,
- no se concentran en la cara externa del área traccionada (brazo mecánico reducido), y
- no están orientadas en la dirección de los esfuerzos de tracción, sino al azar.

Estos tres aspectos hacen que la sustitución de la armadura de acero por fibras de este mismo material dé como resultado un aumento de la cantidad de acero por volumen de hormigón. Se podría añadir otro aspecto, la imposibilidad de inspeccionar la armadura antes de que tenga lugar el hormigonado: esto hace que la utilización de fibras de acero se enfrente por lo general a preguntas sobre su distribución y su orientación. El control de calidad; por ejemplo, las muestras de prueba tomadas de la mezcla y los ensayos con pequeñas vigas fabricadas *in situ* deberían garantizar que se pueda comprobar si se satisfacen las demandas.

ASPECTOS DEL DISEÑO

1. Pavimentos JPCP (Pavimentos de hormigón en masa con juntas)

Los pavimentos *JPCP* (*Pavimentos de hormigón en masa con juntas*) están diseñados de acuerdo a las teorías de losas y vigas sobre cimentaciones elásticas. Cuando no se emplee armadura, las tensiones de tracción no debe-

rán exceder la resistencia a la tracción. Esto implica que se deben construir juntas de retracción para reducir las tensiones que se generen por la retracción impedida del hormigón. Estas juntas se forman tan pronto como sea posible tras el vertido, mediante el serrado de al menos 1/3 del espesor del pavimento.

Se generarán no solamente reacciones horizontales, sino también verticales debido al rozamiento entre el pavimento y la cimentación, por debajo del centro de gravedad de la sección. Además, la deformación impuesta también puede ser en parte una curvatura impuesta. Petterson⁽⁹⁾ ha llevado a cabo una amplia investigación sobre este tema.

Las tensiones procedentes de cargas externas (por ejemplo, de las ruedas) se calculan mediante expresiones estándar para tensiones en una losa sobre una base elástica^(12,13). Estos cálculos en el tramo elástico-lineal son la base cuando se diseñan los pavimentos de hormigón en masa: el espesor del pavimento y la distancia entre juntas de retracción es tal que la tensión de tracción máxima del hormigón no rebasa la resistencia a flexión del hormigón (criterio de fisuración).

Los resultados que arrojan la teoría y la práctica demuestran que no se espera fisuración en el hormigón con una separación entre juntas de retracción de 4,2 m en sentido longitudinal (juntas transversales) y de aproximadamente 5 m en sentido transversal (juntas longitudinales). Las losas individuales de hormigón están unidas por

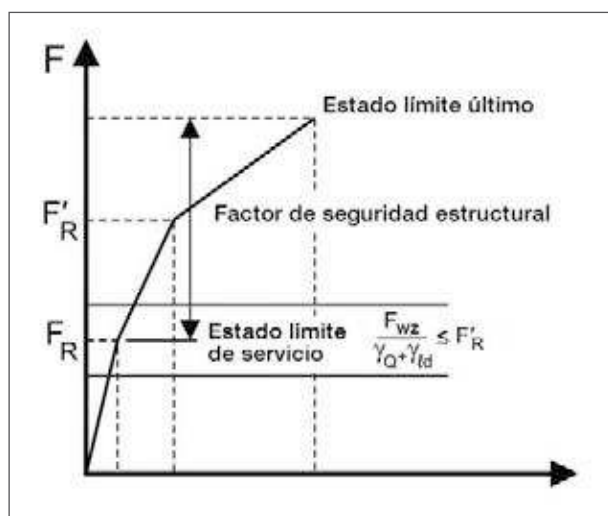


Figura 1. Diseño según la teoría del estado límite último y las líneas de rotura⁽⁹⁾.

medio de pasadores de acero para controlar el escalonamiento en las juntas y armadura de atado para controlar la abertura de fisura y las deformaciones horizontales. La siguiente cuantía de acero es la normal:

- Junta transversal: pasadores; barras de acero FeB 220, Ø 25 mm, longitud 500 mm, totalmente revestida; separación de 250 mm.
- Junta longitudinal: pasadores; barras de acero FeB 500, Ø 20 mm, longitud 800 mm, revestidos en una longitud de 200 mm; separación de 1,67 m.

La cuantía total de acero necesaria sumando los pasadores y la armadura de atado es aproximadamente 8 kg/m³ de hormigón. Al reducir la separación entre las juntas transversales, se puede reducir de manera considerable la cantidad total de acero necesaria en las juntas transversales. Ésta es la medida más efectiva, ya que en torno al 90 por ciento del acero necesario en los pasadores o barras de atado se aplica en las juntas transversales.

2. Pavimentos CRCP (Pavimentos de hormigón armado continuo)

El diseño del *hormigón armado continuo* se basa en la transmisión de la carga a través de una sección transversal fisurada, suponiéndose que la resistencia a la tracción del hormigón es cero y que la armadura está diseñada para satisfacer las demandas del *estado límite último (ELU)* y del *estado límite de servicio (ELS)*.

El procedimiento de diseño difiere del descrito para el hormigón en masa en dos aspectos. En primer lugar, en el ELS

se supone que la estructura se fisura, lo que provoca una reducción considerable de su rigidez y, en consecuencia, una considerable reducción de los esfuerzos provocados por las deformaciones impedidas: al contrario que las cargas externas, las fuerzas inducidas por las deformaciones impedidas dependen tanto de la magnitud de la propia deformación como de la rigidez de la estructura.

Los cálculos exactos requieren un procedimiento iterativo, ya que la rigidez de la estructura en sí depende del nivel total de carga y viceversa. Se han desarrollado modelos para calcular a mano unos valores envolventes relativamente precisos para los esfuerzos procedentes de las deformaciones impedidas. El nivel total de carga es la suma de estas cargas y de la carga externa.

La apertura de fisura se calcula mediante las teorías tradicionalmente empleadas en las estructuras de hormigón. Un aspecto importante en el cálculo de la apertura de fisura es la combinación de los esfuerzos que se supone que provocan la fisuración: la tracción pura es desfavorable desde el punto de vista del control de la apertura de fisura. La rigidez estructural se reduce tanto en el ELU que las deformaciones impedidas apenas si inducen ningún esfuerzo. Por tanto, su acción se desprecia mayoritariamente en este estado.

3. Pavimentos SFRC (Pavimentos de hormigón armado con fibras de acero)

El diseño del *hormigón armado con fibra de acero (SFRC)* se basó en primer lugar en las teorías elástico-lineales aplicadas al hormigón en masa. Desde entonces se dispone de métodos de diseño más adecuados. Vitt⁽¹¹⁾ (Figura 1) propuso un método de diseño en la que se utiliza la teoría de las líneas de rotura tal como la presentó Losberg⁽⁷⁾. Cuando se aplica este enfoque, se pueden tener en cuenta las propiedades y la resistencia reales del material tras la fisuración. De este modo, se puede determinar una carga última más realista.

En los Países Bajos, el diseño era a menudo elástico-lineal utilizando una resistencia a flexión. Esta resistencia ficticia era la resistencia real a flexión del hormigón en masa multiplicada por un factor que representa la influencia de las fibras de acero. Este factor se calculó utilizando los resultados de flexión de pequeñas vigas de SFRC^(8,1). La resistencia tras la fisuración en deformaciones impuestas se utilizó para calcular un factor (> 1) por el cual se puede multiplicar la resistencia a flexión⁽⁴⁾.

La principal ventaja de este procedimiento es, como se afirmó antes, que el cálculo permanece sin alteraciones

en comparación con el utilizado para el hormigón en masa⁽⁵⁾. Sin embargo, un grave inconveniente es que el procedimiento de diseño para pavimentos de hormigón en masa se fundamenta en una separación entre juntas de retracción más bien pequeña (por ejemplo, 4-5 m).

Se podría debatir si estos procedimientos aún son de aplicación cuando aumente la distancia entre juntas de retracción. Además, el uso de la resistencia tras la fisuración para definir una resistencia que se utilice en una etapa previa a la fisuración plantea cuestiones en torno a si el pavimento realmente continúa sin fisuras o si sólo carece de ellas desde un punto de vista teórico.

Los nuevos conocimientos y los avances posteriores han dado como resultado unos procedimientos de cálculo en el cual se diseñan las estructuras de SFRC del mismo modo que las de hormigón armado⁽⁶⁾. Se incorporaron los cálculos de fisuración real y de apertura de fisura.

4. Hormigón armado con fibras de acero

El uso de teorías para el diseño de hormigón armado también para el SFRC permitió el cálculo de sistemas combinados de fibras de acero y armadura sin tener que introducir muchas alteraciones en la teoría. Ahora, están cubiertas todas las aplicaciones que van desde el SFRC hasta el hormigón armado y las alternativas intermedias⁽⁶⁾.

5. Hormigón con fibras sintéticas

Estas fibras se añaden primordialmente para controlar la fisuración por retracción plástica. Este tipo de fisuración se puede producir cuando la superficie del hormigón está sometida a un secado prematuro y, como resultado, se ve sometido a tensiones de tracción causadas por el secado de los poros.

En esa etapa, las fibras sintéticas pueden puentear las fisuras y reducir así su abertura, las fibras no aumentan la carga admisible de la estructura y, por tanto, se consideran un refuerzo secundario. El contenido de fibras debería rondar el 0,1 a 0,2 por ciento del volumen para garantizar su funcionamiento. Nunca se deberían considerar las fibras sintéticas un refuerzo primario.

SFRC APLICADO A PROYECTOS DE DEMOSTRACIÓN

A instancias de los fabricantes de hormigón, se constituyó un grupo de trabajo para la investigación del hormigón

con fibras en la Plataforma Tecnológica Holandesa para el Transporte, las Infraestructuras y los Espacios Públicos (CROW). El proyecto comenzó en 2005 y se espera que concluya a mediados de 2008.

1. Alcance del grupo de trabajo

El proyecto de CROW tenía varios objetivos:

- Preparar una investigación sobre el estado del arte del SFRC que incluyese los aspectos del diseño, las prácticas constructivas, los tipos de mezcla, los métodos de ensayo, etc.
- Valorar los proyectos construidos anteriormente por medio de un cuestionario. Se debería basar en un programa de monitorización para vigilar los proyectos durante su construcción.
- Indicar la forma de ajustar una herramienta de diseño para los pavimentos de hormigón en masa y armado continuo, la denominada herramienta VENCON 2.0⁽³⁾. Stet y otros⁽¹⁰⁾ han discutido sobre las capacidades y los modelos incorporados a esta herramienta estándar de diseño que se utiliza a menudo en los Países Bajos. El diseño de los pavimentos de SFRC se puede convertir en una parte de la actualización de esta herramienta.
- Monitorizar el diseño y la construcción de algunos proyectos de construcción. El programa de monitorización se llevó a cabo en dos proyectos.
- Elaborar recomendaciones para el diseño y la construcción de pavimentos para carreteras de SFRC en los Países Bajos y presentar un informe CROW con recomendaciones prácticas.

2. Investigación bibliográfica

Un estudio determinó que los pavimentos de SFRC se deberían considerar una alternativa al hormigón en masa. También podría competir con los pavimentos de hormigón armado continuo siempre que la separación entre juntas de retracción se pudiera aumentar hasta 100-150 m. Como se ha afirmado antes, la cantidad de refuerzo necesaria en los pavimentos armados continuos (unos 61 kg/m³) apenas se puede sustituir por una cantidad equivalente de fibras de acero.

Si se compara con los pavimentos de hormigón en masa con pasadores (unos 8 kg/m³), la mayor resistencia a flexión y la capacidad resistente tras la fisuración del SFRC (aproximadamente 40 kg/m³) permite la reducción del número de juntas de retracción transversales. El



Foto 1. El pavimento de Tilburg durante (izquierda) y tras (derecha) la construcción.

resultado es que se puede reducir la cantidad de acero necesario para los pasadores.

Los precios unitarios por metro cuadrado y 250 mm de espesor de los pavimentos de hormigón son del 115 por ciento en el caso del CRCP (incluyendo la capa bituminosa intermedia) y del 130 por ciento en los pavimentos de SFRC si la inversión en JPCP es del 100 por ciento. Esto implica que el espesor del pavimento de SFRC se ha de reducir a aproximadamente el 77 por ciento (190 mm) del espesor del pavimento de hormigón en masa con juntas con el fin de que tenga un coste similar.

3. Programa de monitorización

El grupo de trabajo CROW examinó un número limitado de proyectos. Puesto que el grupo simplemente monitorizó la construcción de proyectos de SFRC y no participó, su influencia fue más bien limitada. Sin embargo, con el fin de garantizar que se abordasen todos los temas, se aplicó el programa de monitorización. Se presentan los dos proyectos monitorizados desde su inicio. Solamente se pueden presentar los resultados de un corto periodo tras la ejecución, y los resultados estructurales bajo cargas reales se someterán a monitorización en los años venideros.

PROYECTO PILOTO DE TILBURG

1. Materiales y métodos

En abril de 2007, se construyeron cerca de Tilburg (P.B.) aproximadamente 500 m de pavimento de carretera de 6,6 m de ancho realizado a base de hormigón armado con fibras (Foto 1). El hormigón (en un espesor h de 180 mm) se aplicó mediante una pavimentadora de encofra-

do deslizante, y se mezcló en una planta de hormigón. Las fibras de acero se añadieron manualmente con una pequeña cinta transportadora para ir añadiendo de forma paulatina las fibras en la planta. La mezcla se transportó después en camiones abiertos.

La clase resistente del hormigón fue de C 35/45 (resistencia característica a compresión a 28 días de una probeta cilíndrica/cúbica). Se utilizó cemento Pórtland con cenizas volantes (CEM II BV 32,5; 350 kg/m³) para aumentar la resistencia al desportillado (ciclos de hielo-deshielo y sales fundentes). La relación de agua-cemento fue de 0,45. El contenido de fibras fue de 40 kg/m³ (Twincone 1.0 del Grupo Arcelor). El contenido de fibras se escogió de tal modo que permitiese tramos sin fisuración de hasta 30 m.

Como referencia, el pavimento también se diseñó en hormigón en masa con juntas (con un espesor h de 250 mm) con una separación entre juntas transversales de retracción de 4,5 m. Se estimó que los costes de construcción de la solución alternativa eran aproximadamente los mismos que en el caso de las estructuras de hormigón en masa tradicional.

Los cortes transversales con sierra (para iniciar las juntas de retracción) se realizaron a intervalos de 267 m, 46 m, 48 m, 56 m, 26 m, 30 m y 30 m. Esta amplia gama de longitudes permitió comprobar si se podía conseguir el tramo de 30 m previsto sin fisuras. Se inspeccionaron las siete secciones para ver su comportamiento frente a la fisuración hasta 62 días después de la construcción.

Se midió la resistencia a compresión del hormigón en diversos momentos, utilizando probetas cúbicas (longitud de la arista de 150 mm) del fabricante (almacenados

Edad del hormigón (días)	7	14	21	28	56
Probeta cúbica (150 mm)	40,0	48,4	50,9	52,4	64,0
Probeta cilíndrica (d = 100 mm)		35,7		44,2	

Tabla 2. Resistencia media a compresión del hormigón [N/mm^2].

Sección	Longitud (m)	Número de días tras la construcción					
		2	4	6	14	27	62
1	267	1	4	6	7	9	13
2	46					2	3
3	48			2	2	2	3
4	56				2	3	3
5	26						1
6	30						
7	30						

Tabla 3. Número de grietas transversales.



Figura 2. Las fibras utilizadas en el proyecto piloto de Roermond. De izquierda a derecha: fibras de acero largas y cortas, y fibras sintéticas.

bajo agua) y testigos (diámetro de 100 mm) extraídos del pavimento.

RESULTADOS Y DEBATE

La Tabla 2 presenta los resultados de las mediciones de la resistencia a compresión, que se aproximan a los requisitos de la clase resistente C 35/45, ya que en la práctica la resistencia característica a compresión a 28 días de la probeta cúbica es aproximadamente el valor medio menos $8 N/mm^2$ ⁽²⁾.

La inspección hasta 62 días después de la construcción dió como resultado el número de fisuras transversales en las secciones específicas que se presentan en la Tabla 3. La separación media entre fisuras osciló entre 25 y 30 m.

Por desgracia, algunas de las fisuras se abrieron cerca de arquetas del sistema de alcantarillado que discurría por debajo del pavimento. Las arquetas de hormigón actuaron como iniciadores de las fisuras y posiblemente evitaron en parte que el pavimento longitudinal se deformase libremente. Aproximadamente 1/3 de las fisuras que aparecieron estaban situadas cerca de una arqueta.

Teniendo esto en cuenta, es evidente que en relación con los tramos sin fisuras, el pavimento se comportó tal como se preveía.

PROYECTO PILOTO DE ROERMOND

1. Materiales y métodos

Se construyeron a lo largo de la autopista A73, cerca de Roermond (P.B.) dos explanadas de aparcamiento para camiones con pavimentos de SFRC, de $85 \times 24 m^2$. Cada aparcamiento se realizó en diciembre de 2007 en dos veces, construyéndose 12 m de anchura en una ocasión con una pavimentadora de encofrado deslizante.

Los pavimentos de 12 m de ancho no están conectados entre sí, de manera que cada explanada se consideraba como dos losas de 15 m de largo y 12 m de ancho. Una de las cuatro losas no se construyó con juntas transversales de retracción, mientras que las otras tres solamente tenían una junta en el medio (es decir, a los 42 m).

El hormigón tenía un contenido de fibra de acero de $40 kg/m^3$. La mezcla consistía en fibras de acero de 32 mm de largo ($20 kg/m^3$) y 50 mm, 1 mm de diámetro ($20 kg/m^3$) (Figura 2). Ambos tipos de fibras tenían los extremos deformados para mejorar su adherencia. También se añadieron $0,6 kg/m^3$ de fibras de polipropileno para reducir la posible fisuración causada por la retracción plástica.

El espesor del pavimento se calculó mediante el programa informático VENCON 2.0^(3,10), teniendo en cuenta tanto las cargas del tráfico como las fuerzas de rozamiento derivadas de la deformación por retracción y las cargas térmicas. Puesto que aún no se ha implantado en el paquete el hormigón armado continuo con fibras de acero, se calculó el pavimento como si fuese una losa de hormigón en masa apoyada sobre una base y con juntas de retracción.

Se supuso que las juntas transversales estaban separadas 5 m y una junta longitudinal con una anchura de losa de 4 m en sentido transversal. El cálculo para esta losa de $5 \times 4 m^2$ apoyada dió como resultado un espesor requerido de al menos 253 mm.

El espesor se tuvo que corregir en dos aspectos: en primer lugar, el uso de hormigón armado con fibras de acero, un material que no es frágil, pero que tiene cierta resistencia a tracción tras la fisuración; en segundo lugar, el aumento de los esfuerzos longitudinales de



Foto 2. Detalle del pavimento de Roermond durante la construcción.



Foto 3. Colocación de los pasadores en el lugar predefinido de una junta transversal de retracción.

tracción derivados del rozamiento con la base cuando aumenta la separación entre juntas de retracción. Los diseñadores buscaban una separación entre juntas de 40-50 m.

Teniendo en cuenta estos dos aspectos, se decidió reducir el espesor del pavimento a 230 mm y combinarlo con una separación entre juntas de retracción de 42 m (Foto 2). Por tanto, se dotó de una junta de retracción a tres losas de 85 m de longitud (Foto 3). Para investigar el comportamiento con una mayor separación entre juntas, se dejó una de las losas sin junta transversal.

Se llevó a cabo la inspección a los 4, 7, 24 y 36 días de haber hormigonado los pavimentos. Aparte de las fisuras transversales previstas bajo las juntas de retracción (Foto 4), no se encontró ninguna otra fisura. Solamente una de las tres losas dotadas con una junta de retracción mostró fisuración en esta junta. La losa de 85 m de longitud sin juntas de retracción no mostró ninguna fisuración hasta la última inspección realizada (marzo de 2008).

CONCLUSIONES

Este documento ha abordado un enfoque práctico y un programa de monitorización para valorar el comportamiento del hormigón armado con fibras de acero en la construcción de pavimentos. El programa de trabajo se ejecutó teóricamente por primera vez en 2006 y le siguió una vigilancia de la aplicación práctica en 2007 y 2008.

Los pavimentos de hormigón en masa con juntas transversales de retracción se construyeron con fibras de acero. La separación entre juntas se pudo aumentar de 5 m hasta aproximadamente 25 m, mientras que incluso 80 m podía haber sido una opción.

Según parece, el hormigón con fibras pudo satisfacer las expectativas y puede dar como resultado un pavimento para carreteras que preste un buen servicio siempre que se fabrique bajo unos estrictos controles de calidad.

Su aplicación se popularizará tan pronto como sus costes sean aceptables en comparación con los pavimentos de hormigón en masa con juntas, y cuando el hormigón con fibras se incorpore a las herramientas de diseño y a los códigos normativos que se utilizan en los Países Bajos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bouquet, G.Chr., Soen, H.H.M. & Van Leest, A.J. (2008) "Performance of Steel Fibre Reinforced



Foto 4. Fisura de retracción formada bajo una junta transversal de retracción serrada tras el hormigonado del pavimento.

Concrete in roads and industrial floors". IX Conferencia Internacional sobre Pavimentos de Hormigón, San Francisco, EE.UU.

2. CEN (2004) Eurocode 2: "Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings". Comité Europeo de Normalización, Bruselas, Bélgica.
3. CROW (2004). VENCON 2.0 "Software de diseño para carreteras de hormigón" (en neerlandés). CD-ROM D925. CROW, Ede, Países Bajos.
4. CUR (1994a). "Determinación de la resistencia a la tracción por flexión, la ductilidad de flexión y la resistencia a la tracción por flexión equivalente del hormigón armado con fibra de acero" (en neerlandés). Recomendación CUR 35, CUR, Gouda, Países Bajos.
5. CUR (1994b). "The design and detailing of industrial floors in structural concrete" (en neerlandés).

Recomendación del CUR 36, CUR, Gouda, Países Bajos.

6. CUR (2007). "Soleras industriales de hormigón armado con fibra de acero sobre cimentación con pilotes - diseño y construcción" (en neerlandés). Recomendación del CUR 111, CUR, Gouda, Países Bajos.
7. Losberg, A. (1961). "Design Methods for structurally reinforced concrete pavements". Suecia.
8. NEN-EN 14651 (2005), "Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)", Comité Europeo de Normalización (CEN), Bruselas, Bélgica.
9. Petterson, D (1998) "Stresses in Concrete Structures from Ground Restraint". Informe TVBK-1014. ISSN 0349-4969. ISRN: LUTVDG/TVK-98/1014+120p. Instituto Lund de Tecnología, Departamento de Ingeniería Estructural, Suecia.
10. Stet, M.J.A., Van Leest, A.J. y Frénay, J.W. (2006). "Dutch Design Method for Jointed and Continuously Reinforced Concrete Road Pavements". X Simposio Internacional sobre Carreteras de Hormigón. Bruselas, Bélgica.
11. Vitt, G. (2003). "Steel Fibre Concrete Industrial Floors. Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete". Taller Rilem TC 162-TDF, Bochum, Alemania.
12. Westergaard, H.M. (1926) "Stresses in Concrete Pavements computed by Theoretical Analysis". Actas de la Junta de investigación de carreteras, Parte 1, EE.UU.
13. Westergaard, H.M. (1948) "New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields". Proceedings American Society of Civil Engineers, Vol. 113, EE.UU.

