



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 356 065**

51 Int. Cl.:

**D01D 5/253** (2006.01)

**E04C 5/07** (2006.01)

**C08J 5/04** (2006.01)

**C04B 16/06** (2006.01)

**D01D 5/42** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **02252912 .7**

96 Fecha de presentación : **25.04.2002**

97 Número de publicación de la solicitud: **1253223**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **30.10.2002**

54 Título: **Fibras de polímeros de refuerzo, altamente dispersables.**

30 Prioridad: **25.04.2001 US 843427**  
**15.03.2002 US 99434**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**04.04.2011**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**04.04.2011**

73 Titular/es: **W.R. Grace & Co. -Conn.**  
**7500 Grace Drive**  
**Columbia, Maryland 21044, US**

72 Inventor/es: **Rieder, Klaus-Alexander;**  
**Berke, Neal S.;**  
**Macklin, Michael B.;**  
**Ranganathan, Anandakumar y**  
**Altoubat, Salah**

74 Agente: **Isern Jara, Jorge**

**ES 2 356 065 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Fibras de polímeros de refuerzo, altamente dispersables.

### Campo de la invención

5 La invención se refiere a fibras para materiales de matrices de refuerzo, y más particularmente a una serie de fibras de polímeros sintéticos que tiene excelentes características de dispersabilidad y de capacidad de refuerzo, y preferentemente excelente capacidad de acabado, en composiciones hidratables de cemento. Los cuerpos de las fibras individuales son alargados y con gran capacidad de flexión, teniendo perfiles que en general tienen sección transversal en forma de cuadrilátero, minimizando la formación de bolas de fibras y haciendo máxima la unión de las fibras.

### 10 Antecedentes de la invención

Si bien las fibras de la presente invención son adecuadas para refuerzo de diferentes materiales de matriz, tales como adhesivos, asfaltos, materiales compuestos, plásticos, gomas, etc., y estructuras fabricadas a partir de éstos, las fibras que se describirán son especialmente adecuadas para el refuerzo de compuestos de refuerzo a base de cemento hidratables, tales como hormigón pre-mezclado, hormigón pre-moldeado, hormigón para albañilería (mortero), hormigón proyectable ("shotcrete"), hormigón bituminoso, composiciones de yeso, compuestos de protección contra el fuego basados en yeso y/o cemento Portland, y otros.

Un objetivo principal de las fibras de la presente invención es el de reforzar el hormigón, por ejemplo, el hormigón pre-mezclado, hormigón de proyección ("shotcrete"), etc., y estructuras fabricadas a partir de éstos. Estos materiales de matriz presentan numerosas dificultades para los que diseñan fibras de refuerzo.

20 El hormigón es fabricado utilizando un material de unión de cemento hidratable, un árido fino (por ejemplo, arena) y un árido grosero (por ejemplo, pequeñas piedras, grava). Se fabrica un mortero utilizando un material de unión de cemento y un árido fino. Los hormigones y morteros son, por lo tanto, materiales frágiles. Si una estructura de mortero o de hormigón es sometida a esfuerzos que superan su resistencia máxima a la tracción, se pueden iniciar grietas y se propagarse en la misma. La capacidad de la estructura de cemento para resistir la iniciación de grietas y la propagación de las mismas se puede comprender haciendo referencia a la "resistencia" y "tenacidad a la fractura" del material.

25 La "resistencia" se refiere a la capacidad de una estructura de cemento u hormigón para resistir el inicio de grietas. En otras palabras, la resistencia es proporcional a la carga máxima que puede resistir la estructura sin formar grietas y es una medida de la carga o esfuerzo mínimo (por ejemplo, el "factor de intensidad de esfuerzo crítico") requerido para iniciar la formación de grietas en dicha superficie.

30 Por otra parte, la "tenacidad a la fractura" se refiere a la "energía de fractura" específica de una estructura de cemento o de hormigón. Este concepto se refiere a la capacidad de la estructura en resistir la propagación, o ampliación, de una grieta existente en la estructura. La característica de la tenacidad es proporcional a la energía requerida para la propagación o ensanchamiento de la grieta (o grietas). Esta propiedad puede ser determinada midiendo simultáneamente la carga requerida para deformar o "flexionar" una muestra de viga de hormigón reforzado con fibras (FRC) en una grieta abierta y la magnitud o extensión de la flexión. La tenacidad a la fractura se determina, por lo tanto, dividiendo el área situada por debajo de una curva de flexión por carga (generada sacando el gráfico de la carga con respecto a la flexión de la muestra FRC) por su área en sección transversal.

35 En las técnicas del cemento y del hormigón se han diseñado fibras para aumentar la resistencia y tenacidad a la fractura en materiales de refuerzo. Se han utilizado numerosos materiales de fibras para esta finalidad, tales como acero, polímeros sintéticos (por ejemplo, poliolefinas), carbono, nilón, aramidas y vidrio. La utilización de fibras de acero para reforzar estructuras de hormigón sigue siendo habitual debido a la resistencia intrínseca del metal. No obstante, una de las preocupaciones en el diseño de productos con fibras de acero consiste en aumentar la resistencia a la "extracción" de la fibra, porque esto incrementa la capacidad de la fibra en evitar la propagación de las grietas. A este respecto, la patente USA 3.953.953 de Marsden da a conocer fibras que tienen extremos conformados en "J" para resistir la extracción con respecto al hormigón. No obstante, las fibras rígidas que tienen deformaciones físicas pueden provocar problemas de acoplamiento que hacen las fibras difíciles de manejar y de dispersar de manera uniforme dentro de una mezcla de hormigón húmeda. Diseños más recientes que comportan la utilización de fibras de polímeros "rizadas" u "onduladas", pueden tener complicaciones similares, dependiendo de la rigidez del material de fibras utilizado.

40 Los materiales de poliolefinas, tales como polipropileno y polietileno, han sido utilizados para el refuerzo de hormigón y ofrecen ventajas económicas debido al coste relativamente más bajo del material. No obstante, estos materiales poliolefínicos, al ser hidrofóbicos por su naturaleza, resisten el entorno acuoso del hormigón húmedo. Además, la mayor parte de fibras de poliolefina necesarias en el hormigón, para aproximarse a la resistencia y tenacidad a la fractura del hormigón reforzado con fibras de acero, conducen frecuentemente a fibras que se aglomeran o "forman bolas" y aumentan el tiempo de mezcla en el lugar de la obra. Esta tendencia a formar bolas de fibras significa que la dosificación deseada de fibras no se consigue. La concentración correcta de fibras no se

consigue frecuentemente porque las bolas de fibras son retiradas (cuando se observan en la superficie del hormigón) por los trabajadores que desean conseguir una superficie del hormigón bien acabada. En algunos casos ocurre que lugares de la estructura de cemento carecen por completo de fibras de refuerzo. Por lo tanto, la deseada homogeneidad de la dispersión de fibras no se consigue.

5 Se conocen procedimientos para facilitar la dispersión de las fibras. Por ejemplo, la patente USA 4.961.790 de Smith y otros da a conocer la utilización de una bolsa soluble en agua para introducir un número grande de fibras en una mezcla húmeda. La patente USA 5.224.774 de Valle y otros dio a conocer la utilización de envasado no soluble en agua que se desintegraba mecánicamente en la mezcla evitando la aglomeración y consiguiendo una dispersión uniforme de fibras dentro de la mezcla de hormigón.

10 La dispersión de fibras de refuerzo se puede conseguir también por envasado de pequeñas cantidades individuales de fibras. Por ejemplo, la patente USA 5.807.458 de Sanders dio a conocer fibras de las que se forman haces utilizando una envolvente perimetral circunferencial. De acuerdo con esta patente, la continuidad de la envoltura periférica se podría alterar por agitación dentro de la mezcla de hormigón húmeda y las fibras se podrían liberar y dispersar en la mezcla.

15 Por otra parte, la solicitud de patente mundial n°WO 00/49211 de Leon (publicada 8/24/00) dio a conocer fibras formando "paquetes" juntos pero separables una vez mezclados en el hormigón. Una serie de fibras se mezclaban entre sí de manera separable, tal como una cinta adherida a extremos cortados de las fibras, formando un "paquete". Dentro de una mezcla húmeda a base de cemento, los paquetes se podrían romper y/o disolver separadas para permitir la separación y dispersión de las fibras individuales dentro de la mezcla.

20 La dispersión de fibras de refuerzo se puede conseguir también alternado las fibras durante la mezcla. Por ejemplo, la patente USA 5.993.537 de Trottier y otros dio a conocer fibras que se fibrilan progresivamente en la agitación de la mezcla de hormigón húmedo. Las fibras presentaban una "reducida área superficial inicial" para facilitar la introducción de fibras en la mezcla húmeda y, después de agitación y bajo el efecto abrasivo de los áridos de la mezcla sufrían "fibrilación", que es la separación del material fibroso inicial de baja área superficial en fibrillas individuales más pequeñas. Se cree que se podría obtener de esta manera una distribución de fibras homogénea con elevados porcentajes de adición.

25 Un nuevo enfoque fue dado a conocer por la patente USA n°6.197.423 de Rieder y otros, que dio a conocer fibras aplanadas mecánicamente. Para mejorar el anclaje dentro del hormigón, las fibras eran aplanadas entre rodillos dispuestos en oposición para conseguir una anchura y/o dimensiones de grosor variables y roturas bajo esfuerzo que se apreciaban al microscopio como discontinuidades y desplazamientos irregulares y al azar de polímeros en la superficie de las fibras individuales. Estas fracturas microscópicas bajo esfuerzo se creía que mejoraban la unión entre el cemento y las fibras y, dado que las fracturas bajo esfuerzo no eran continuas por su naturaleza, las fibras se ablandaban en el punto en el que el acoplamiento fibra a fibra (y, por lo tanto, la formación de bolas de fibras) se minimizaba o se evitaba. El método de aplanado mecánico de Rieder y otros era distinto del  
30 método que se daba a conocer en la patente USA n°5.298.071 de Vondran, en el que las fibras eran entremezcladas con clinker de cemento y retenían partículas de cemento embebidas en la superficie.

35 En este sentido, la naturaleza de la superficie de las fibras ha sido un tema frecuente de investigación en la dispersión de fibras y en la unión en el hormigón. Por ejemplo, la patente USA n°5.753.368 de Hansen dio a conocer una lista de agentes humectantes, tales como emulsificantes, detergentes y tensoactivos para hacer las superficies más hidrofílicas y, por lo tanto, más susceptibles de mezcla en el hormigón húmedo. Por otra parte, la patente USA n°5.753.368 de Berke y otros dio a conocer que la unión entre el hormigón y las fibras se podrían mejorar utilizando recubrimiento específicos de éter glicol en vez de agentes humectantes convencionales que tendían a introducir aire no deseado en el interfaz fibra/hormigón.

40 Desde luego, tal como se ha mencionado en las patentes USA n°5.298.071 y n°6.197.423 que se han comentado anteriormente, la deformación física de la estructura de las fibras se creía asimismo que mejoraba la unión fibras-hormigón. La patente USA n°4.297.414 de Matsumoto como otro ejemplo, dio a conocer la utilización de salientes y rebordes para incrementar la resistencia de la unión. Otros tratamientos superficiales, tales como la utilización de ruedas de embutición para imponer conformaciones sobre las fibras, se utilizaron también para mejorar la unión fibras-hormigón. Los diseñadores de fibras han procedido incluso a curvar las fibras formando estructuras de ondas senoidales para incrementar la capacidad de las fibras en resistir su extracción con respecto al hormigón. No obstante, los presentes inventores han observado que las deformaciones estructurales incrementadas en las estructuras de las fibras pueden realmente aumentar las oportunidades de que ocurra la poco deseable formación de bolas.

45 Teniendo en cuenta esta anterioridad, los inventores actuales han apreciado la necesidad de nuevas fibras de refuerzo, sintéticas que posean facilidad de dispersión en el hormigón, a efectos de evitar la formación de bolas de fibras y conseguir las tasas de dosificación de fibras deseadas, proporcionando al mismo tiempo resistencia y tenacidad a la fractura en los materiales de la matriz y particularmente en materiales frágiles, tales como hormigón, mortero, hormigón de proyección, yeso de protección contra el fuego y similares.

### Resumen de la invención

Para superar las desventajas de la técnica anterior, la presente invención da a conocer fibras de polímeros de refuerzo altamente dispersables, materiales de matriz reforzados por las fibras y métodos para obtenerlos. Las fibras a título de ejemplo de la presente invención proporcionan facilidad de dispersión, así como resistencia y tenacidad a la fractura cuando se dispersan dentro de materiales de la matriz, particularmente materiales frágiles, tales como hormigón, mortero, yeso o materiales protectores contra el fuego basados en cemento Portland o yeso, hormigón de proyección y similares.

Estas características se consiguen utilizando una serie de cuerpos de fibras individuales, según la reivindicación 1. En realizaciones preferentes, la anchura promedio de las fibras debe superar el grosor promedio de las fibras, como mínimo, 4 veces (es decir, una proporción mínima de 4:1), pero la anchura promedio no debe superar preferentemente el grosor promedio en un factor que supera 50 veces (50:1). De manera más preferente, la proporción de la anchura al grosor de las fibras está comprendida entre 5 y 20 (5:1 a 20:1).

Si bien los cuerpos de fibras individuales según la invención pueden ser introducidos opcionalmente dentro del material de la matriz y ser dispersados en la misma en forma de una serie de elementos separados o separables (es decir, fibras en una lámina rayado o fibrilable, o contenidas dentro de una envoltente, recubrimiento, paquete o cubierta soluble o desintegrable) las fibras pueden ser introducidas directamente en un compuesto hidratable a base de cemento y mezclas de manera relativamente fácil para conseguir una dispersión homogénea dentro de aquella. Los propios cuerpos individuales de las fibras, no obstante, no deberían ser sustancialmente fibrilables (es decir, reducibles adicionalmente en unidades de fibras más pequeñas) después de ser sometidas a agitación mecánica en la composición de matriz hasta la medida necesaria para conseguir sustancialmente una dispersión uniforme de las fibras en su interior.

Los cuerpos de fibras individuales a título de ejemplo de la invención se encuentran en sí mismos sustancialmente libres de fracturas por esfuerzo internas y externas, tales como se pueden crear por abrasión del clinker o aplanado mecánico. El objetivo general de los presentes inventores es el de mantener la integridad de los cuerpos de las fibras individuales, no solamente en términos de integridad de las fibras estructurales, sino también integridad y uniformidad del área superficial total y características de flexión de un lote a otros.

Una sección transversal en forma general de cuadrilátero proporciona una relación superior de área superficial a volumen ( $S_a/V$ ) en comparación con monofilamentos de sección redonda u ovalada que comprenden una cantidad similar de material y que tengan un diámetro de una dimensión comparable. Los presentes inventores creen que una forma en sección transversal de cuadrilátero proporciona una mejor relación de flexibilidad a volumen en comparación con formas de sección transversal redonda u elíptica y, más significativamente, esta mejor característica de flexibilidad se traduce en un mejor control de la flexibilidad. Los cuerpos de fibras individuales de la invención tenderán a doblarse predominantemente formando un arco con una torsión comparativamente mínima y menor acoplamiento fibra a fibra, facilitando de esta manera la dispersión. Como contraste, para un módulo elástico determinado del material y un área en sección transversal determinada, las fibras de la técnica anterior que tiene sección transversal de forma circular o elíptica con proporciones de eje principal/eje menor menores de 3 tendrán una mayor resistencia a la flexión, poseyendo, por lo tanto, una mayor tendencia a la formación de bolas de fibras en comparación con fibras de sección transversal de forma general de cuadrilátero (por ejemplo, rectangular).

Los presentes inventores creen además que una sección transversal en forma general de cuadrilátero proporcionará excelentes características de área superficial de las fibras y manejabilidad en comparación, por ejemplo, con fibras redondas o elípticas. A este respecto, las fibras de la invención tienen una "capacidad de flexión" en un rango de 100 a 2500 mili Newton<sup>-1</sup>\*metro<sup>-2</sup> (mN<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>). Tal como se utiliza en esta descripción, el término "capacidad de flexión" significa y hace referencia a la resistencia de un cuerpo de fibras individual al movimiento de flexión (es decir, a una fuerza que es perpendicular al eje longitudinal de la fibra) medida aplicando una carga a un extremo de las fibras y midiendo su movimiento relativo con respecto al extremo opuesto de las fibras que ha sido fijado, por ejemplo, dentro de una brida o abrazadera mecánica, para impedir el movimiento. De este modo, se puede decir que una fibra tiene mayor capacidad de flexión si requiere una fuerza menor de flexión hasta un cierto grado. La flexibilidad de una fibra es función de su longitud, forma, dimensiones de la sección transversal y su módulo de elasticidad. De acuerdo con ello, la capacidad de flexión "B" de la fibra se expresa en términos de mili Newton<sup>-1</sup>\*metro<sup>-2</sup> (mN<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>) y se calcula utilizando la siguiente fórmula

$$B = \frac{1}{3 \cdot E \cdot I}$$

en la que "E" representa el módulo de Young de la elasticidad (Giga Pascal) de la fibra e "I" representa el momento de inercia (mm<sup>4</sup>) del cuerpo de fibras individual. Una fibra que tenga menor capacidad de flexión "B" será, desde luego, menos flexible que una fibra que tiene una mayor capacidad de flexión "B". El momento de inercia "I" describe la característica de la materia en resistir cualquier cambio de movimiento o de rotación. Para un perfil de sección

transversal que tiene una forma general de cuadrilátero (o aproximadamente rectangular), el momento de inercia puede ser calculado utilizando la fórmula

$$I_{\text{rectángulo}} = 1/12 \cdot w \cdot t^3$$

en la que "w" representa la anchura promedio del rectángulo y "t" representa el grosor promedio del mismo.

5 En otras realizaciones a título de ejemplo, la "capacidad de flexión" de las fibras se puede mejorar adicionalmente si el grosor y/o la anchura de las fibras se varían a lo largo de la longitud de las mismas, por ejemplo, desde 2,5-25 por ciento de desviación máxima con respecto valor promedio del grosor o la anchura. Esta pequeña variación del grosor y/o anchura de las fibras mejora también la unión entre la matriz de refuerzo y las fibras.

10 Los inventores han observado, teniendo en cuenta la anterior ecuación de la "capacidad de flexión" "B" de fibras que tienen una sección transversal de forma general de cuadrilátero, que un incremento en el módulo de elasticidad "E" de la fibra tendrá como resultado una disminución correspondiente de la capacidad de flexión y, como consecuencia, hará más difícil la dispersibilidad. Los inventores han observado que para mantener el mismo nivel de capacidad de flexión, el momento de inercia "I" se debe disminuir y esto se puede conseguir, por ejemplo, reduciendo el grosor de las fibras manteniendo simultáneamente el área en sección transversal de las mismas.

15 Además, los cuerpos de las fibras individuales tienen las siguientes propiedades cuando se miden en dimensión longitudinal (extremo a extremo) a lo largo del eje del cuerpo de las fibras: un módulo de Young de elasticidad de 4-20 Giga Pascals y preferentemente 5-15 Giga Pascals, una resistencia a la tracción de 400-1600 Mega Pascals, preferentemente 400-900 Mega Pascals, y una capacidad de carga mínima en el esfuerzo de tracción de 20-1000 Newtons preferentemente 40-900 Newtons, y de modo más preferentemente 100-300 Newtons.

20 Un procedimiento especialmente preferente para fabricar las fibras consiste en la extrusión en fusión de materiales polímeros (por ejemplo, polipropileno como lámina continua); para disminuir la temperatura de esta lámina extrusionada en fusión por debajo de la temperatura ambiente (por ejemplo, por debajo de 25°C); para cortar o ranurar la lámina (después de enfriamiento) en cuerpos de fibras separados o separables individuales que tienen en general secciones transversales en forma de cuadrilátero para separar las fibras individuales, como mínimo, por un factor de 10-20 y más preferentemente entre 12-16, consiguiendo de esta manera una anchura promedio de 1,0-5,0 mm y más preferentemente de 1,3-2,5 mm y un grosor promedio de 0,05-0,2 mm y cortar las fibras para obtener cuerpos de fibras individuales con una longitud promedio de las fibras de 20,75 mm preferentemente entre 30-60 mm.

30 La presente invención está dirigida, por lo tanto, a materiales de matriz, tales como hormigón, mortero, hormigón proyectado, asfalto y otros materiales que contienen las fibras anteriormente descritas, y también a métodos para modificar materiales de matriz por la incorporación de las fibras por dichos materiales matriz.

35 Las fibras y materiales matriz (tales como hormigón) que tienen estas fibras embebidas en su interior son especialmente adecuados para aplicaciones en las que es importante la "capacidad de acabado" (tal como aplicaciones en pisos). El término "capacidad de acabado" se refiere a la capacidad de las fibras en resistir "abombamientos" del hormigón después de que la superficie ha sido alisada (es decir, "acabada"). Los inventores han descubierto que la capacidad de acabado, similar a la dispersión, es una función de la capacidad de flexión de las fibras, pero además la capacidad de acabado es también una función de la longitud de las fibras. Fibras a título de ejemplo que tienen "capacidad de acabado" se encuentran sustancialmente libres de fracturas por esfuerzo y sustancialmente no son fibrilables cuando se agitan mecánicamente dentro del material de la matriz.

40 En particular, la presente invención da a conocer fibras para el refuerzo de una composición de hormigón, que comprende: una serie de cuerpos de fibras individuales que tienen una longitud definida entre dos extremos opuestos y comprenden, como mínimo, un polímeros sintético, poseyendo dichas fibras individuales superficies que se encuentran sustancialmente libres de fracturas por esfuerzo, tales como se podrían crear por aplanado mecánico de los cuerpos de las fibras entre rodillos opuestos, siendo dichos cuerpos de fibras individuales sustancialmente no fibrilables en unidades de fibras más pequeñas después de la mezcla en hormigón húmedo en la medida necesaria para conseguir sustancialmente dispersión uniforme de las fibras en su interior y teniendo dichos cuerpos de fibras una forma en sección transversal general de cuadrilátero a lo largo de dicha longitud, teniendo, por lo tanto, dimensiones de anchura, grosor y longitud

en las que la anchura promedio no es menor de 1,0 mm;

50 en las que la anchura promedio no es superior a 5,0 mm;

en las que el grosor promedio no es menor de 0,05 mm;

en las que el grosor promedio no es superior a 0,2 mm;

en las que la longitud promedio no es menor de 20 mm;

- en las que la longitud promedio no es superior a 75 mm;
- en las que dichos cuerpos de fibra tienen un módulo Young con una elasticidad no menor de 4 Giga Pascals;
- 5 en las que dichos cuerpos de fibra tienen un módulo Young con una elasticidad no superior a 20 Giga Pascals;
- en las que dichos cuerpos de fibra tienen una resistencia a la tracción no menor de 400 Mega Pascals;
- en las que dichos cuerpos de fibra tienen una resistencia a la tracción no superior a 1600 Mega Pascals;
- en las que dichos cuerpos de fibra tienen una capacidad de carga mínima a la tracción no menor de 20 Newtons por cuerpo de fibra;
- 10 en las que dichos cuerpos de fibra tienen una capacidad de carga mínima a la tracción no superior a 1000 Newtons por cuerpo de fibra;
- en las que dichos cuerpos de fibra tienen una proporción promedio de sección a volumen no menor de  $10,5 \text{ mm}^{-1}$ ;
- 15  $42 \text{ mm}^{-1}$ ;
- en las que dichos cuerpos de fibra tienen una capacidad de flexión promedio "B" no menor de  $100 \text{ mN}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ;
- y
- en las que dichos cuerpos de fibra tienen una capacidad de flexión promedio "B" no superior a  $2500 \text{ mN}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ;
- 20 estando determinada dicha capacidad de flexión "B" de dichas fibras de acuerdo con la fórmula  $B=1/(3 \cdot E \cdot I)$ , en la que el momento de inercia "I" para una sección transversal de forma general de cuadrilátero se calcula de acuerdo con la fórmula  $I=(1/12) \cdot w \cdot t^3$  en la que "w" es la anchura promedio y "t" es el grosor promedio de la sección transversal que tiene forma general de cuadrilátero y en la que "E" representa el módulo de Young de elasticidad de la fibra.
- 25 La presente invención da a conocer también un material compuesto que comprende fibras de la presente invención y hormigón en el que dichas fibras están embebidas, teniendo el hormigón una resistencia a la compresión en un rango de 15 a 40 MPa, de manera que el valor promedio  $R_{e,3}$  se encuentra entre el 20 y el 60%, teniendo dicho hormigón una capacidad de acabado de manera que dichas fibras embebidas no sobresalen sustancialmente de dicho hormigón.
- 30 La presente invención da a conocer además una composición que comprende un producto de unión de cemento y las fibras de la presente invención.
- La presente invención da a conocer también un material de matriz que comprende:
- un material de matriz seleccionado entre el grupo seleccionado por adhesivos, asfalto, materiales compuestos, plásticos, elastómeros y materiales de cemento hidratables; y
- 35 - fibras según la presente invención.
- Adicionalmente, la presente invención da a conocer un procedimiento para modificar un material de matriz que comprende la introducción en el mismo de las fibras de la presente invención.
- Otras ventajas y características de la invención se describen a continuación de manera detallada.
- Breve descripción de los dibujos**
- 40 La apreciación de las ventajas y beneficios de la invención se comprenderá más fácilmente tomando en consideración la siguiente descripción descrita de realizaciones preferentes, conjuntamente con los dibujos adjuntos, en los que
- Las figuras 1-3 son ampliaciones micrográficas de las secciones transversales de fibras de refuerzo de la TÉCNICA ANTERIOR;
- 45 Las figuras 4 y 5 son ampliaciones de micrográficas de un perfil en sección de forma general de cuadrilátero de fibras a título de ejemplo de la presente invención;

La figura 6 es una ampliación de una micrografía (con 25 aumentos) de la superficie de un cuerpo de fibra individual a título de ejemplo, según la presente invención, antes de mezclar en una mezcla de hormigón (que contendría áridos finos y groseros), y la figura 7 muestra la fibra después del mezclado;

5 La figura 8 es la ampliación de una micrografía (a 200 aumentos) de la superficie de un cuerpo de fibra individual a título de ejemplo de la presente invención antes de mezclar en una mezcla de hormigón (que contendría áridos finos y groseros), y la figura 9 muestra la fibra después de la mezcla;

La figura 10 es la ampliación de una micrografía (a 900 aumentos) de la superficie de un cuerpo de fibra individual a título de ejemplo de la presente invención antes de mezclar en una mezcla de hormigón (que contendría áridos finos y groseros), y la figura 11 muestra la fibra después de la mezcla;

10 La figura 12 es la ampliación de una micrografía (a 900 aumentos) de una fibra aplanada mecánicamente de la TÉCNICA ANTERIOR, de acuerdo con la patente USA 6.197.423;

La figura 13 es una representación gráfica de carga de tracción en comparación con la deformación de diferentes fibras;

15 La figura 14 es una representación gráfica de carga de tracción en comparación con la deformación de diferentes fibras;

La figura 15 es una fotografía de un dispositivo de división por cuña para comprobar la carga de materiales de matriz a base de un material de cemento, que contienen fibras de polímero de refuerzo;

La figura 16 es una representación gráfica de la deformación en comparación con el desplazamiento de la abertura de la embocadura de una grieta de diferentes fibras; y

20 La figura 17 es una curva típica de deformación con respecto a esfuerzo de un material a efectos ilustrativos de los principios que se explican.

#### **Descripción de realizaciones preferentes de la invención**

25 Los presentes inventores creen que las fibras de polímeros de refuerzos, según la presente invención, pueden ser utilizadas en múltiples composiciones y materiales y estructuras fabricadas a partir de éstos. El término "materiales matriz" está, por lo tanto, destinado a incluir un amplio rango de materiales que pueden ser reforzados por las fibras. Éstas comprenden materiales adhesivos, asfalto, materiales compuestos, por ejemplo, resinas, plásticos, elastómeros, tales como goma, etc. y estructuras fabricadas a base de los mismos.

30 Se incluyen entre los materiales de matriz preferentes de la invención, las composiciones a base de cemento hidratables, tales como hormigón pre-mezclado, hormigón pre-moldeado, mortero de albañilería y hormigón, hormigón de proyección, hormigón bituminoso, composiciones basadas en yeso (tales como composiciones de paneles para paredes), composiciones contra el fuego basadas en yeso y/o cemento Portland (para paneles y aplicación por proyección), membranas y recubrimientos de impermeabilización y otras composiciones a base de cemento hidratables en forma seca o húmeda.

35 Se pondrá énfasis en primer lugar en el refuerzo de hormigón estructural (por ejemplo, hormigón pre-mezclado, hormigón de proyección ("shotcrete")). No obstante, el hormigón (vertido, moldeado o proyectado) es un material extremadamente frágil que presenta dificultades en términos de proporcionar fibras de refuerzo que (1) puedan ser introducidas satisfactoriamente dentro de este material de matriz y mezcladas con el mismo y (2) puedan proporcionar resistencia de unión para puentear las grietas en la estructura resultante de hormigón reforzado mediante fibras.

40 Antes de la explicación detallada de los diferentes dibujos mencionados y otras realizaciones a título de ejemplo de la invención, será útil una breve explicación de definiciones para facilitar una comprensión más completa de las ventajas y beneficios de la invención. Dado que las fibras de la invención están previstas para su utilización en una parte pastosa de un "cemento" u "hormigón" húmedo hidratable (términos que en algunos casos podrán ser utilizados en esta descripción de modo intercambiable) es útil explicar de manera preliminar las definiciones de "cemento" y "hormigón".

45 Los términos "pasta", "mortero" y "hormigón" son términos utilizados en esta técnica: las pastas son mezclas compuestas de un material de unión a base de cemento hidratable (usualmente, pero no exclusivamente, cemento Portland, cemento de albañilería o cemento de mortero y también puede incluir cal, cal hidratada, cenizas voladoras, escorias de alto horno, puzolanas y nebulosidades de sílice u otros materiales habitualmente incluidos en dichos cementos) y agua; incluyendo además los morteros y pastas un árido fino (por ejemplo, arenas); e incluyendo los hormigones y morteros adicionalmente un árido grosero (por ejemplo, grava, piedras). Las composiciones "a base de cemento" según la invención se refieren, por lo tanto, e incluyen todos los materiales indicados. Por ejemplo, una composición a base de cemento puede ser formada mezclando las cantidades requeridas de ciertos materiales, por ejemplo, material de unión a base de cemento hidratable, agua y áridos finos y/o groseros, según deseo, con fibras, tal como se describe.

Las fibras de polímeros sintéticos, según la invención, comprenden, como mínimo, un polímero seleccionado del grupo que consiste en polietileno (incluyendo polietilenos de alta densidad, polietileno de baja densidad y polietileno de peso molecular ultraelevado), polipropileno, polioximetileno, poli(fluoruro de vinilideno), poli(metilpenteno), poli(etilen-clorotrifluoroetileno), poli(fluoruro de vinilo), poli(óxido de etileno), poli(tereftalato de etileno), poli(tereftalato de butileno), poliamida, polibuteno y polímeros cristalinos de líquidos termotrópicos. Un polímero sintético preferente es el polipropileno. Los cuerpos de fibras individuales a título de ejemplo de la invención pueden comprender 100% de polipropileno o, según otro ejemplo, pueden comprender de manera predominante polipropileno (por ejemplo, un mínimo de 70-99%) comprendiendo el resto otro polímero (tal como polietileno de alta densidad, polietileno de baja densidad) o bien productos de carga opcionales, coadyuvantes de proceso y/o agentes humectantes tales como se utilizan convencionalmente en la fabricación de fibras de polímeros.

El peso molecular del polímero o polímeros se debe escoger de manera que el polímero sea procesable en fusión. Para el polipropileno y el polietileno, por ejemplo, el peso molecular promedio puede ser de 5.000 a 499.000, y más preferentemente comprendido entre 100.000 y 300.000. Se pueden utilizar diferentes calidades de polietileno, incluyendo los que contienen ramificaciones y comonomeros, tales como buteno, hexeno y octeno, e incluyendo además los materiales de polietileno llamados "metaloceno". Si se utiliza polímero de polipropileno es preferible que se encuentren presentes no más de 30 por ciento en peso aproximadamente de unidades de comonomero polimerizadas o resinas mezcladas a efectos de mantener un proceso operativo suave, siendo preferente una cantidad de hasta 10% aproximadamente. Las resinas de homopolímero de propileno son las más preferentes, encontrándose las resinas de aplicación general en un rango de caudal en fusión nominal de aproximadamente 1 a 40 gramos/10 minutos (ASTM D2497 1995). Las resinas preferentes tienen también una relación de peso molecular promedio en peso a peso molecular promedio en número de aproximadamente 2:1 a aproximadamente 7:1.

La figura 1 es una vista en sección tomada originalmente por unos 100 aumentos de una fibra de polipropileno de la TÉCNICA ANTERIOR con una sección transversal elíptica con dimensiones de 0,96 mm de anchura y 0,63 mm de grosor. La anchura se encuentra próxima al grosor y la fibra se puede torsionar casi igualmente bien en todas las direcciones alrededor de su eje longitudinal.

La figura 1 es una vista en sección transversal, tomada originalmente con unos 100 aumentos, de una fibra de acetato de polivinilo de forma elíptica (u oval), de la TÉCNICA ANTERIOR con 0,78 mm de anchura y 0,42 mm de grosor.

La figura 3 es una vista en sección transversal, originalmente tomada con unos 100 aumentos, de una fibra utilizada comercialmente, fibrilable, con la marca GRACE® Structural Fibers correspondiente a la TÉCNICA ANTERIOR. Esta fibra está diseñada para fibrilarse o fraccionarse en fibrillas más pequeñas cuando se mezcla en hormigón. El perfil en sección transversal se parece a un cacahuete trilobular.

La figura 4 es una vista en sección transversal originalmente tomada con unos 100 aumentos de un cuerpo de fibra individual a título de ejemplo, según la presente invención. El perfil en sección transversal con forma general de cuadrilátero es evidente, por el hecho de que se pueden distinguir cuatro lados, si bien el lado menor de la derecha no es completamente recto. La forma de cuadrilátero se podría caracterizar de manera más precisa por su naturaleza trapezoidal, porque el par de lados más largos (en la anchura) son en general paralelos entre sí, mientras que los dos lados más pequeños forman un cierto ángulo con respecto a los lados más largos y entre sí. Los inventores creen que cuando dichos cuerpos de fibras individuales son cortados a partir de una lámina u hoja más ancha, utilizando cuchillas de corte, el ángulo o disposición de las cuchillas puede definir si los lados más pequeños formarán un ángulo, tal como en un trapecio (en el que los dos lados más pequeños formarán ángulos distintos), un paralelogramo (en el que los dos lados más pequeños, además de los dos lados más largos sean paralelos entre sí) o rectángulo (lados opuestos iguales y ángulos iguales aproximadamente de 90 grados).

El término "cuadrilátero" o "forma general de cuadrilátero", tal como se utiliza en esta descripción significará y hará referencia a un perfil en sección transversal que tiene cuatro lados, de los que, por lo menos dos son en general paralelos entre sí y definen la dimensión de anchura de la fibra. Los dos lados o caras más cortos (que por lo tanto definen el grosor de la fibra) pueden ser o no paralelos entre sí. Los dos lados o caras más cortos pueden no ser rectos, pero podrían adoptar, por ejemplo, una forma cóncava o convexa si las fibras fueran extrusionadas en forma de cuerpos separados en vez de ser cortadas a partir de una lámina u hoja.

La figura 5 es una vista en sección transversal parcial, originalmente tomada a unos 200 aumentos, de un cuerpo de fibras individual a título de ejemplo, según la presente invención, que tiene un grosor medido de 0,19 mm. En esta micrografía a mayor escala, el lado menor es, de forma general, perpendicular a los dos lados más largos (que están separados 0,19 mm). Pero existe una ligera imperfección en las esquinas. Si bien las esquinas más agudas son preferibles porque se cree por los presentes inventores que disminuyen el acoplamiento fibra a fibra, son de esperar ciertos redondeamiento o imperfecciones debido al proceso de fabricación.

La figura 6 es una vista originalmente a 25 aumentos, de la superficie externa de un cuerpo de fibra individual a título de ejemplo de la presente invención. Las fibras a título de ejemplo son sustancialmente no fibrilables cuando se mezclan y se dispersan de manera sustancialmente uniforme en el hormigón. De acuerdo con ello, no existen sustancialmente fracturas por esfuerzo o discontinuidades que se puedan preciar en la superficie

relativamente suave del polímero de las fibras, si bien ciertas rayas e imperfecciones superficiales debidas al proceso de extrusión y/o corte pueden ser apreciadas en la vista ampliada. Los presentes inventores creen que la introducción de cuerpos de fibras individuales no aplanadas mecánicamente dentro del hormigón (hasta el punto de tener microfrazas de esfuerzo en toda la superficie) y que no son fibrilables (que se pueden reducir a fibrillas más pequeñas cuando se someten a agitación mecánica dentro del hormigón) conducirá a características más uniformes de dispersión y de refuerzo debido a proporciones uniformes del área superficial de la fibra con respecto al volumen de la misma y a la integridad estructural de una fibra a otra. Además, la superficie de las fibras de la invención, después de haber sido sometida a agitación mecánica dentro del hormigón que contiene el árido, alcanzará una rugosidad superficial deseable que facilitará la unión de fibras dentro de la matriz de hormigón cuando el hormigón se solidifica.

La figura 7 es una vista a 25 aumentos de la fibra de la figura 6 después de haber sido mezclada en hormigón durante cinco minutos a veinticinco rpm en un mezclador de dos ejes (y retirada a efectos de ilustración en esta descripción. Si bien la superficie de la fibra permanece sustancialmente libre de microfrazas por esfuerzo (por ejemplo, grietas) experimenta una mayor rugosidad u opacidad incrementada debida al efecto del árido en la mezcla del hormigón. A 200 aumentos, tal como se ha mostrado en la figura 8, la superficie de la fibra antes de ser introducida dentro del hormigón se encuentra sustancialmente libre de deformaciones, siendo visible solamente a este nivel de ampliación ligeras rayas e imperfecciones debidas al método de extrusión utilizado para la fabricación de la lámina a partir de la cual se han cortado las fibras individuales. Después de haber sido dispersada sustancialmente de manera uniforme en una mezcla de hormigón, las fibras, tal como se ha mostrado a 200 aumentos en la figura 9 no muestran sustancial fracturas por esfuerzo o fibrilación. No obstante, es apreciable una rugosidad deseable en la superficie cuando se observa a este nivel de ampliación. Asimismo, no es infrecuente que para ampliaciones mayores se aprecie que algunas pequeñas hebras se despeguen del cuerpo de la fibra, pero esto se puede atribuir a tener piezas moleculares separadas entre sí o de otro modo a imperfecciones o rascado y no constituye una fibrilación sustancial cuando el cuerpo de la fibra se divide en pequeñas unidades de fibrillas.

Las superficies de las fibras de polímero de las figuras 10-12 fueron fotografiadas con unos 900 aumentos y muestran diferencias importantes entre las fibras a título de ejemplo de la presente invención (figuras 10, 11) y una fibra aplanada mecánicamente de la TÉCNICA ANTERIOR (tal como se ha mostrado en la figura 12). Las figuras 10 y 11 muestran la superficie de la fibra, respectivamente, antes y después de ser mezclada con hormigón húmedo, utilizando un mezclador de dos ejes (porque tiene paletas contrarrotantes) para obtener una dispersión sustancialmente uniforme de las fibras en el hormigón. El rayado producido por la extrusión, que se aprecia en la figura 10, ha sido transformado en rugosidad, tal como se muestra en la figura 11, pero sin sustanciales fracturas por esfuerzos o discontinuidades sub-superficiales. Incluso después de haber sido mezcladas en el hormigón (que contiene arena y áridos groseros, tales como piedras machacadas o grava), la superficie de la fibra de la presente invención (figura 11) no muestra morfología microfrazada por esfuerzo (por ejemplo, discontinuidades en forma de nervios) tal como se aprecia en las fibras aplanadas mecánicamente de la TÉCNICA ANTERIOR (figura 12), pero no obstante son capaces de proporcionar una superficie deseablemente rugosa y una integridad general y también proporcionar características de capacidad de flexión deseables para conseguir la dispersión de una serie de cuerpos de fibras individuales dentro de la matriz de hormigón.

Tal como se utiliza en esta descripción y se ha utilizado en lo anterior, los términos "pluralidad" de "cuerpos de fibras individuales" se refieren a situaciones en las que una serie de fibras que son idénticas en términos de contenido de material, dimensiones físicas y características físicas son introducidas dentro del material de la matriz. Los cuerpos de las fibras de la invención se encuentran sustancialmente libres de fracturas superficiales por esfuerzo y sustancialmente no son fibrilables cuando se agitan mecánicamente dentro del material de la matriz a reforzar y tienen una forma en sección transversal de cuadrilátero a lo largo de dicho lado alargado. En realizaciones preferentes, la anchura de las fibras promedio debe superar el grosor promedio de las fibras por lo menos en 5:1, pero no más de 50:1 y más preferentemente la proporción de anchura a grosor (para fibras que tienen una longitud promedio de 20-100 mm) es de 5-29 (5:1 a 20:1).

En otras realizaciones a título de ejemplo de la presente invención, una primera pluralidad de fibras individuales se pueden mezclar con una segunda pluralidad de cuerpos de fibras individuales (es decir, comprendiendo materiales distintos, dimensiones físicas distintas y/o propiedades físicas distintas en comparación con la primera pluralidad de fibras) para modificar la composición de la matriz. La utilización de pluralidades adicionales de fibras que tienen diferentes propiedades es conocida en la técnica. Se dan a conocer, por ejemplo, mezclas híbridas de fibras en la patente USA 6.071.613 de Rieder y Berke, y esta utilización de mezcla híbrida se puede aplicar también en asociación con las fibras de la presente invención. Por ejemplo, una primera pluralidad de fibras puede comprender material polímero que tiene geometría, dimensiones, capacidad de carga mínima y capacidad de flexión, tal como se indica por la presente invención, mientras que una segunda pluralidad de fibras puede comprender otro material, tal como acero, cristal, carbono o un material compuesto. Según otro ejemplo, una primera pluralidad de fibras puede tener una característica de flexión específica y/o dimensión física (en términos de anchura, grosor o longitud promedio) mientras que una segunda pluralidad de fibras puede comprender polímeros similares o idénticos y puede utilizar una característica de flexión y/o dimensiones físicas distintas.

Las pluralidades de fibras, tal como se prevén a título de ejemplo en la presente invención, pueden ser dispuestas en una forma, según la cual sean envasadas o conectadas entre sí (por ejemplo, utilizando una bolsa,

envolvente periférica, recubrimiento, adhesivo o, por ejemplo, corte parcial o ranurado de una lámina de un polímero precursor, etc.). No obstante, tal como se ha indicado en lo anterior, los “cuerpos de fibras individuales” de la invención se definen por encontrarse separados de otros cuerpos de fibras o por ser separables de otras fibras cuando se mezclan en el hormigón. Así, por ejemplo, fibras a título de ejemplo, según la invención, se puede decir que comprenden una serie de cuerpos de fibras individuales en los que los cuerpos de fibras individuales están separados entre sí o de manera que los cuerpos de fibras individuales están conectados o parcialmente conectados entre sí pero son capaces de separarse después de haber sido introducidos en la composición de matriz y ser mezclados con la misma (hasta el punto de una dispersión sustancialmente uniforme).

Los presentes inventores creen que la capacidad de flexión de fibras de polímeros individuales se puede controlar de manera más precisa, en parte utilizando el perfil con sección en forma general de cuadrilátero. Los presentes inventores han intentado evitar excesiva flexibilidad, de manera que las fibras quedan envueltas alrededor de otras fibras (o de sí mismas) de manera que se presenta la formación de bolas de fibras. También intentaron evitar una rigidez extrema que se asocia frecuentemente con resistencia porque también ésta puede conducir a la poco deseable formación de “bolas”. Una flexibilidad demasiado elevada (por ejemplo, la del pelo humano húmedo) puede ser tan perjudicial como la rigidez (tal como el juego de los bastones de recogida (“pick-up-sticks”) que juegan los niños) porque se puede producir un autoacoplamiento en cualquiera de los casos. Un elevado grado de formación de fibras o de acoplamiento de fibras significa que no se ha obtenido una dispersión sustancialmente uniforme en el material de la matriz y esto a su vez significa que la dosificación de fibras será inadecuada y que las características de material reforzado por las fibras, estarán sometidas a una variación significativa.

Los presentes inventores creen que para conseguir las mejores características de dispersión, la capacidad de flexión debe ser suficientemente elevada para minimizar la transferencia de esfuerzos entre las otras fibras. Para conseguir este efecto, los inventores creen que las alteraciones en forma y dimensiones de las fibras y en el módulo elástico de las mismas deben ser tomadas en consideración. Por ejemplo, un módulo elástico más bajo aumentará la capacidad de flexión de las fibras si la forma y dimensiones en sección transversal permanecen constantes. Por otra parte, los inventores creen también que es necesario tomar en consideración el módulo elástico del material de la matriz a reforzar. Para fibras de polipropileno, el módulo elástico se encuentra en un rango de 2-10 Giga Pascals y para un material de matriz, tal como hormigón (endurecido) el módulo elástico se encuentra en un rango de 20 a 30 Giga Pascals, dependiendo del diseño de mezcla utilizado. Los presentes inventores creen que para mejorar las propiedades del material de la matriz (hormigón endurecido) especialmente para pequeñas aberturas de grietas o flexiones, el módulo elástico de las fibras puede ser preferentemente, como mínimo, tan elevado como el módulo elástico del material de la matriz (hormigón endurecido). Tal como se ha mencionado en lo anterior, un incremento del módulo elástico significa usualmente una disminución de la capacidad de flexión, lo que tiene un impacto negativo en las características de dispersión de la pluralidad de fibras. Por lo tanto, a efectos de mantener elevada la capacidad de flexión, los presentes inventores han elegido modificar tanto la forma como el área en sección transversal de las fibras individuales. Pruebas de rotura de muestras de hormigón que contenían las fibras han indicado que se necesita una capacidad de resistencia de carga en tracción (y no un esfuerzo de tracción mínimo) de las fibras para transferir esfuerzos significativos a través de un elemento de hormigón con grietas. Esto ayuda también a mantener el número de fibras por unidad de volumen de hormigón en un número reducido y esta exigencia de dosificación más baja tiene un efecto positivo en términos de mejora de la capacidad de manipulación del hormigón reforzado con fibras recién preparado. Es un hecho bien conocido que las microfibras (que tienen diámetros de 20-60 micras) que se añaden al hormigón para control de la formación de grietas por retracción (en vez de refuerzo estructural, por ejemplo), no se pueden añadir en grandes volúmenes debido al elevado número de fibras por unidad de peso (por ejemplo, elevada área superficial). Las proporciones de dosificación típicas para estas fibras varían de 0,3 kg/m<sup>3</sup> a 1,8 kg/m<sup>3</sup> (0,033% en vol. a 0,2% en vol.). Las fibras añadidas para estas proporciones de dosificación bajas no tienen efecto significativo en las características del hormigón endurecido. Las fibras que se supone que tienen un efecto en las características del hormigón endurecido deben ser añadidas en volúmenes más grandes debido a los esfuerzos significativamente más elevados que se deben transferir a través de elementos de hormigón con grietas.

De manera ideal, los presentes inventores creen que las fibras utilizadas en una estructura de hormigón que presentan grietas proporcionan un equilibrio entre el anclaje en el hormigón y la extracción del mismo. En otras palabras, aproximadamente la mitad de las fibras que atraviesan la grieta deben funcionar para tirar del hormigón, mientras la otra mitad de las fibras que abarcan la grieta se deben romper por completo en un momento en el que la estructura del hormigón es extraída por completo de la grieta. Por lo tanto, fibras a modo de ejemplo de la presente invención son diseñadas con dimensiones físicas determinadas que combinan la dispersabilidad con tenacidad para el objetivo propuesto.

Un proceso a título de ejemplo para la fabricación fibras de la invención comprende: extrusión en fusión de materiales polímeros sintéticos (por ejemplo, polipropileno, mezcla de polipropileno-polietileno) a través de una matriz para formar una hoja o lámina, enfriando la hoja o lámina extrusionada (por ejemplo, utilizando un rodillo de enfriamiento, haciendo pasar la hoja por un baño de refrigeración y/o utilizando un ventilador de refrigeración); cortar la hoja para proporcionar fibras individuales separadas (por ejemplo, tirando de la hoja atravesada por cuchillas metálicas o cuchillas rotativas), de manera que se obtiene una sección transversal de forma general de cuadrilátero (que tiene preferentemente las dimensiones de anchura promedio y grosor que se han descrito anteriormente de manera detallada); estirar el polímero en dirección longitudinal de las fibras con un factor de, como mínimo, 10 a 20

y preferentemente por un factor de 12 a 16. Después de las fases de estirado y corte, las fibras individuales pueden ser cortadas para formar cuerpos individuales que tienen longitudes promedio de 20-75 mm. Por lo tanto, las fibras individuales a título de ejemplo de la invención tendrán cuerpos alargados, comprendiendo uno o varios polímeros sintéticos, poseyendo una orientación (proporción de estirado) en la dirección de la longitud de los cuerpos de las fibras (orientación longitudinal) mínima de 10-20 y más preferentemente 12-16.

Otro método a título de ejemplo para fabricar las fibras con una sección transversal de forma general de cuadrilátero comprende la extrusión del polímero o material polímero a través de un orificio de matriz en forma de estrella de cuatro puntas, estirar las fibras extrusionadas según un factor de 10-20 (y más preferentemente en un factor de 12-16) y cortar las fibras estiradas a longitudes de 20-75 mm. En otras realizaciones a título de ejemplo, se pueden extrusionar fibras que tienen formas redondas o elípticas y cuando se encuentran todavía a temperatura elevada, pueden ser introducidas entre rodillos (opcionalmente calientes) para aplanar las fibras adoptando una forma general de cuadrilátero (si bien en este caso, las caras menores de las fibras pueden tener una forma ligeramente arqueada o convexa).

Además de las realizaciones de cuerpos de fibras que se han mencionado, son posibles todavía otras realizaciones de fibras, a título de ejemplo. Por ejemplo, los cuerpos de fibras individuales pueden tener una variabilidad de grosor y/o anchura según la longitud de fibras individuales de, como mínimo, 2,5% de desviación (y más preferentemente, como mínimo, 5,0% de desviación) y preferentemente no más de 25% de desviación con respecto al promedio (grosor y/o anchura). Por ejemplo, puede ser posible durante el corte de la hoja de polímero que las cuchillas sean desplazadas hacia detrás y hacia delante, de manera que la anchura de las fibras se puede variar dentro de una longitud de 20-75 mm de los cuerpos de fibras individuales.

En otras realizaciones a título de ejemplo, los cuerpos de fibras individuales pueden comprender, como mínimo, dos polímeros sintéticos, uno de dichos dos polímeros sintéticos comprende un polímero soluble en medio alcalino dispuesto sobre la superficie de la fibra dirigida hacia fuera, siendo operativo para la disolución cuando dichos cuerpos de fibras se mezclan en el medio alcalino de una mezcla de hormigón húmedo. De manera alternativa, los cuerpos de fibras individuales pueden ser dotados de recubrimiento con un polímero soluble en medio alcalino. Cuando se disuelve en el ambiente alcalino de una mezcla de hormigón húmedo, la superficie externa de la fibra podría ser incrementada para mejorar el anclaje con el hormigón una vez endurecido. Un material polímero soluble en medio alcalino (elevado pH) adecuado para su utilización en la presente invención podría comprender, por ejemplo, polímeros de ácidos carboxílicos no saturados.

Las fibras de la invención a título de ejemplo, pueden ser envasadas con una o varias añadiduras, tal como se conoce en la técnica del hormigón. Mezclas a título de ejemplo comprenden superplastificantes, reductores de agua, arrastradores de aire, eliminadores de aire, inhibidores de corrosión, aceleradores de fraguado, retardadores de fraguado, mezclas reductoras de retracción, cenizas voladoras, vaporizaciones de sílice, pigmentos o una mezcla de los mismos. El material o materiales de adición se pueden seleccionar, por ejemplo, a partir de la patente USA 5.203.692 de Valle y otros. Las fibras pueden ser también recubiertas con agentes humectantes u otros materiales de recubrimiento, tal como pueden ser conocidos por los técnicos ordinarios en la industria del hormigón.

Otras características y ventajas en las fibras a título de ejemplo, composiciones de matriz y procesos de la invención quedarán ilustradas haciendo referencia a los siguientes ejemplos.

### Ejemplo 1

#### **(TÉCNICA ANTERIOR)**

Se comprobaron fibras, según la técnica anterior, con sección transversal elíptica, en términos de capacidad de flexión y dispersabilidad en una mezcla de hormigón. Estas fibras elípticas tenían 50 mm de longitud, 1,14 mm de anchura, 0,44 mm de grosor, y un módulo elástico de Young de 4 Giga Pascal. La fórmula de "capacidad de flexión" explicada anteriormente puede ser utilizada, en la que se calcula la capacidad de flexión "B" como  $B = 1/(3 \cdot E \cdot I)$ , y el momento de inercia "I" para elipses se calcula mediante la fórmula  $I_{\text{elipse}} = \text{Pi}/64 \cdot a \cdot b^3$ , siendo "a" la mitad de la anchura de la fibra elíptica (eje principal de la elipse, es decir, dimensión de mayor anchura pasando por el centro) y "b" es la mitad del grosor de la fibra elíptica (eje menor de la elipse, es decir, dimensión menor pasando por el centro de la elipse). La flexión "B" fue calculada en un valor de  $17,5 \text{ mN}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . Esa fibra se considera una fibra "rígida". Se requirieron 30 minutos para la introducción de 100 libras de estas fibras elípticas en 8 yardas cúbicas de hormigón. El hormigón permaneció en el tambor de un camión hormigonera y se hizo girar a 15 revoluciones por minuto (rpm). Se observó una excesiva formación de bolas de fibras. Las fibras elípticas no se dispersaron en este hormigón.

### Ejemplo 2

En contraste con las fibras elípticas de la técnica anterior del Ejemplo 1, se utilizaron fibras que tenían una sección transversal con forma general de cuadrilátero. Estas fibras con sección de cuadrilátero tenían las siguientes dimensiones promedio: 50 mm de longitud, 1,35 mm de anchura, y 0,2 mm de grosor, con un módulo elástico de Young de 9 Giga Pascal. La capacidad de flexión "B" de estas fibras se calculó de acuerdo con la fórmula,  $B = 1/(3 \cdot E \cdot I)$ , en la que el momento de inercia "I" para la sección rectangular se calculó de acuerdo con la fórmula

$I_{\text{rectángulo}} = 1/12 \cdot w \cdot t^3$ , en la que “w” es la anchura promedio y “t” es el grosor promedio del rectángulo. Utilizando esta ecuación, se calculó la capacidad de flexión “B” con el valor  $41,2 \text{ mN}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . Esta fibra se considera flexible. Cuando se introdujeron 100 libras de estas fibras en 8 yardas cúbicas de hormigón, dispuestas en un camión hormigonera y se hizo girar a la misma velocidad que en el Ejemplo 1, se consiguió una distribución homogénea de las fibras en solamente 5 minutos. No se observó formación de bolas de fibras.

### **Ejemplo 3**

Las características mecánicas de las fibras tienen en sí mismas un gran impacto en el comportamiento de las fibras en el hormigón, si existe suficiente unión entre las fibras y la matriz frágil del hormigón. Si las fibras no se han unido bien con la matriz (por ejemplo, si la extracción de fibras como mecanismo de fallo de fibras principal observado cuando el hormigón reforzado por fibras es separado por rotura), entonces las características de las fibras tendrán un impacto mínimo en el comportamiento del material compuesto. Tal como se ha mencionado anteriormente, debido a la geometría de las fibras y a los rangos dimensionales seleccionados inventivamente por los inventores presentes, se puede obtener de manera ideal suficiente adherencia de unión entre los materiales de la matriz (endurecidos) y las fibras consiguiendo, de manera ideal, medio fallo de las fibras (rotura) y media extracción. Por lo tanto, se seleccionaron características de las fibras tales como módulo de elasticidad, resistencia a la tracción y mínima capacidad de soportar cargas a efectos de mantener de la manera más próxima posible el equilibrio 50:50 entre la extracción de fibras y rotura de las mismas. Las características mecánicas óptimas de las fibras dependerán en gran medida de la resistencia de la matriz: una mayor resistencia de la matriz requerirá fibras con un módulo elástico más elevado, resistencia a la tracción más elevada y mayor capacidad mínima de soporte de cargas.

Todas las pruebas mecánicas llevadas a cabo en las propias fibras tienen que ser realizadas en tracción directa (es decir, dirección longitudinal), que es también la forma en la que se rompe las fibras una vez embebidas en el hormigón endurecido. (Las máquinas comercialmente disponibles para esta comprobación son disponibles de fuentes conocidas tales como Instron o Material Testing Systems). Para estas pruebas mecánicas, un filamento de fibras, usualmente con una longitud de 100 mm, está fijado por ambos extremos por pinzas de fibras especiales que no permiten el deslizamiento de las fibras. La fibra es ligeramente pre-tensada (se miden menos de 2 Newton de carga). Una célula de carga mide la carga de tracción mientras que la fibra es extraída a una velocidad constante. Las tasas típicas de carga varían de 25mm/min. a 60mm/min. La deformación se mide utilizando un extensómetro, que es fijado en la muestra. La deformación se define como el cambio de longitud dividido por la longitud inicial (también llamada la longitud de galgado) multiplicado por 100 y se registra en términos de porcentaje. El valor de galgado inicial para las mediciones se determinó en 50 mm.

La figura 13 muestra varias curvas de carga con respecto a la deformación de fibras con diferentes áreas en sección transversal. Las fibras con el número (1) son más delgadas que las fibras con el número (2). Las letras “A”, “B”, “C” se refieren a la anchura de las fibras: “A” es la fibra con la anchura más reducida, mientras que “C” es la fibra con la anchura mayor. Por lo tanto, la fibra con la sección transversal más reducida es la fibra “1A”, mientras que la fibra con la mayor sección transversal es la fibra “2C”.

Estas curvas dadas a conocer en este ejemplo muestran que una fibra con un área reducida en sección transversal tiene una capacidad de soporte de carga mucho más reducida que una fibra con un área de sección transversal más grande. Los cuerpos de fibras individuales deberían tener una capacidad de carga mínima tal que una pluralidad de fibras proporcionará de manera cumulativa una capacidad total de carga que supera el esfuerzo de tracción a la que se ha roto el material de la matriz de hormigón (es decir, el esfuerzo típico para la rotura de la matriz de hormigón está comprendido en el rango de 2 a 5 Mega Pascals). Los inventores creen que una capacidad de carga mínima (en tracción) de las fibras es necesaria a efectos de transmitir los esfuerzos de manera efectiva y también para mantener reducido el número de fibras individuales. Al mantener reducido el número de fibras individuales, la capacidad de manipulación del hormigón reciente se puede mantener.

### **Ejemplo 4**

La figura 14 muestra las curvas de esfuerzo de tracción en comparación con la deformación de las fibras descritas en los ejemplos anteriores. “Esfuerzo” se define como la carga dividida por la sección transversal de la fibra. La pendiente de la parte inicial de la curva ascendente es directamente proporcional al módulo elástico del material de la fibra. Tal como se ha indicado antes, el módulo elástico de las fibras debe ser preferentemente lo más próximo posible al módulo elástico del material de la matriz, a efectos de transferir cargas de tracción a través de las grietas de la matriz inmediatamente después de haberse iniciado. Por otra parte, un módulo elástico más elevado disminuye la capacidad de flexión (es decir, aumenta la rigidez) de las fibras; los inventores han descubierto que ello disminuye la dispersabilidad de las fibras en el hormigón húmedo. Para minimizar el efecto adverso de un módulo elástico elevado sobre la capacidad de flexión de la fibra, los inventores han seleccionado un perfil con sección transversal con forma general de cuadrilátero y han seleccionado una fibra más delgada y una fibra más ancha.

Las curvas que representan el esfuerzo con respecto a la deformación que se muestra en la figura 14, indican que los módulos elásticos y los esfuerzos de tracción de las diferentes muestras de fibras son aproximadamente los mismos (hasta 7% aproximadamente de deformación). No obstante, tal como se ha mostrado

en la figura 16, la utilización de diferentes dimensiones en sección transversal tiene un efecto profundo en el comportamiento de las diferentes muestras de fibras en el hormigón.

**Ejemplo 5**

5 El efecto de diferentes geometrías de las fibras, así como diferentes capacidades mínimas de soporte de  
 10 cargas sobre las características mecánicas del hormigón reforzado con fibras, se pueden estudiar utilizando pruebas  
 de rotura. Los principios básicos de una prueba de rotura llevada a cabo sobre un material determinado consisten en  
 someter a una muestra (en este caso, el hormigón reforzado con fibras) a una carga que inicia la formación de  
 grietas de manera controlada, midiendo simultáneamente la carga aplicada y la deformación y eventual formación de  
 grietas en la muestra. Una prueba adecuada para el hormigón es la Prueba de Rotura por Cuña, que se basa en una  
 geometría de muestra modificada de Tracción Compacta ("Compact-Tension"). La disposición de la prueba se  
 describe en la patente austríaca AT 390.328 B (1986) y también en la patente austríaca AT 396.997 B (1996).

15 La figura 15 muestra un dispositivo típico de rotura mediante cuña uniaxial que se puede utilizar para medir  
 carga en materiales de hormigón. Una muestra con forma de cubo de hormigón con una ranura descansa sobre un  
 soporte lineal (que es muy parecido a una cuchilla con canto romo) es cortada con un equipo de transmisión de  
 carga situado en una ranura rectangular que se extiende verticalmente hasta la parte superior de la muestra de  
 hormigón. El equipo de transmisión de carga consiste en una cuña delgada (a) y dos piezas (b) de transmisión de  
 carga con cojinetes de agujas integrados. El desplazamiento de la abertura de la embocadura de la grieta (CMOD)  
 es medida mediante dos transductores electrónicos de desplazamiento (galgas Linear Variable Differential  
 Transducer o "LVDT") situadas sobre lados opuestos de la grieta. Ambos LVDT (d) son montados de manera  
 20 relativamente simple sobre el dispositivo de medición CMOD (c) que está fijado a la muestra mediante tornos  
 roscados.

25 La grieta se inicia en el fondo de la ranura inicial y se propaga de manera estable desde la ranura inicial  
 hacia la parte superior de la muestra de hormigón hacia el soporte lineal por debajo de la muestra. Para obtener una  
 curva de carga con respecto al desplazamiento, los dos sensores de desplazamiento de la abertura de la  
 embocadura de la grieta, CMOD1 y CMOD2, y la carga aplicada (descendente con intermedio de la cuña) se  
 registran simultáneamente.

30 Para mantener una velocidad aproximadamente constante de apertura de la grieta, la prueba es realizada  
 con una máquina de pruebas rígida con una velocidad constante de la cruceta de 0,5 mm/min. a 1,0 mm/min.,  
 dependiendo del ángulo de la cuña. La carga aplicada por la máquina,  $F_M$ , el desplazamiento vertical,  $\delta_V$ , y el  
 desplazamiento de la abertura de la embocadura de la grieta, CMOD, se registran simultáneamente, como mínimo, a  
 cada segundo. La energía de la fractura,  $G_F$ , que es una medida de la energía requerida para ensanchar la grieta, se  
 determina de la curva de carga-desplazamiento utilizando la fórmula,

$$G_F = \frac{1}{B \cdot W} \cdot \int_0^{CMOD_{max}} F_H(CMOD) \cdot d(CMOD)$$

con

35 
$$CMOD = \frac{1}{2}(CMOD1 + CMOD2)$$

en la que "B" es la altura del ligamento, "W" es la anchura del ligamento (B por W es el área superficial de la grieta) y  
 "F<sub>H</sub>" es la carga de rotura horizontal que se puede calcular utilizando la siguiente fórmula,

$$F_H = \frac{F_M + m_w \cdot 9.81}{2 \cdot \tan(\alpha/2)}$$

en la que "F<sub>M</sub>" es la carga aplicada por la máquina, "m<sub>w</sub>" la masa de la cuña de rotura, y "α" es el ángulo de la cuña.

40 Como medición para la energía para el inicio de la grieta, la proporción de liberación de energía crítica "G<sub>IC</sub>"  
 se calcula (se supone deformación en un plano):

$$G_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2}{E} \quad \text{with} \quad K_{Ic} = k \cdot F_{H,max}$$

en la que “ $K_{Ic}$ ” es el factor de intensidad de esfuerzo crítico que es proporcional a la carga máxima de rotura “ $F_{H,max}$ ”. La constante “ $k$ ” depende de la geometría de la muestra y se puede calcular por un programa de elementos finitos.

El factor de esfuerzo “ $K_I$ ” se define de la manera siguiente:

$$K_I = k \cdot F_H$$

en la que “ $F_H$ ” es la carga horizontal medida durante la fractura de la muestra. El factor de esfuerzo no depende de las dimensiones de la muestra, que se puede realizar para comparar el comportamiento de diferentes muestras y diferentes materiales.

El efecto de las fibras en las características mecánicas del material compuesto se puede apreciar después de haber iniciado una grieta. La figura 16 muestra el comportamiento de deformación-abertura de la grieta de diferentes geometrías de fibras y diferentes materiales de las fibras. Cuanto mayor es el área por debajo de la curva, más energía puede absorber el material compuesto hasta llegar a la rotura. Este fenómeno se llama también “tenacidad” de un material. Cuanto mayor es la “tenacidad” del material con ciertas dosis de fibras (% en volumen), mayor es la resistencia a la propagación de grietas del material. Si una determinada fibra alcanza una tenacidad similar para una dosificación menor, en comparación con otras fibras, entonces esta fibra se considerará una fibra de refuerzo más efectiva.

La figura 16 muestra que las fibras planas, sustancialmente no fibrilables, según la presente invención, son mucho más eficaces cuando se comparan con el comportamiento de fibras fibrilables de dimensiones similares (cuando se introducen inicialmente en el hormigón) con una dosis similar. La figura 16 demuestra también que el comportamiento de una fibra plana PVA (utilizada con una dosis un 25% superior) con respecto a la resistencia a la propagación para pequeñas aperturas de grietas, es ligeramente mejor que la de otras fibras. No obstante, para aberturas de grietas más grandes, las fibras planas, a título de ejemplo, según la presente invención, tienen un rendimiento claramente mejor que las fibras PVA en la resistencia de deformaciones más elevadas.

Otras realizaciones a título de ejemplo de la invención proporcionan fibras sintéticas, y materiales de matriz que comprenden dichas fibras, que son particularmente apropiadas para retener un acabado suave cuando están embebidas en materiales de matriz tales como hormigón. A este respecto, los inventores creen que la capacidad de flexión de las fibras es una clave importante para obtener capacidad de acabado. Las fibras que no son suficientemente flexibles tienden a abombarse después de que el dispositivo de acabado del hormigón ha intentado suavizar (acabar) la superficie del hormigón.

Los inventores creen que la capacidad de acabado es la función de la capacidad de flexión y de longitud de las fibras. Para alcanzar el mismo tipo de capacidad de acabado (en el que las fibras no sobresalen de la superficie del hormigón acabado), las fibras más largas deben ser más flexibles (es decir, deben tener una mayor capacidad de flexión) que las fibras cortas.

Por ejemplo, una fibra con una longitud de 40 mm, un grosor de 0,105 mm, y una anchura de 1,4 mm (con un módulo de Young de 9,5 GPa) se puede observar que tiene unas buenas propiedades de distorsión y excelentes características de acabado. Las fibras que contienen una longitud de 40 mm, un grosor de 0,14 mm, y una anchura de 1,4 mm (con un módulo de Young de 9,5 GPa) muestran aceptables características de dispersión (por ejemplo, un menor número de bolas de fibras por camión cuando se añaden de la misma manera que en las fibras anteriores con mayor capacidad de flexión), pero no tienen tan buen acabado como las fibras antes mencionadas. Cuando se añaden fibras similares, con una longitud de 50 mm, a un camión hormigonera, se puede observar más fibras saliendo de las superficies a pesar de tener la misma capacidad de flexión.

De esta manera se descubrió por los presentes inventores que fibras a título de ejemplo, tal como se han descrito, pueden tener excelentes características de tenacidad para diferentes niveles de resistencia a la compresión. Por ejemplo, con un valor de 0,5% o 4,6 kg/m<sup>3</sup> de las fibras, el  $R_{e,3}$  puede conseguir un valor de más del 50% con una resistencia a la compresión del hormigón comprendida entre 10 y 35 MPa lo que es adecuado para pisos (medidos de acuerdo con ASTM C 1018 (1997) o JCI-SF 4 sobre una viga de 150 por 150 por 500 mm<sup>3</sup>). A este respecto, el valor  $R_{e,3}$  representa el factor de ductilidad de una muestra de hormigón reforzada con fibras (por ejemplo, una viga) y ello puede ser calculado como proporción de la resistencia a la flexión equivalente (medido después de formación de grietas y con una flexión de 3 mm, de manera que las fibras puentean la grieta) dividido por la resistencia a la flexión original de la viga (primera resistencia de la grieta). Ver ASTM C 1018 (1997). El valor  $R_{e,3}$  fue hallado para una diferente dosis de fibras, dependiendo de la resistencia de la matriz de hormigón, en especial la mayor resistencia del hormigón (por ejemplo, en un rango superior a 35 MPa). La sección transversal de

las fibras se incrementó de manera tal que la resistencia a la tracción aumentó, mientras que se mantuvo la apropiada capacidad de flexión para conseguir un buen acabado y dispersión. Los inventores han conseguido ese efecto aumentando la anchura y reduciendo el grosor. La longitud de la fibra se ajusta también para hacer máximo el valor de  $R_{e,3}$ .

5 Los inventores han descubierto también que en hormigón premezclado para proyección, fibras con mayor capacidad de flexión tenían un valor de recuperación más bajo en comparación con fibras menos flexibles. En otras palabras, el impacto del material proyectado no tuvo rebote (es decir, recuperación de la superficie proyectada).

10 Además los inventores creen que la longitud y capacidad de flexión de las fibras afectan notablemente la capacidad de acabado de un piso de hormigón. Fibras más largas con el mismo índice de flexión no tienen una capacidad de flexión igual a las fibras más cortas (es decir, tienden a sobresalir en mayor medida de la superficie del hormigón después de haber sido alisado). La magnitud en la que las fibras "sobresalen" se cree que está directamente relacionada con la magnitud de la energía elástica almacenada en las fibras que están siendo empujadas hacia abajo o hacia dentro de la superficie del hormigón por el movimiento de alisado o suavizado de la persona que está realizando el acabado. Cuanto mayor es la energía necesaria para empujar las fibras hacia dentro de la superficie de hormigón, mayor es la probabilidad de que las fibras sobresalgan nuevamente. Al tomar en consideración esta relación, los inventores han observado que la energía elástica almacenada depende parcialmente del nivel de frenado o restricción de la flexión otorgado a las fibras por las partes embebidas en el material de hormigón, parcialmente al sobresalir la longitud expuesta de las fibras con respecto a la superficie del hormigón y parcialmente por la capacidad de flexión de las fibras.

20 Por esta razón, los inventores suponen que las fibras más largas tenderán, como promedio, a tener partes más grandes de su longitud embebidas en la masa de hormigón, proporcionando de esta manera un mayor frenado en el punto de flexionado. Este mayor frenado tenderá a incrementar la energía elástica almacenada en las fibras durante el proceso de acabado; y ello, a su vez, tenderá a incrementar la incidencia de la salida de fibras de la superficie terminada. No obstante, en el caso de fibras más cortas que tienen la misma capacidad de flexión, la longitud embebida es probable que sea más corta como promedio, y, por lo tanto, se impondría una retención menor en el punto de doblado. Por lo tanto, la magnitud menor de energía elástica almacenada en fibras más cortas hace que provoquen con menor probabilidad la salida de fibras en la superficie del hormigón. En otras palabras, las fibras más cortas tienden a salir y desplazarse con el dispositivo de aplanado o llana y otros dispositivos de acabado superficial más fácilmente en una superficie de hormigón sometida a acabado del hormigón, y se cree que ello es debido a la menor retención de las fibras más cortas que provocan que las fibras se apliquen con menor energía de flexión elástica almacenada en las fibras.

25 Por lo tanto, para conseguir una capacidad de acabado similar, una fibra más larga necesitará tener mayor capacidad de flexión para minimizar la energía elástica almacenada en la fibra, lo que de otro modo tenderá a forzar las fibras a salir de la superficie de hormigón acabada.

35 El módulo de elasticidad, llamado también módulo de Young, es la constante que relaciona la deformación y el esfuerzo para un material linealmente elástico. En términos prácticos, el módulo de elasticidad es una medición de la rigidez del material. Cuanto mayor es el módulo de elasticidad más rígido es el material. El módulo de elasticidad es determinado por la composición química. El módulo de elasticidad puede ser expresado en término de libras por pulgada cuadrada ( $lb/in^2$ ) y también en términos de MegaPascals (MPa). Un (1) MPa es igual a un (1) Newton/ $mm^2$ .

40 Tal como se muestra en la figura 17, una curva típica de esfuerzo-deformación puede ser utilizada para ilustrar características físicas de un material. El número (1) mostrado en la figura 17 muestra la pendiente de la curva deformación-esfuerzo correspondiente a la naturaleza elástica del material, y se hace referencia a ello como módulo de elasticidad. Por definición el límite proporcional que se indica en la figura 17 con el número (2) representa el primer punto en el que el comportamiento elástico de la curva deformación-esfuerzo no es lineal. Este punto se puede interpretar como límite de elasticidad, puesto que más allá del mismo la muestra empezará a mostrar deformación permanente después de la retirada de la carga, debido a deformación plástica.

45 El momento de inercia describe la característica del material en resistir cualquier cambio en rotación. El momento de inercia,  $I$ , para un área de una forma específica (por ejemplo rectángulo, elipse o círculo) se puede calcular utilizando la fórmula apropiada:

$$I_{\text{rectángulo}} = \frac{1}{12} \cdot w \cdot t^3 \quad I_{\text{elipse}} = \frac{\pi}{64} \cdot a \cdot b^3 \quad I_{\text{círculo}} = \frac{\pi}{64} \cdot D^4$$

en la que "w" representa la longitud, "t" representa la anchura (del rectángulo), "a" representa el eje principal y "b" el eje menor de la elipse, y "D" representa el diámetro del círculo.

La capacidad de flexión de las fibras se puede definir como la resistencia de la fibra en cambiar su forma cuando se aplica una carga externa. Una fibra se denominará más flexible si requiere menos fuerza para su flexión o doblado en un cierto grado. La flexibilidad de doblado de una fibra es una función de la forma, sección transversal y módulo de elasticidad. La capacidad de flexión (B) de una fibra se puede calcular utilizando la fórmula:

$$B = \frac{1}{3 \cdot E \cdot I}$$

5

Utilizando la fórmula anterior, la capacidad de flexión (B) de una fibra de 1,2 mm de ancho y 0,38 mm de grueso con una sección transversal elíptica con un módulo elástico de 4 GPa es de  $26,2 \text{ mN}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Esta fibra se considera una fibra rígida. Cuando estas fibras se añaden a un hormigón en un camión hormigonera (100 libras de fibras añadidas a una carga de hormigón de 8 yardas cúbicas en 30 minutos, mientras el tambor giraba a 15 rpm), se observó una "formación de bolas" excesiva y una capacidad de acabado muy pobre. Las fibras no se dispersaron dentro del hormigón sino que haces de fibras permanecieron juntos.

10

Otro ejemplo comporta fibras planas de 50 mm de longitud que tenían una anchura de 1,4 mm y 0,2 mm de grosor con un módulo elástico de 9 GPa. La capacidad de flexión (B) es de  $39,7 \text{ mN}^{-1} \text{ m}^{-2}$  utilizando la fórmula anterior. Esta fibra se considera una fibra más flexible. Cuando estas fibras se añadieron al hormigón de la misma forma que en el ejemplo anteriormente descrito con la fibra rígida pero solamente en 5 minutos, se observaron menos bolas de fibras. Se consiguió una distribución homogénea de las fibras en la mezcla del hormigón debido a la naturaleza más flexible de las fibras. La capacidad de acabado mejoró en comparación con el ejemplo anterior, pero no era todavía satisfactoria para todas las aplicaciones.

15

Otro ejemplo comporta fibras planas con una longitud de 40 mm y con una anchura de 1,4 mm y grosor de 0,105 mm con un módulo elástico de 9,5 GPa. La capacidad de flexión (B) es de  $259,8 \text{ mN}^{-1} \text{ m}^{-2}$  utilizando la fórmula anterior. Esta fibra se considera una fibra altamente flexible. Cuando estas fibras son añadidas al hormigón de la misma manera que en el ejemplo anteriormente descrito también en sólo 5 minutos, no se observaron bolas de fibras. Se consiguió una distribución homogénea de fibras en la mezcla de hormigón debido a la naturaleza altamente flexible de las fibras. Se consiguió un acabado excelente de manera continuada con esta fibra.

20

Cuando la capacidad de acabado de la fibra (A) con una capacidad de flexión de  $39,7 \text{ mN}^{-1} \text{ m}^{-2}$  se comparó con la capacidad de acabado de una fibra (B) con una capacidad de flexión de  $259,8 \text{ mN}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , se hicieron las siguientes observaciones. Después de terminado el hormigón, la fibra (A) tendía a salir de la superficie del hormigón después de que la llana motorizada la había empujado hacia abajo (el hormigón mostraba "salientes descentrados" ("goose bumps")). Por otra parte, cuando se aplicó el mismo acabado a un hormigón que contenía la fibra (B), las fibras permanecieron dentro de la superficie del hormigón. La energía elástica almacenada en las fibras era demasiado reducida para hacer que salieran de la superficie. Después del acabado con la llana motorizada, casi no eran visibles fibras en la superficie del hormigón cuando se inspeccionó la placa de hormigón un día más tarde.

25

30

Para una fibra con características de dispersión optimizadas, la capacidad de flexión tiene que ser suficientemente elevada para minimizar la transferencia de deformación entre fibras. Para conseguir este efecto, la forma y tamaño o módulo elástico de la fibra, se pueden cambiar. Un módulo elástico más bajo incrementa la capacidad de flexión de la fibra si la forma y tamaño de la sección transversal permanecen sin cambios. Para las fibras de polipropileno, el módulo elástico se encuentra en valores de 3 a 20 GPa (a efectos de comparación, el hormigón tiene un módulo elástico de 20 a 30 GPa dependiendo del diseño de mezcla utilizado. Para mejorar las características de endurecimiento en términos de tenacidad de un hormigón reforzado con fibras, especialmente para pequeñas aberturas de las grietas (hasta 1 mm), el módulo elástico de las fibras debe ser preferentemente, como mínimo, tan elevado o más elevado que el modo elástico de la matriz (hormigón). Tal como se ha explicado anteriormente, un módulo elástico más elevado disminuye la capacidad de flexión, lo que tiene un efecto negativo sobre las propiedades de dispersión de las fibras. Para mantener una elevada capacidad de flexión, la forma y sección transversal de las fibras se tienen que cambiar. Pruebas de rotura demostraron que se requiere una capacidad mínima de carga bajo tracción (SIN esfuerzo de tracción mínimo) de las fibras a efectos de poder transferir esfuerzos significativos a través de una sección de hormigón agrietada. Esto ayuda también a mantener el número de fibras por porcentaje en volumen en un valor reducido, lo cual tiene un efecto positivo en la capacidad de manipulación de un hormigón reciente reforzado con fibras. Es un factor bien conocido que las microfibras (que tienen diámetros de 20 a 60 micras) añadidas básicamente para hacer mínima la formación de grietas debido a la retracción plástica del hormigón, no se pueden añadir normalmente en un volumen grande teniendo en cuenta la elevada relación del número por unidad de peso. Las tasas típicas de dosificación varían de  $0,3 \text{ kg/m}^3$  a  $1,8 \text{ kg/m}^3$  (0,03% en vol. a 0,2% en vol.), de manera que las fibras no afectan significativamente las características del hormigón endurecido. Las fibras destinadas a afectar el hormigón endurecido (es decir, reforzar) requiere normalmente un volumen de adición más elevado para transferir esfuerzos significativos a través de las grietas del hormigón.

35

40

45

50

55

Fibras, según la invención, a título de ejemplo, que se cree que proporcionan excelente capacidad de acabado a la superficie de materiales hidratables con base de cemento, comprenden: una pluralidad de cuerpo de

5 fibras individuales que tienen una longitud alargada definida entre dos extremos opuestos y que comprenden, como mínimo, un polímero sintético, encontrándose los cuerpos de fibras individuales sustancialmente libres de roturas por esfuerzo y siendo sustancialmente no fibrilables cuando se agitan mecánicamente dentro del material de la matriz a reforzar, de manera que en dicha serie de cuerpos de fibras individuales, la capacidad de flexión promedio de dichos  
 10 cuerpos de fibras es de  $100-2.500 \text{ mN}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . Las fibras con alta capacidad de acabado tienen también las siguientes propiedades: módulo de elasticidad de Young de 4-20 Giga Pascals, resistencia a la tracción de 400-1.600 Mega Pascals. Los cuerpos de fibras individuales se encuentran sustancialmente libres de roturas por esfuerzo y son sustancialmente no fibrilables cuando son agitados mecánicamente dentro del material de matriz a reforzar, teniendo los cuerpos de las fibras una forma general en sección de cuadrilátero a lo largo de dicho lado alargado, poseyendo  
 15 dimensiones de anchura, grosor y longitud de manera que la anchura promedio es de 1,0-5,0 mm, el grosor promedio es de 0,05-0,2 mm, la longitud promedio es de 20-75 mm; y en los que la anchura promedio supera preferentemente el grosor promedio en un factor de 5 a 50.

Las fibras con alta capacidad de acabado, a título de ejemplo, de la presente invención, comprenden, como mínimo, un polímero sintético seleccionado a partir del grupo que consiste en polietileno, polipropileno, polioximetileno, poli(fluoruro de vinilideno), poli(metilpenteno), poli(etilen-clorotrifluoroetilen), poli(fluoruro de vinilideno), poli(óxido de etileno), poli(terefalato de etileno), poli(terefalato de butileno), poliamida, polibuteno y polímeros de cristales líquidos termotrópicos.

Las fibras a título de ejemplo, con alta capacidad de acabado tienen cuerpos de fibras individuales de manera que la capacidad de flexión promedio es de  $150-2.000 \text{ mN}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . Las fibras con elevada capacidad de  
 20 acabado se encuentran sustancialmente libres de fracturas por esfuerzo y son sustancialmente no fibrilables cuando son agitadas mecánicamente dentro del material de la matriz a reforzar y tienen una sección transversal con forma general de cuadrilátero, a lo largo de su lado mayor, poseyendo dimensiones de anchura, grosor y longitud, de manera que la anchura promedio de las fibras supera preferentemente el grosor promedio de las fibras en un factor de 7 a 40.

Otras fibras preferentes con alta capacidad de acabado, según la invención, comprenden una pluralidad de  
 25 cuerpos de fibras individuales que tienen una longitud definida entre dos extremos opuestos y que comprenden, como mínimo, un polímero sintético, encontrándose dichos cuerpos de fibras individuales sustancialmente libres de roturas por esfuerzo y siendo sustancialmente no fibrilables cuando son agitadas mecánicamente dentro del material de la matriz a reforzar, teniendo los cuerpos de las fibras una sección transversal con forma general de cuadrilátero a lo largo de dicho lado mayor, teniendo, por lo tanto, dimensiones de anchura, grosor y longitud, de manera que la anchura promedio es de 1,0 a 3,0 mm, el grosor promedio es de 0,075 a 0,15 mm, la longitud promedio es de 20 a 60 mm, la proporción promedio de la anchura de las fibras al grosor es de 7 a 30, el módulo elástico de Young de 4 a 20 Giga Pascals, la resistencia a la tracción de 400 a 1.600 Mega Pascals, la capacidad de carga mínima en  
 30 modalidad de tracción de 20 a 1.000 Newtons, teniendo también los cuerpos de fibras una proporción de área transversal promedio a volumen de 10,5 a 42  $\text{mm}^{-1}$ ; y asimismo preferentemente teniendo una capacidad de flexión promedio de 150 a 2.500  $\text{mN}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ .

La presente invención da a conocer también composiciones de matriz que comprenden las fibras antes descritas. Una composición de matriz a título de ejemplo puede estar formada por un adhesivo, asfalto, material compuesto, plástico, elastómero, materiales a base de cemento hidratables o mezclas de los mismos. Las  
 40 composiciones de matriz preferente son composiciones a base de cemento hidratables (por ejemplo, hormigón, mezclas húmedas y mezclas secas de hormigón de proyección, mortero seco, mortero, pasta de cemento) y las fibras preferentes comprenden polipropileno, polietileno o mezclas de los mismos. Preferentemente, las fibras se encuentran presentes en composiciones de matriz hidratables en cantidades de 0,05% a 2,0% en volumen.

La invención proporciona fibras con alta capacidad de acabado y también materiales a base de cemento que contienen dichas fibras.

La invención está dirigida también a pisos de hormigón y en particular a placas de hormigón que contienen fibras embebidas, tales como se han descrito anteriormente. Estos pisos a base de cemento o de hormigón con  
 50 fibras embebidas tienen una resistencia a la comprensión de 15 a 40 MPa, un valor promedio  $R_{e,3}$  de 20 a 60% y una capacidad de acabado (en la que las fibras embebidas no se despegan prácticamente del hormigón) teniendo también las fibras una capacidad de flexión promedio de 100 a 2.500  $\text{mN}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , una anchura promedio de 1,0 a 4,0 mm, un grosor promedio de 0,050 a 0,15 mm, una longitud promedio de 20 a 60 mm, un módulo elástico de Young de 4 a 20 Giga Pascals y una resistencia a la tracción de 400 a 1.600 Mega Pascals.

Otras fibras a título de ejemplo tienen forma torsionada, por ejemplo, como resultado de su corte en piezas separadas a partir de hebras torsionadas de manera parecida a una cuerda o un cable.

La presente invención no quedará limitada a los ejemplos anteriores y las ilustraciones que se facilitan solamente con carácter ilustrativo.

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Fibras para el refuerzo de una composición de hormigón comprendiendo: una pluralidad de cuerpos de fibras individuales que tienen una longitud alargada definida entre dos extremos opuestos y que comprenden, como mínimo, un polímero sintético, teniendo dichos cuerpos de fibras individuales superficies que se encuentran sustancialmente libres de fracturas por esfuerzo, tales como se podrían crear por aplanado mecánico de los cuerpos de las fibras entre rodillos en oposición, siendo dichos cuerpos de fibras individuales sustancialmente no fibrilables en unidades de fibras más pequeñas después de su mezcla en un hormigón húmedo en la medida necesaria para conseguir una dispersión sustancialmente uniforme de las fibras en su interior y teniendo dichos cuerpos de fibras una forma general de cuadrilátero en sección a lo largo de dicha longitud alargada, teniendo, por lo tanto, dimensiones de anchura, grosor y longitud
- 10 en las que la anchura promedio no es menor de 1,0 mm;  
en las que la anchura promedio no es superior a 5,0 mm;  
en las que el grosor promedio no es menor de 0,05 mm;  
en las que el grosor promedio no es superior a 0,2 mm;  
en las que la longitud promedio no es menor de 20 mm;
- 15 en las que la longitud promedio no es superior a 75 mm;  
en las que dichos cuerpos de fibras tienen un módulo Young con una elasticidad no menor de 4 Giga Pascals;  
en las que dichos cuerpos de fibra tienen un módulo Young con una elasticidad no superior a 20 Giga Pascals;
- 20 en las que dichos cuerpos de fibra tienen una resistencia a la tracción no menor de 400 Mega Pascals;  
en las que dichos cuerpos de fibra tienen una resistencia a la tracción no superior a 1600 Mega Pascals;  
en las que dichos cuerpos de fibra tienen una capacidad de carga mínima a la tracción no menor de 20 Newtons por cuerpo de fibra;
- 25 en las que dichos cuerpos de fibras tienen una capacidad mínima de carga en tracción no superior a 1000 Newtons por cuerpo de fibra;  
en las que dichos cuerpos de fibra tienen una relación del área transversal promedio al volumen no menor de  $10,5 \text{ mm}^{-1}$ ;  
en las que dichos cuerpos de fibra tienen una relación del área transversal promedio al volumen no superior a  $42 \text{ mm}^{-1}$ ;
- 30 en las que dichos cuerpos de fibra tienen una capacidad de flexión promedio "B" no menor de  $100 \text{ mN}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  
y  
en las que dichos cuerpos de fibra tienen una capacidad de flexión promedio "B" no superior a  $2500 \text{ mN}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ;
- 35 estando determinada dicha capacidad de flexión "B" de dichas fibras de acuerdo con la fórmula  $B=1/(3 \cdot E \cdot I)$ , en la que el momento de inercia "I" para una sección de forma general de cuadrilátero se calcula de acuerdo con la fórmula  $I=(1/12) \cdot w \cdot t^3$  en la que "w" es la anchura promedio y "t" es el grosor promedio de la sección transversal que tiene forma general de cuadrilátero y en la que "E" representa el módulo de Young de elasticidad de la fibra.
2. Fibras, según la reivindicación 1, en las que el grosor promedio de los cuerpos de fibras no es inferior a 0,075 mm y no es superior a 0,15 mm.
- 40 3. Fibras, según la reivindicación 1 ó 2, en las que en dicha pluralidad de cuerpos de fibras individuales, dichos cuerpos de fibras individuales están separados entre sí.
4. Fibras, según la reivindicación 1 ó 2, en las que en dicha pluralidad de cuerpos de fibras individuales, dichos cuerpos de fibras individuales están parcialmente separados entre sí, pero son completamente separables cuando son agitados mecánicamente dentro del material de la matriz.
- 45 5. Fibras, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en las que, en dicha pluralidad de cuerpos de fibras individuales, dicho, como mínimo, un polímero sintético es seleccionado del grupo que consiste en polietileno, polipropileno, polioximetileno, poli(fluoruro de vinilideno), poli(metilpenteno), poli(etilen-clorotrifluoroetileno),

poli(fluoruro de vinilo), poli(óxido de etileno), poli(tereftalato de etileno), poli(tereftalato de butileno), poliamida, polibuteno y polímeros de cristal líquido termotrópico.

5 6. Fibras, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en las que dichos cuerpos de fibras comprenden polipropileno en una cantidad no inferior a 75% en peso y dichos cuerpos de fibras comprenden polipropileno en una cantidad que llega a 100%.

7. Fibras, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en las que dichos cuerpos de fibras que comprenden una mezcla de, como mínimo, dos polímeros o un copolímero que comprende, como mínimo, dos de dichos polímeros.

10 8. Fibras, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en las que dichos cuerpos de fibras comprenden polipropileno y polietileno.

9. Fibras, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que tienen forma torsionada.

15 10. Material compuesto que comprende fibras, tal como se han definido en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, y hormigón en el que están embebidas dichas fibras, poseyendo dicho hormigón una resistencia a la compresión en el rango de 15 a 40 MPa de manera que el valor promedio  $R_{e,3}$  se encuentra entre el 20 y el 60%, teniendo dicho hormigón capacidad de acabado de manera que dichas fibras embebidas no salen sustancialmente de dicho hormigón.

11. Compuesto que comprende un material de unión de cemento y las fibras definidas en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9.

12. Composición de matriz, que comprende:

- 20
- un material de matriz seleccionado entre el grupo que consiste en adhesivos, asfalto, materiales compuestos, plásticos, elastómetros, y materiales a base de cemento hidratables; y
  - fibras, según se define en la reivindicación 1.

13. Composición de matriz según la reivindicación 12 en la que, en dicha pluralidad de cuerpos de fibras individuales, dichos cuerpos de fibras individuales están separadas entre sí.

25 14. Composición de matriz, según la reivindicación 12 ó 13, en el que dicha pluralidad de cuerpos individuales de fibras, dicho, como mínimo, un polímero sintético es seleccionado entre el grupo que consiste en polietileno, polipropileno, polioximetileno, poli(fluoruro de vinilideno), poli(metilpenteno), poli(etilenclorotrifluoroetileno), poli(fluoruro de vinilo), poli(óxido de etileno), poli(tereftalato de etileno), poli(tereftalato de butileno), poliamida, polibuteno y polímeros de cristal líquido termotrópico.

30 15. Composición de matriz, según la reivindicación 12 a 14, en la que dicha pluralidad de cuerpos individuales de fibras, dicho, como mínimo, un polímero sintético es polipropileno.

16. Composición de matriz, según la reivindicación 12 a 15, en la que dicho material de matriz es un material a base de cemento.

35 17. Composición de matriz, según la reivindicación 12 a 16, en la que dichos cuerpos de fibras comprenden polipropileno en una cantidad no inferior al 75% en peso y dichos cuerpos de fibras comprenden polipropileno en una cantidad que llega al 100%.

18. Composición de matriz, según la reivindicación 12 a 17, en el que dichos cuerpos de fibras comprenden una mezcla de, como mínimo, dos polímeros o un co-polímero que comprende, como mínimo, dos de dichos polímeros.

40 19. Composición de matriz, según la reivindicación 12 a 18, en el que dichos cuerpos de fibras comprenden polipropileno y polietileno.

45 20. Composición de matriz, según la reivindicación 12 a 19, en la que dicho material de matriz es hormigón y dichas fibras están embebidas en dicho hormigón, poseyendo dicho hormigón una resistencia a la compresión de 15 a 40 MPa de manera que el valor promedio  $R_{e,3}$  se encuentra entre el 20 y el 60%, poseyendo dicho hormigón capacidad de acabado de manera que dichas fibras embebidas no salen sustancialmente de dicho hormigón.

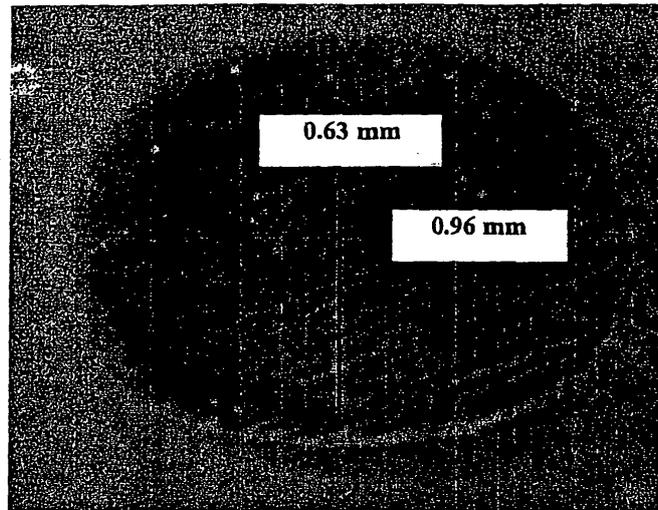
21. Composición de matriz, según la reivindicación 12 a 20, en la que dichas fibras están torsionadas.

22. Composición de matriz, según la reivindicación 12 a 21, en el que dicho material de matriz es asfalto.

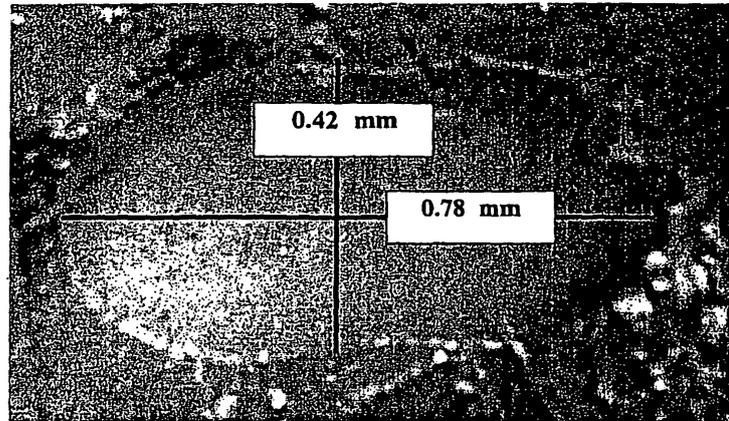
50 23. Composición de matriz, según la reivindicación 12 a 22, en el que dichos cuerpos de fibras individuales tienen una variabilidad de grosor o de anchura a lo largo de la longitud del cuerpo de fibras individuales no inferior a 2,5 por ciento de desviación con respecto al grosor o a la anchura promedio según sea el caso, y en la que dichos

cuerpos de fibras individuales tienen una variabilidad de grosor o anchura a lo largo de la longitud de los cuerpos de fibras individuales no superior al 25 por ciento de desviación con respecto al grosor o anchura promedio según sea el caso.

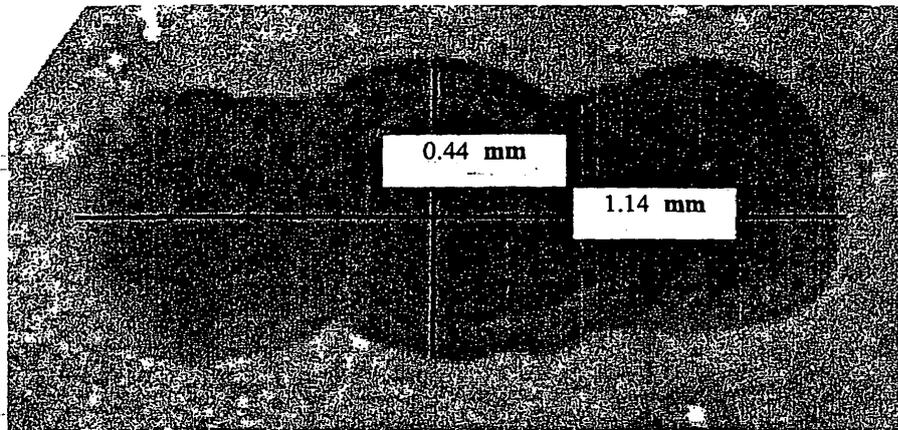
- 5 24. Composición de matriz, según la reivindicación 12, que comprende un material de matriz de hormigón en el que dichos cuerpos de fibras individuales son sustancialmente no fibrilables en unidades de fibras más pequeñas después de mezcla en hormigón húmedo en la medida necesaria para conseguir una dispersión sustancialmente uniforme de las fibras en su interior, y en la que dichos cuerpos de fibras tienen un grosor promedio no inferior a 0,075 mm y no superior a 0,15 mm.
- 10 25. Composición de matriz, según la reivindicación 24, en la que dichos cuerpos de fibras tienen una proporción de área transversal promedio al volumen no inferior a  $10,5 \text{ mm}^{-1}$  y en la que dichos cuerpos de fibras tienen una proporción del área de inserción transversal al volumen no superior a  $42 \text{ mm}^{-1}$ .
26. Composición de matriz, según la reivindicación 24 ó 25, en la que dichos cuerpos de fibras son polipropileno.
- 15 27. Composición de matriz, según cualquiera de las reivindicaciones 24 a 26, en la que dichas fibras están formadas por polietileno y por propileno.
28. Composición de matriz, según cualquiera de las reivindicaciones 24 a 27, en la que dichas fibras se encuentran presentes en dicho material matriz de hormigón en una cantidad no inferior a 0,05% en volumen y no superior al 10% en volumen.
- 20 29. Composición de matriz, según cualquiera de las reivindicaciones 24 a 28, en la que dichos cuerpos de fibras individuales están dotados de recubrimiento.
30. Composición de matriz, según cualquiera de las reivindicaciones 24 a 29, que comprenden además un superplastificante, reductor de agua, elemento de arrastre de aire, elemento de eliminación de aire, inhibidor de corrosión, acelerador de fraguado, retardador de fraguado, añadidura de reducción de retracción, cenizas voladoras, vapores de sílice o mezclas de los mismos.
- 25 31. Procedimiento para modificar un material de matriz, que comprende la introducción en el mismo de fibras según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9.



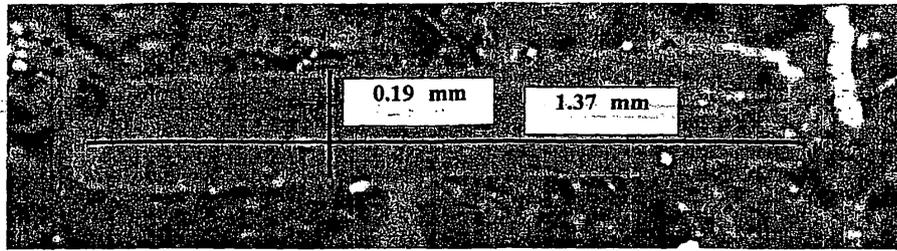
*Fig. 1*  
(TÉCNICA ANTERIOR)



*Fig. 2*  
(TÉCNICA ANTERIOR)



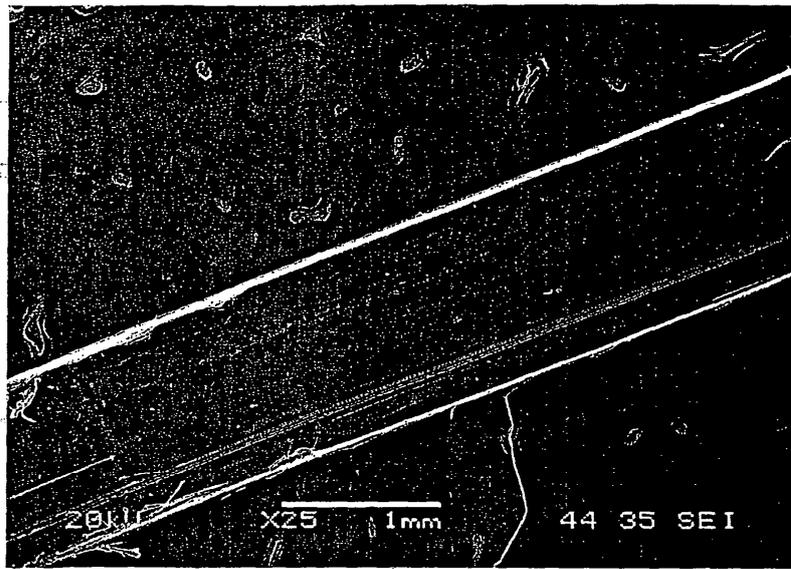
*Fig. 3*  
(TÉCNICA ANTERIOR)



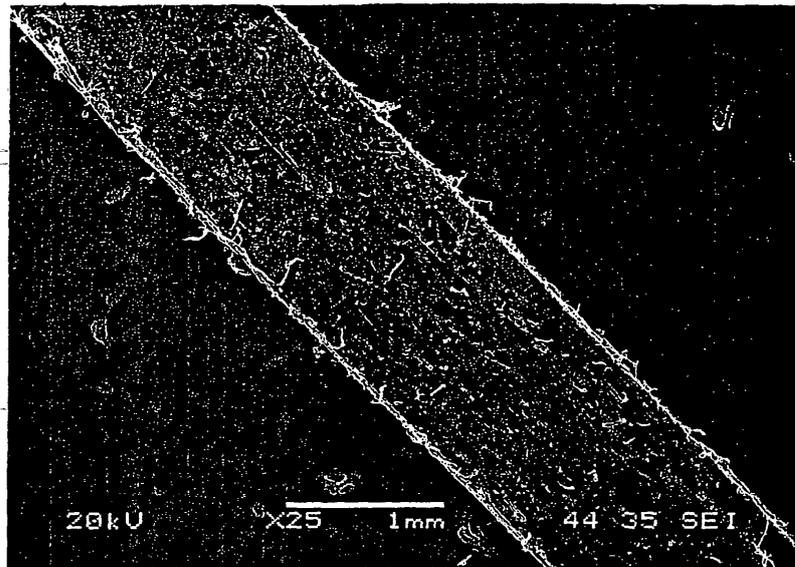
*Fig. 4*



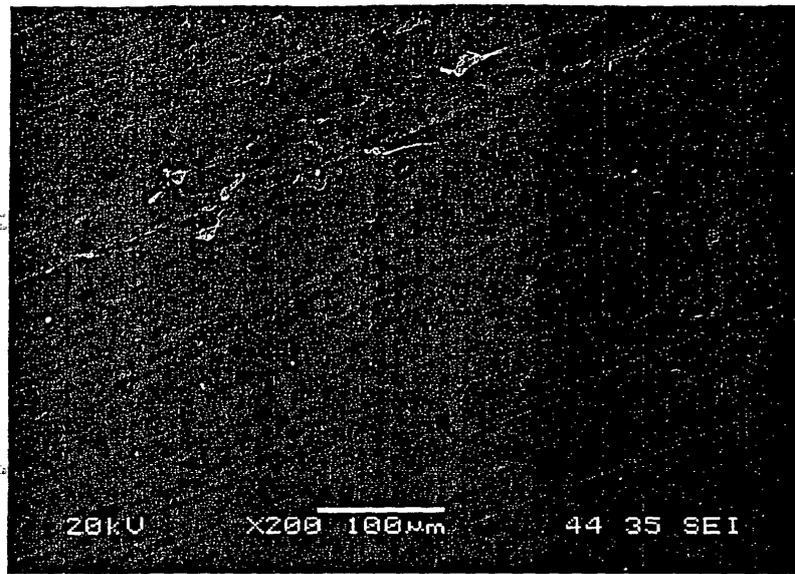
*Fig. 5*



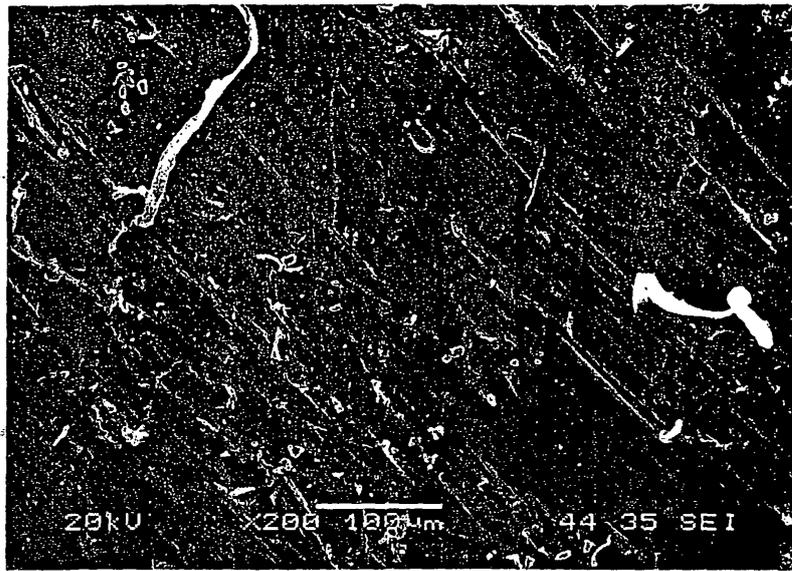
*Fig. 6*



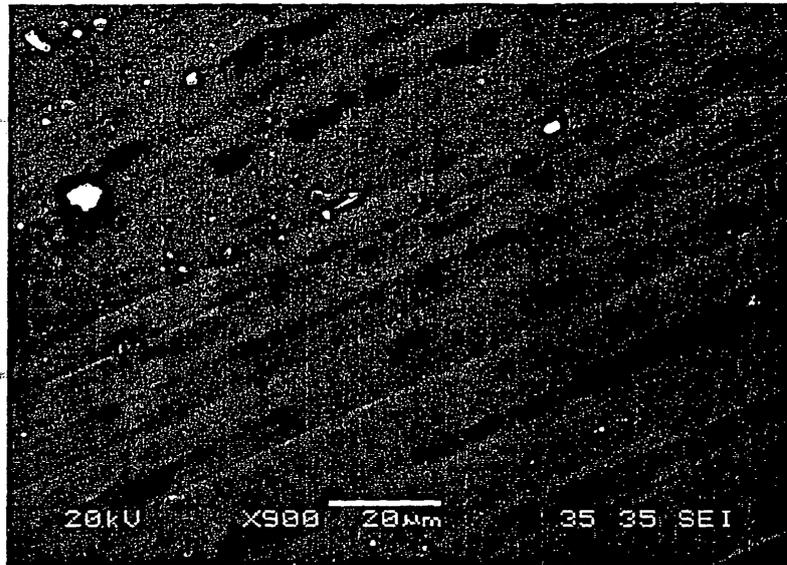
*Fig. 7*



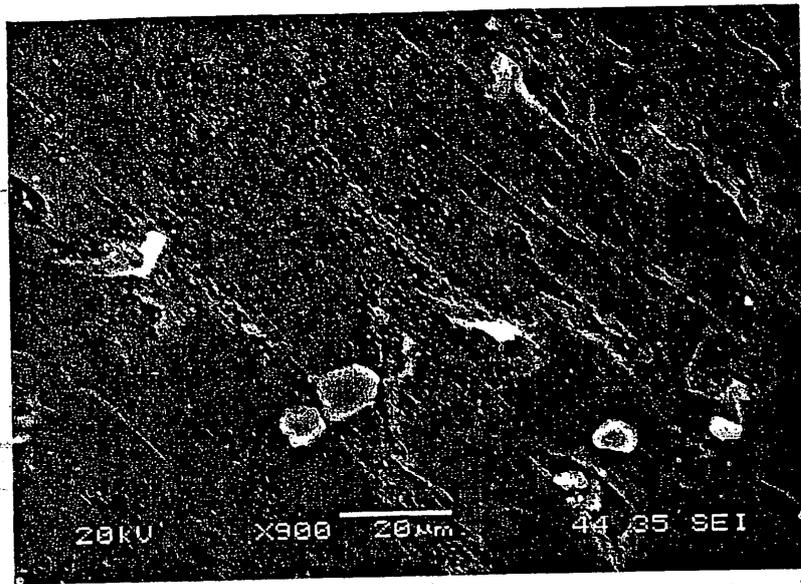
*Fig. 8*



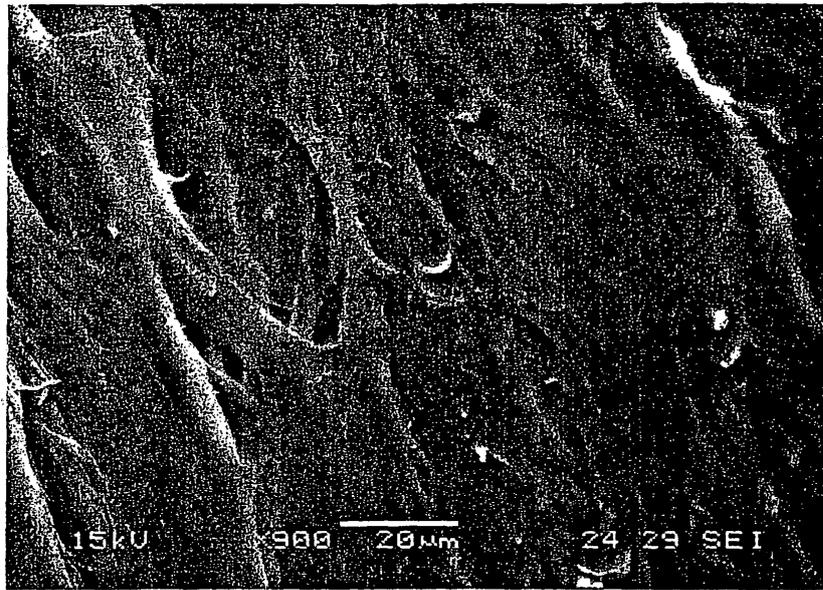
*Fig. 9*



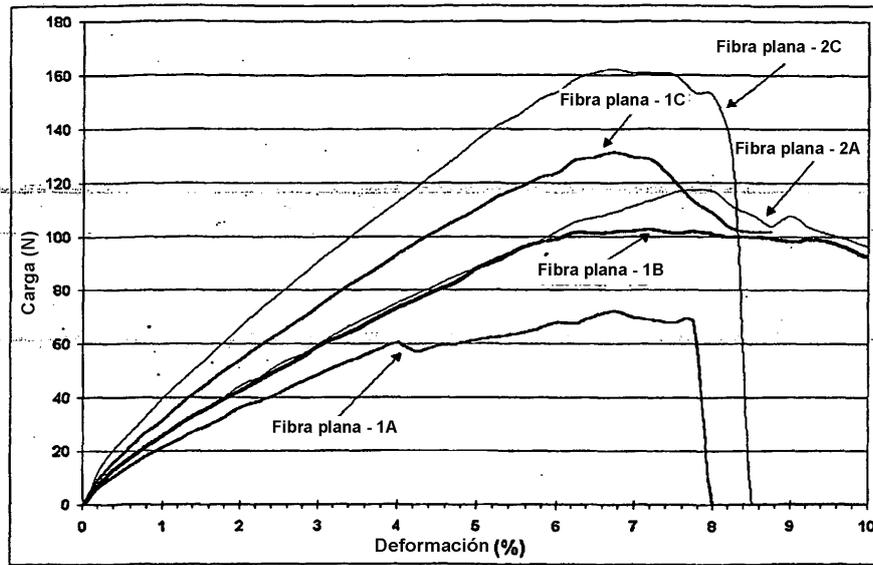
***FIG. 10***



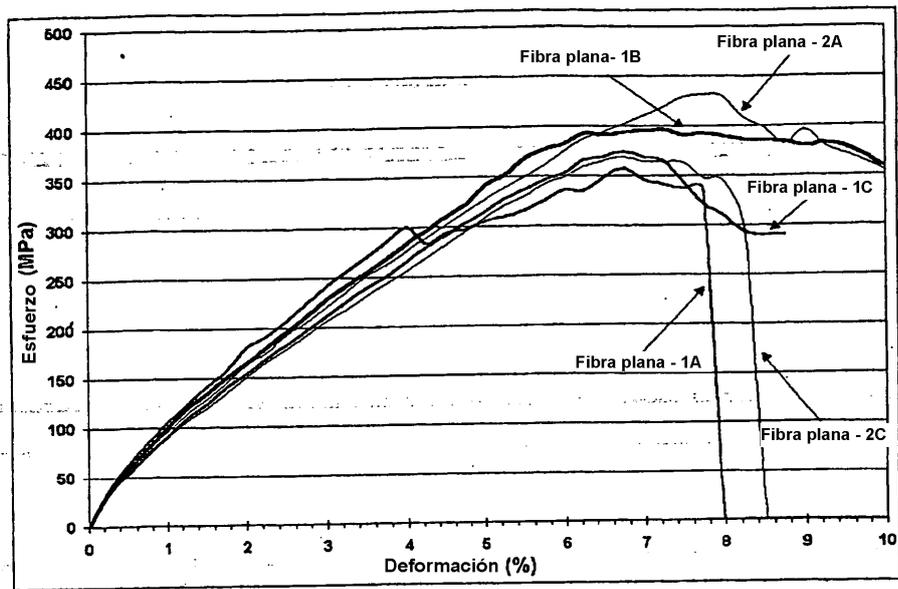
**FIG. 11**



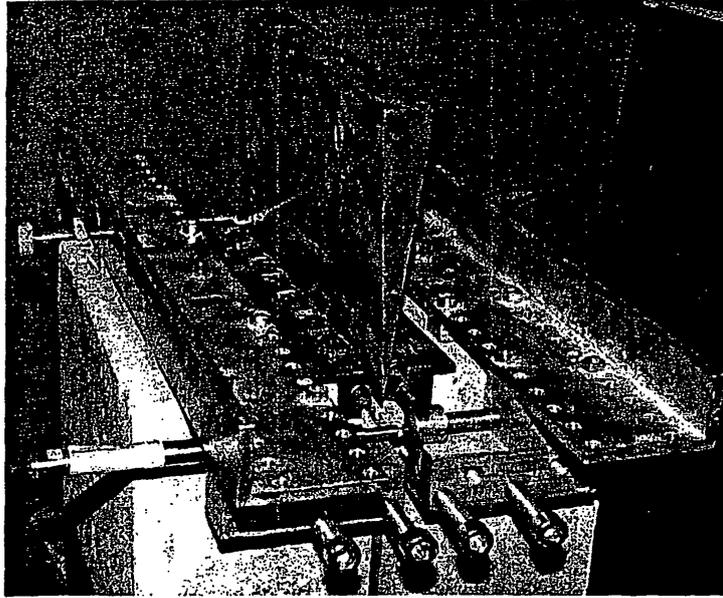
*Fig. 12*  
(TÉCNICA ANTERIOR)



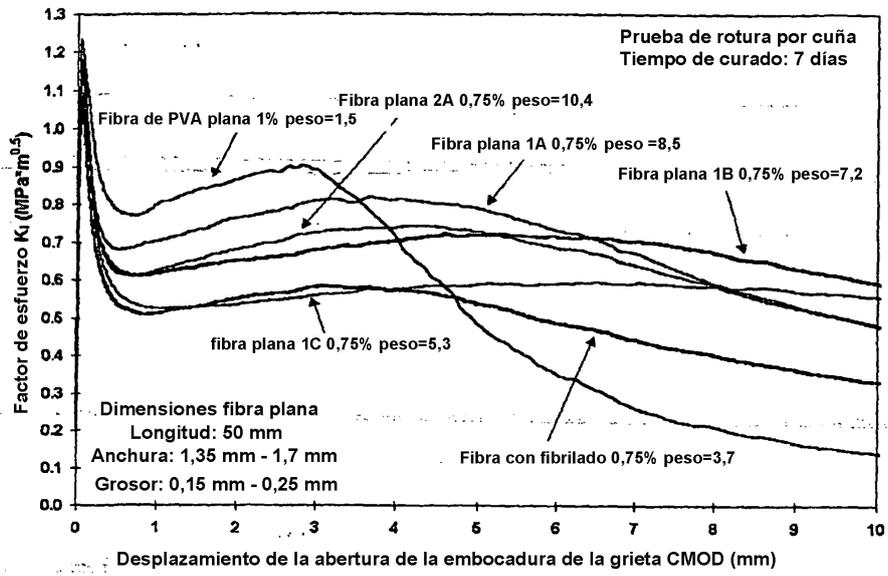
*Fig. 13*



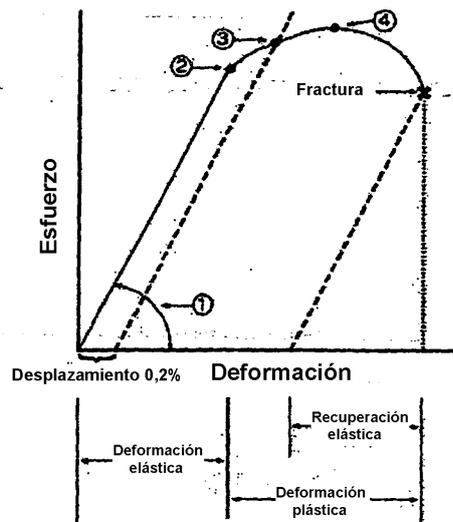
*Fig. 14*



*Fig. 15*



**Fig. 16**



**Fig. 17**

(Curva típica de esfuerzo con respecto la deformación de un material)