

INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRAS DE POLIESTER NO FABRICO DE MISTURAS BETUMINOSAS

FERNANDO VALOR HERNANDEZ

ELSAMEX / CIESM – Centro de Investigacion Elpidio Sanchez Marcos

EDUARDO MIRA FERNANDES

ELSAMEX PORTUGAL, S.A.

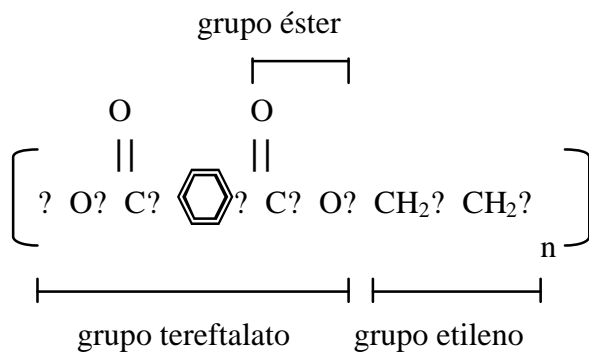
RESUMO

A adição de fibras de poliéster às Misturas Betuminosas apresenta-se como uma boa alternativa à utilização de outro qualquer tipo de fibra procedente de polímeros ou betume modificado.

Com este trabalho constata-se que as características gerais das Misturas Betuminosas com fibras de poliéster apresentam valores semelhantes às Misturas Betuminosas com betumes modificados, havendo mesmo melhoria nas resistências à compressão, coesão, velocidade de deformação e resistência ao ensaio cantabro. Pese embora a baixa temperatura de transição vítrea do poliestireno, verifica-se que a elevada temperatura de fusão (230°C) é compatível com o normal fabrico das Misturas Betuminosas.

1. ANTECEDENTES

Entre los materiales empleados para mejorar las propiedades de las mezclas bituminosas para carreteras, se encuentran las fibras. Ya en 1961 se recogen las primeras reseñas bibliográficas, en las que se mencionan los asfaltos rellenos. Estos asfaltos proceden de mezclar polvos minerales o fibras de asbesto con el asfalto para mejorar sus propiedades reológicas, resistencia y durabilidad. Las fibras son estructuras unidimensionales largas y delgadas. Se doblan con facilidad y su propósito fundamental es hacer tejidos. Las fibras tienen una longitud muy superior a su diámetro y su orientación a lo largo de un solo eje les confiere una gran cohesión molecular. Atendiendo a su procedencia, existen diferentes tipos de fibras: naturales, celulósicas y no celulósicas, también conocidas como fibras químicas sintéticas, en este último grupo se encuentran las fibras de poliéster. Estas se obtienen mediante la reacción del etilenglicol y el dimetil tereftalato, las uniones formadas por grupos éster dan nombre al producto.



La producción de fibras se hace mediante el calentamiento, fusión y bombeo a través de una hilera (dado con múltiples agujeros), a manera de la extrusión convencional. Los filamentos que emanan del dado, se estiran y enfrían simultáneamente al aire antes de ser recogidos en una bobina, este proceso de estiramiento y relajación produce una alineación de las moléculas y confiere al filamento mayor resistencia.

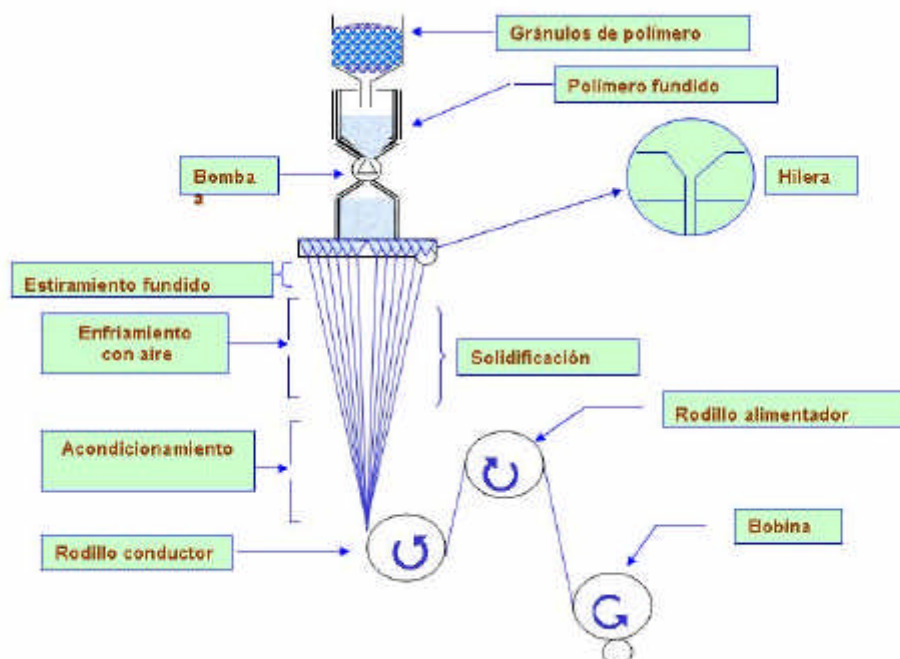


Figura 1

2. OBJETIVO DEL PROYECTO

El principal objetivo de este estudio es determinar mediante trabajos de laboratorio, la mejora que la adición de las fibras de poliéster puede aportar a las mezclas bituminosas mediante la comparación con mezclas análogas fabricadas sin fibras. Las mezclas estudiadas son S-20, M-10 y PA-1, preparadas con betunes modificados y no modificados. Para las mezclas preparadas con fibras se han empleado únicamente betunes no modificados.

3. MATERIALES

3.1. Aridos

De naturaleza silíceo y silico-calcareo, proceden de las graveras del río Jarama. Las fracciones empleadas son: 18/25 grava silíceo; 12/18 grava silíceo; 6/12 grava silíceo; 0/6 arena silíceo; 0/6 arena caliza.

| Tamiz UNE | 0/6 calizo | 0/6 silíceo | 12/18 silíceo | 18/25 silíceo | 6/12 silíceo |
|-----------|------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| 40 | | | | | |
| 25 | | | | 100 | |
| 20 | | | 100 | 99 | |
| 12.5 | | | 97 | 59 | 100 |
| 8 | 100 | 100 | 29 | 7 | 70 |
| 4 | 74 | 99 | 2 | 2 | 9 |
| 2 | 47 | 77 | 1 | 1 | 3 |
| 0,5 | 22 | 45 | 0,7 | 1 | 2 |
| 0,25 | 17 | 36 | 0,7 | 1 | 1,8 |
| 0,125 | 13 | 23 | 0,7 | 1 | 1,5 |
| 0,063 | 11,8 | 13,8 | 0,7 | 0,8 | 1,3 |
| E. Arena | 66 | 67 | | | |

3.2. Betunes

El betún modificado corresponde al tipo BM-3b y el no modificado al B 60/70

3.3. Fibras de poliéster

Las fibras 1 y 2 empleadas en el estudio, son monofilamento de 25 μm y 15 μm de diámetro respectivamente y 6 mm de longitud. Sus propiedades físicas son las siguientes: 1,38 g/cm^3 (Peso específico); 7000-9000 MPa (Módulo de Young); 400-600Mpa (Resistencia a la tracción); 12% (Alargamiento); 250°C (Punto de fusión); 540°C (Punto de ignición).

4. Fabricación

El procedimiento seguido para preparar las mezclas es el siguiente:

- Se mezclan previamente en caliente, los áridos y la fibra en las cantidades prefijadas.
- Tras un minuto de agitación se añade el ligante, manteniendo la agitación durante 40 segundos.

- Se añade la cantidad correspondiente del polvo mineral y se mantiene la agitación durante 40 segundos mas.

Las temperaturas de mezcla y compactación, se indican en el siguiente cuadro:

| Composición | Mezclado (°C) | | | Compactación (°C) | | |
|----------------|---------------|------|-------|-------------------|------|-------|
| | S-20 | M-10 | PA-12 | S-20 | M-10 | PA-12 |
| Fibra 1 | 170 | 170 | 155 | 160 | 160 | 150 |
| Fibra 2 | 170 | 170 | 155 | 160 | 160 | 150 |
| BM-3b | 170 | 170 | 155 | 160 | 160 | 150 |
| 60/70 | 160 | 160 | 155 | 150 | 150 | 150 |

5. Mezcla bituminosa en caliente S-20

A partir de las distintas fracciones se ha compuesto la siguientes fórmula de trabajo:

| Tamiz Une | Huso S-20 (% pasa) | Formula de trabajo (%pasa) |
|-----------|-----------------------|-------------------------------|
| 40 | 100-100 | 100 |
| 25 | 100-100 | 100 |
| 20 | 80-95 | 92 |
| 12.5 | 64-79 | 69 |
| 8 | 50-66 | 59 |
| 4 | 35-50 | 42 |
| 2 | 24-38 | 29 |
| 0.5 | 11-21 | 16 |
| 0,25 | 7-15 | 13 |
| 0,125 | 5-10 | 9 |
| 0,063 | 3-7 | 6.2 |

5.1 Ensayo Marshall

Estabilidad máxima (Em), kN; deformación máxima (Dm),mm

| % l/a | Fibra 1 | | Fibra 2 | | Bm-3b | | 60/70 | |
|----------|---------|-------|---------|------|-------|-------|-------|-------|
| | Dm | Em | Dm | Em | Dm | Em | Dm | Em |
| 3 | 3,7 | 12,23 | 4,7 | 15,3 | 2,6 | 15,75 | 2,6 | 16,45 |
| 4 | 3,0 | 15,90 | 4,2 | 17,7 | 2,9 | 16,00 | 2,8 | 17,08 |
| 5 | 3,3 | 17,38 | 3,7 | 18,5 | 3,3 | 15,56 | 2,9 | 14,84 |

| | | | | | | | | |
|----------|-----|-------|-----|------|-----|-------|-----|-------|
| 6 | 3,5 | 16,74 | 4,2 | 20,4 | 4,5 | 14,02 | 3,5 | 11,83 |
| 7 | 4,2 | 17,51 | 4,8 | 16,0 | 5,7 | 12,57 | 4,3 | 10,34 |

Deformación proyecto (Dp),mm / Estabilidad de Proyecto (Ep),kN

| % l/a | Fibra 1 | | Fibra 2 | | Bm-3b | | 60/70 | |
|----------|---------|-------|---------|------|-------|-------|-------|-------|
| | Dp | Ep | Dp | Ep | Dp | Ep | Dp | Ep |
| 3 | 2,5 | 11,61 | 3,6 | 15,6 | 1,9 | 14,83 | 1,9 | 15,88 |
| 4 | 2,4 | 15,11 | 3,2 | 16,9 | 2,2 | 15,2 | 2,1 | 16,23 |
| 5 | 2,4 | 16,51 | 3 | 17,6 | 3 | 14,79 | 2,3 | 14,1 |
| 6 | 2,6 | 15,89 | 3,3 | 19,4 | 3,6 | 13,32 | 2,9 | 12,18 |
| 7 | 3,4 | 16,63 | 3,7 | 15,2 | 4,8 | 11,94 | 2,7 | 9,83 |

Porcentaje de Huecos

| % l/a | Fibra 1 | | Fibra 2 | | Bm-3b | | 60/70 | |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | %h.mezcla | %h.árido | %h.mezcla | %h.árido | %h.mezcla | %h.árido | %h.mezcla | %h.árido |
| 3 | 10,89 | 17,28 | 8,44 | 17,44 | 8,44 | 17,44 | 7,41 | 15,88 |
| 4 | 8,19 | 16,78 | 8,35 | 16,92 | 7,35 | 16,02 | 6,87 | 15,58 |
| 5 | 5,53 | 16,31 | 5,93 | 16,67 | 4,4 | 15,31 | 3,79 | 14,77 |
| 6 | 2,93 | 15,93 | 3,75 | 16,64 | 1,25 | 14,47 | 1,66 | 14,83 |
| 7 | 1,4 | 16,47 | 2,47 | 16,47 | 0,82 | 15,97 | 0,44 | 15,66 |

Densidad, g/cm³

| % l/a | Fibra 1 | Fibra 2 | BM-3b | 60/70 |
|----------|---------|---------|-------|-------|
| 3 | 2,262 | 2,258 | 2,031 | 2,318 |
| 4 | 2,298 | 2,294 | 2,319 | 2,331 |
| 5 | 2,333 | 2,323 | 2,361 | 2,376 |
| 6 | 2,366 | 2,346 | 2,407 | 2,397 |
| 7 | 2,373 | 2,362 | 2,387 | 2,396 |

A la vista de estos resultados, situamos el contenido óptimo de ligante en el 5 % de betún sobre áridos para las mezclas sin fibras y en el 5,8 % de betún sobre áridos para las mezclas que llevan fibras.

5.2. Inmersión Compresión

El ensayo se ha realizado en las siguientes condiciones: probetas sumergidas a 60°C durante 24 h.

| Composición | R1 (kgf/cm ²) | R2 (kgf/cm ²) | I.R.C |
|----------------|---------------------------|---------------------------|--------|
| Fibra 1 | 30,70 | 37,48 | 81,91 |
| Fibra 2 | 39,69 | 48,31 | 82,16 |
| BM-3b | 37,42 | 44,97 | 83,2 |
| 60/70 | 30,13 | 37,42 | 80, 52 |

R1: resistencia a compresión de las probetas sumergidas / R2: resistencia a compresión de las probetas no sumergidas / Índice resistencia contenida: IRC = 100*R1/R2

5.6 Compresión diametral

El ensayo de resistencia a compresión diametral se ha realizado a una temperatura de 5°C

| Composición | Resistencia, N/mm ² |
|----------------|--------------------------------|
| Fibra 1 | 3,3 |
| Fibra 2 | 2,6 |
| BM-3b | 2,9 |
| 60/70 | 2,5 |

5.6 Módulo Dinámico

Condiciones generales del ensayo: 100 mm (Longitud del extensómetro); 140 kgf (Amplitud del ciclo); 20°C (Temperatura); 10 Hz (Frecuencia)

| Composición | Probeta | Angulo de desfase (°) | Módulo dinámico (Mpa) |
|-------------|----------|-----------------------|-----------------------|
| Fibra 1 | 1 | 17,07 | 6783,9 |
| | 2 | 19,11 | 6042,7 |
| | 3 | 18,6 | 7825,7 |
| | promedio | 18,26 | 6909,4 |

| | | | |
|---------|----------|-------|---------|
| Fibra 2 | 1 | 18,16 | 6735,37 |
| | 2 | 15,81 | 7890,5 |
| | 3 | 17,51 | 7382,1 |
| | promedio | 17,16 | 7312,94 |
| Bm-3b | 1 | 15,34 | 6345,28 |
| | 2 | 15,21 | 5823,79 |
| | 3 | 16,85 | 6432,34 |
| | promedio | 15,8 | 6200,47 |
| 60/70 | 1 | 15,21 | 6800,12 |
| | 2 | 14,65 | 6208,94 |
| | 3 | 12,83 | 6036,29 |
| | promedio | 14,23 | 6348,45 |

5.6 Leyes de Fatiga

Condiciones generales del ensayo: 50 mm (Longitud de la base del extensómetro); 250 mm (Separación entre apoyos); 20°C (Temperatura); 10 Hz (Frecuencia)

Ley de fatiga en deformación se define como: $\log \epsilon = A + B * \log N$

N: número total de ciclos; ϵ : semi-amplitud cíclica de la función deformación (adimensional);

ϵ_6 : semi-amplitud al millón de ciclos; A: tensión para que se produzca la rotura con una sola carga; B: pendiente de la recta

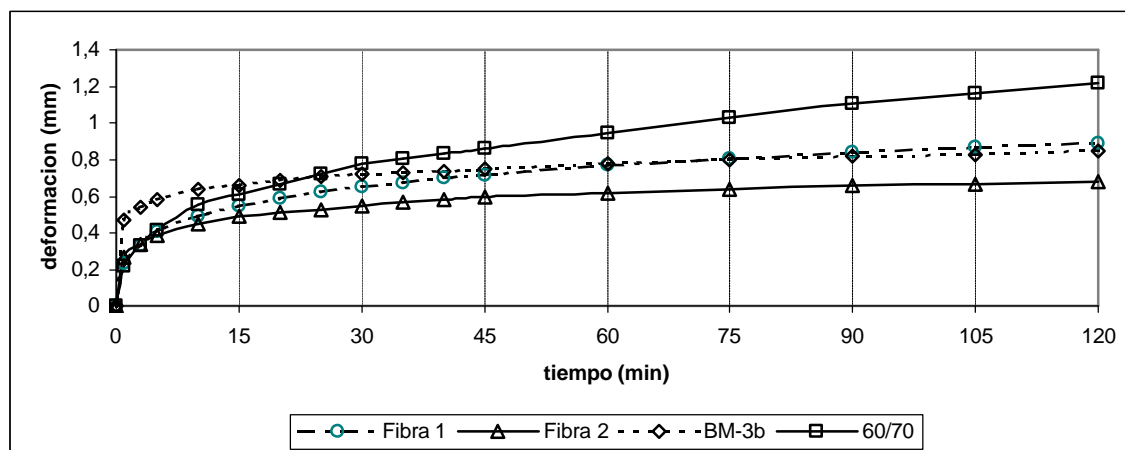
| Composición | A | B | ϵ_6 |
|-------------|--------|---------|--------------|
| Fibra 1 | 3,2447 | -0,2386 | 65,03 |
| Fibra 2 | 3,187 | -0,2261 | 67,67 |
| BM-3b | 2,7957 | -0,1487 | 80,08 |
| 60/70 | 3,2977 | -0,2518 | 61,22 |

5.6 Ensayo pista de laboratorio

Condiciones del ensayo: 60°C (Temperatura de ensayo); 9 kgf/cm² (Presión de contacto)

| Composición | velocidad de deformación (m/min) | | | deformación (mm) |
|-------------|----------------------------------|--------------------|----------------------|------------------|
| | V _{45/30} | V _{90/75} | V _{120/105} | |
| Fibra 1 | 4,3 | 2,2 | 1,6 | 0,89 |
| Fibra 2 | 3 | 1,3 | 1 | 0,68 |

| | | | | |
|--------------|-----|-----|-----|------|
| BM-3b | 2 | 1,3 | 1,3 | 0,85 |
| 60/70 | 6,7 | 5,3 | 4 | 1,18 |



6. Microaglomerado en caliente, M-10

A partir de las distintas fracciones se ha compuesto la siguientes fórmula de trabajo:

| Tamiz Une | Huso M-10 (% pasa) | FT (%pasa) |
|-----------|--------------------|------------|
| 12.5 | 100 | 100 |
| 10 | 75-97 | 87.3 |
| 4 | 14-27 | 20 |
| 2 | 11-22 | 15.5 |
| 0.5 | 8-16 | 10.3 |
| 0.063 | 5-7 | 6.5 |

6.1. Ensayo Cantabro

Condiciones del ensayo: 24 h. en agua a 60 °C; 24 h. en cámara a 25 °C.

| Composición | Contenido de ligante | Densidad | Pérdidas | | Huecos (%) |
|----------------|----------------------|----------|----------|----------------|------------|
| | | | En seco | Tras inmersión | |
| Fibra 1 | 5,5 | 2,006 | 6,2 | 15,3 | 18,63 |
| | 6,0 | 2,023 | 4,5 | 10,7 | 18,27 |
| | 6,5 | 2,065 | 3,0 | 6,9 | 17,08 |

| | | | | | |
|----------------|-----|-------|-----|------|-------|
| Fibra 2 | 5,5 | 2,026 | 8,7 | 16,5 | 18,69 |
| | 6,0 | 2,036 | 7,5 | 13,3 | 18,50 |
| | 6,5 | 2,049 | 5,3 | 10,9 | 17,12 |
| BM-3b | 5,0 | 2,008 | 5,9 | 18,9 | 18,23 |
| | 5,5 | 2,000 | 4,1 | 16,1 | 17,00 |
| | 6,0 | 2,020 | 3,1 | 13,2 | 14,75 |
| 60/70 | 5,0 | 2,010 | 9,8 | 26,8 | 17,41 |
| | 5,5 | 2,005 | 8,1 | 21,8 | 16,47 |
| | 6,0 | 2,021 | 7,1 | 17,9 | 15,39 |

La dosificación establecida para las mezclas M-10, es la siguiente:

| Composición | Betún/árido (%) | Fibra/árido (%) |
|--------------------|------------------------|------------------------|
| Fibra 1 | 5.8 | 0,3 |
| Fibra 2 | 5.8 | 0,3 |
| BM-3b | 5.5 | - |
| 60/70 | 5.5 | - |

6.2. Resistencia a compresión diametral

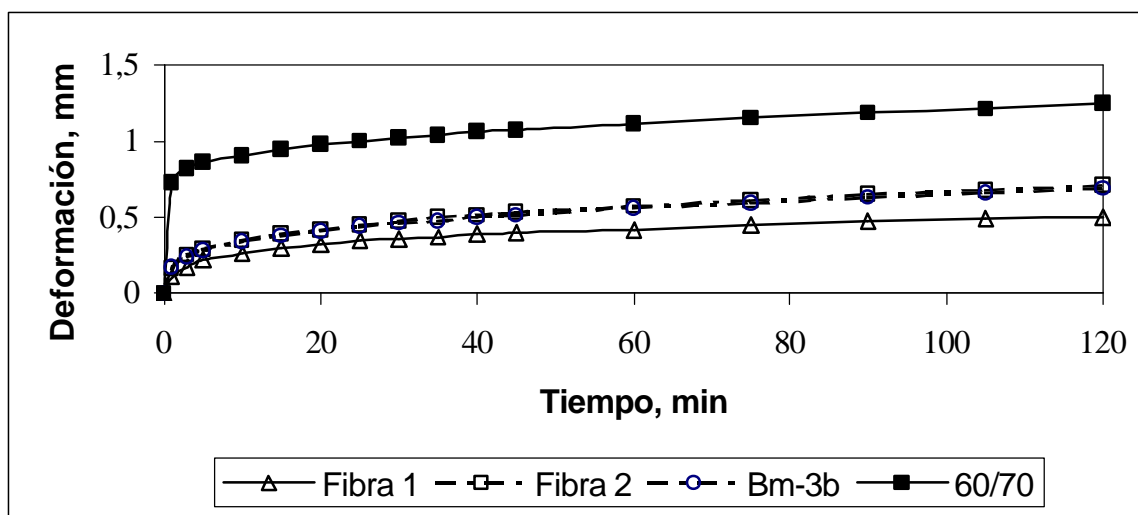
| Composición | Resistencia, N/mm² |
|--------------------|--------------------------------------|
| Fibra 1 | 2,01 |
| Fibra 2 | 1,98 |
| BM-3b | 2,01 |
| 60/70 | 1,82 |

6.3. Ensayo en pista de laboratorio

Condiciones del ensayo: 60°C (Temperatura de ensayo); 9 kgf/cm² (Presión de contacto)

| Composición | velocidad de deformación (m/min) | | | deformación (mm) |
|--------------------|---|--------------------------|----------------------------|-------------------------|
| | V_{45/30} | V_{90/75} | V_{120/105} | |
| Fibra 1 | 2,3 | 1,3 | 0,7 | 0,5 |

| | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|------|
| Fibra 2 | 4 | 2,3 | 2 | 0,71 |
| BM-3b | 3,7 | 2,3 | 2 | 0,69 |
| 60/70 | 3.3 | 2.3 | 2.7 | 1,25 |



6.4. Leyes de fatiga.

Condiciones generales del ensayo: 50 mm (Longitud de la base del extensómetro); 250 mm (Separación entre apoyos); 20°C (Temperatura); 10 Hz (Frecuencia)

Ley de fatiga en deformación se define como: $\log \epsilon = A + B * \log N$

N: número total de ciclos; ϵ : semi-amplitud cíclica de la función deformación (adimensional);

ϵ_6 : semi-amplitud al millón de ciclos; A: tensión para que se produzca la rotura con una sola carga; B: pendiente de la recta

| ligante | A | B | ϵ_6 |
|----------------|--------|---------|--------------|
| Fibra 1 | 3,5076 | -0,2901 | 58,48 |
| Fibra 2 | 3,3113 | -0,2587 | 57,42 |
| BM-3b | 3,3668 | -0,2659 | 59,07 |
| 60/70 | 3,3901 | -0,2745 | 55,35 |

7. Mezcla drenante, PA-12

A partir de las distintas fracciones se ha compuesto una fórmula de trabajo dentro del huso PA-12

| Tamiz Une | Huso PA-12(% pasa) | Formula de trabajo (% pasa) |
|-----------|--------------------|-----------------------------|
| 20 | 100 | 100 |
| 12.5 | 70-100 | 92 |
| 8 | 38-62 | 42 |
| 4 | 13-27 | 14 |
| 2 | 9-20 | 11 |
| 0.5 | 5-12 | 7 |
| 0.063 | 3-6 | 3.5 |

7.1. Ensayo cantabro

| Composición | Contenido | Densidad | Perdidas (%) | | Huecos (%) |
|----------------|-----------|----------|--------------|----------------|------------|
| | | | En seco | Tras inmersión | |
| Fibra 1 | 4.75 | 1.967 | 19.88 | 42.38 | 21.04 |
| | 5.25 | 1.973 | 17.96 | 34.85 | 20.26 |
| | 5.75 | 2.000 | 13.94 | 21.84 | 18.64 |
| Fibra 2 | 4.75 | 1.969 | 22.69 | 45.86 | 20.96 |
| | 5.25 | 1.978 | 14.36 | 32.17 | 20.06 |
| | 5.75 | 1.992 | 10.66 | 25.68 | 18.96 |
| BM-3b | 4 | 1.977 | 15.71 | 43.75 | 21.45 |
| | 4.5 | 1.997 | 13.04 | 26.7 | 20.1 |
| | 5 | 2.018 | 7.24 | 18.19 | 18.72 |
| 60/70 | 4.25 | 1.99 | 43.07 | 53.64 | 20.66 |
| | 4.75 | 2.003 | 33.56 | 43.07 | 19.59 |
| | 5.25 | 2.009 | 26.94 | 41.7 | 18.81 |

La dosificación establecida para las mezclas PA-12, es la siguiente:

| Composición | Betún/árido (%) | Fibra/árido (%) |
|----------------|-----------------|-----------------|
| Fibra 1 | 5.25 | 0,3 |
| Fibra 2 | 5.25 | 0,3 |
| BM-3b | 4.5 | - |
| 60/70 | | - |

7.2. Compresión diametral

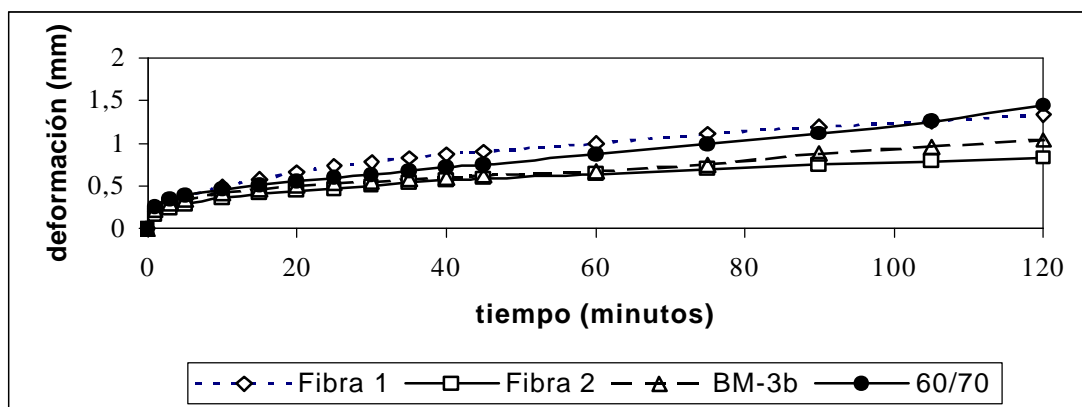
Condiciones generales de ensayo: 5 °C (Temperatura)

| Composición | Resistencia, N/mm ² |
|----------------|--------------------------------|
| Fibra 1 | 1,43 |
| Fibra 2 | 1,31 |
| BM-3b | 1,37 |
| 60/70 | 1,07 |

7.3. Pista de laboratorio

Condiciones generales de ensayo: 60 °C (Temperatura de ensayo); 9 kgf/cm² (Presión de contacto)

| Composición | velocidad de deformación (m/min) | | | deformación (mm) |
|----------------|----------------------------------|-------------------|----------------------|------------------|
| | V _{45/30} | V ₉₀₇₅ | V _{120/105} | |
| Fibra 1 | 8 | 5,3 | 4,7 | 1,33 |
| Fibra 2 | 6 | 3,3 | 2,7 | 0,83 |
| BM-3b | 4,7 | 8,7 | 5,3 | 1,04 |
| 60/70 | 8 | 8 | 12,7 | 1,26 |



8. Observaciones

De las fibras empleadas en el estudio, la fibra nº 2 (15 µm), se dispersa mejor en la mezcla.

- **Mezcla S-20:** La resistencia a la acción del agua mejora con la adición de fibra y se aproxima a los resultados obtenidos con los betunes modificados. La velocidad de deformación se reduce con la adición de fibras superando los valores obtenidos con betunes modificados. El módulo dinámico se incrementa con las fibras y la resistencia a fatiga disminuye a pesar de la mayor riqueza de betún en la mezcla.

- **Mezcla M-10:** Las fibras mejoran los resultados del ensayo cántabro alcanzando los valores obtenidos con las mezclas preparadas con betunes modificados. Tanto los resultados de cohesión (tracción indirecta) como los de deformación en pista son similares en las mezclas con fibras y con betunes modificados.
- **Mezcla PA-12:** Nuevamente se pone de manifiesto que la adición de fibra mejora la resistencia a la deformación en pista y la cohesión. Los resultados del ensayo cántabro son sensiblemente mejores que los obtenidos con el B60/70 y próximos a la mezcla con BM-3b

9. Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se deduce que el empleo de fibras en las mezclas bituminosas en caliente, es una clara alternativa a otros materiales como las fibras de celulosa o los betunes modificados con polímeros. Su utilización no requiere instalaciones complejas o modificación alguna del proceso de fabricación. El aporte mas interesante se produce en la resistencia a la deformación plástica y ala cohesión, viéndose sensiblemente mejorada respecto a mezclas fabricadas con betunes no modificados.