

serie normativas

## Instrucciones de Construcción



# Recomendaciones para el proyecto de las actuaciones de rehabilitación estructural de firmes con pavimento bituminoso

---

Orden Circular 323/97 T



Ministerio de Fomento  
Dirección General de Carreteras

serie normativas

# Recomendaciones para el proyecto de las actuaciones de rehabilitación estructural de firmes con pavimento bituminoso

---

Orden Circular 323/97 T



**Ministerio de Fomento**  
Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes  
Dirección General de Carreteras

1997

**ESPAÑA. Dirección General de Carreteras**

**Orden circular 323/97 T sobre recomendaciones para el proyecto de las actuaciones de rehabilitación estructural de firmes con pavimento bituminoso. - Madrid : Ministerio de Fomento. Centro de Publicaciones, 1997 .**

**37 p. : 30 cm - (Serie normativas. Instrucciones de construcción)**

**CARRETERAS - Conservación  
PAVIMENTOS DE ASFALTO**

**625 . 76  
625 . 85**



**Edita: Centro de Publicaciones  
Secretaría General Técnica  
Ministerio de Fomento ©**

**I.S.B.N.: 84-498-0314-4  
NIPO: 161-97-010-1  
Depósito Legal: M-23.793-1997  
Imprime: Centro de Publicaciones**

**Diseño cubierta: Carmen G. Ayala**

**Impreso en papel reciclado**

<b>ORDEN CIRCULAR 323/97 T</b> .....	5
--------------------------------------	---

<b>RECOMENDACIONES PARA EL PROYECTO DE LAS ACTUACIONES DE REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DE FIRMES CON PAVIMENTO BITUMINOSO</b> .....	7
---	---

1. Objeto .....	7
2. Análisis de soluciones y selección de la más apropiada .....	7
3. Factores de dimensionamiento .....	8
4. Tipología de las soluciones de rehabilitación estructural .....	9

<b>ANEJO 1 GUÍA PARA EL ESTUDIO DE LAS DEFLEXIONES EN FIRMES CON PAVIMENTO BITUMINOSO</b> .....	17
---	----

1. Objeto .....	19
2. Metodología para el estudio de la rehabilitación estructural de un firme .....	19
3. Datos básicos de partida .....	19
4. Evaluación del firme .....	20
5. Estudio de deflexiones .....	22
6. Selección y diseño de la solución .....	30

<b>ANEJO 2 CRITERIOS A TENER EN CUENTA PARA EL ESTUDIO DE LAS ACTUACIONES PREVENTIVAS</b> .....	31
---	----

1. Conceptos básicos sobre prevención y refuerzo de firmes .....	33
2. Metodología recomendable .....	36
3. Consideraciones sobre la deflexión .....	36

## **ORDEN CIRCULAR 323/97 T SOBRE RECOMENDACIONES PARA EL PROYECTO DE LAS ACTUACIONES DE REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DE FIRMES CON PAVIMENTO BITUMINOSO**

En los estudios y proyectos de refuerzo o renovación superficial de firmes de carreteras estatales, actualmente es de aplicación la Norma 6.3-IC, "Refuerzo de Firmes", aprobada por Orden Ministerial de 26 de marzo de 1980. Su revisión parece aconsejable por:

- El tiempo transcurrido desde su aprobación, la evolución tecnológica de los firmes y pavimentos y sus materiales constituyentes, así como la experiencia acumulada en la aplicación de la mencionada Norma.
- La necesidad de homogeneizar los criterios de rehabilitación de firmes y pavimentos con la Instrucción 6.1 y 2-IC "Secciones de firme", que sustituyó a las normas 6.1-IC y 6.2-IC de 1975, vigentes en el momento de redacción de la Norma 6.3-IC y a las que ésta hacía referencia.
- La conveniencia de especificar los procedimientos de rehabilitación de las zonas singulares que se indican en la mencionada Norma 6.3-IC, en particular las que presentan agrietamiento estructural o valores altos de la deflexión.
- La necesidad de desarrollar y sistematizar los criterios de evaluación y dimensionamiento de los firmes semirrígidos y semiflexibles, que constituyen la mayoría de los existentes de la Red de Carreteras del Estado, y que en la norma vigente desde 1980 apenas está esbozada la metodología de su rehabilitación.
- La conveniencia de normalizar las actuaciones de rehabilitación estructural en los tramos con tráfico superior a 5.10<sup>6</sup> ejes equivalentes, para los que la Norma 6.3-IC actual no da solución, y que cada vez son más frecuentes, dado el incremento de tráfico experimentado desde el momento de aprobación de dicha norma.

Por otra parte resulta inexcusable el cumplimiento del procedimiento de información en materia de normas y reglamentaciones técnicas establecido en la Directiva 83/189/CEE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 28 de marzo, y en el Real Decreto 1168/95, de 7 de julio, proceso que consumirá algún tiempo.

El apartado 1 de la Disposición adicional segunda de la Ley de Carreteras 25/1988 de 29 de julio, así como los Artículos 29, 40, 51, y el apartado 1 de la Disposición adicional segunda del R.D. 1812/1994 de 2 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Carreteras, facultan a la Administración del Estado para determinar la normativa técnica básica de interés general, así como cualquier otra que se derive del cumplimiento de tratados, convenios, acuerdos y recomendaciones de carácter internacional suscritos por España.

Tanto el Artículo 52.2 de la Ley 13/1995 de 18 de mayo, de Contratos de las Administraciones Públicas, como el Artículo 39 del Decreto 3354/1957 de 28 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Contratación, prevén la posibilidad de que el Gobierno establezca, previo informe de la Junta Consultiva de Contratación Administrativa, la documentación técnica básica a que hayan de ajustarse las obras contratadas por el Estado.

Por todo lo indicado, mientras se termina de elaborar la Norma 6.3-IC "Rehabilitación de firmes y pavimentos", (que incluirá lo que se refiere a la presente Orden Circular), se informa por la Junta Consultiva de Contratación Administrativa, se aprueba por el Gobierno y supera la tramitación en el ámbito europeo; es urgente emplear una normativa, aunque sea parcial, como le ocurre a la presente Orden Circular, puesta al día y adaptada a la problemática específica de la Red de Carreteras del Estado.

Con objeto de rellenar estas carencias y complementar la Norma 6.3 IC "Refuerzo de Fírmes", actualmente vigente, hasta tanto se proceda a su revisión y aprobación en los términos indicados en los apartados anteriores, esta Dirección General ha decidido que, para los proyectos de rehabilitación de los firmes con pavimento bituminoso, se siga lo indicado en el texto que acompaña a la presente Orden Circular sobre "Recomendaciones para el proyecto de las actuaciones de rehabilitación estructural de firmes con pavimento bituminoso", y sus anejos: "Guía para el estudio de las deflexiones en firmes con pavimento bituminoso" y "Criterios a tener en cuenta para el estudio de las actuaciones preventivas".

Teniendo en cuenta todo lo anterior, la Dirección General de Carreteras ha dispuesto lo siguiente:

- Aprobar las "Recomendaciones para el proyecto de las actuaciones de rehabilitación estructural de firmes con pavimento bituminoso y sus anejos "Guía para el estudio de las deflexiones en firmes con pavimento bituminoso" y "Criterios a tener en cuenta para el estudio de las actuaciones preventivas", cuyos textos acompañan a la presente Orden Circular. Este último anejo de aplicación exclusiva de actuaciones de reposición y conservación de firmes.
- Definir el ámbito de aplicación de estas Recomendaciones y de sus anejos a los siguientes tipos de proyectos, obras y actuaciones en general:
  - \* Proyectos de acondicionamiento de carreteras y/o rehabilitación y mejora de las existentes, cuya Orden de Estudio se autorice, o el proyecto se encuentre en fase de redacción, con posterioridad a la fecha de entrada en vigor a la presente Orden Circular.
  - \* En la programación y diseño de las actuaciones de conservación ordinaria de firmes y pavimentos, se tendrán en cuenta los criterios técnicos establecidos en las Recomendaciones que acompañan a la presente Orden Circular.

En el caso de obras en fase de licitación o adjudicadas, se elevará consulta a las Subdirecciones Generales de Construcción o de Conservación y Explotación de esta Dirección General, según corresponda, acerca de la conveniencia de proceder a modificar el contrato para adecuarlo a lo previsto en la presente Orden Circular.

Madrid, 24 de febrero de 1997

EL DIRECTOR GENERAL DE CARRETERAS

*Juan Fco. Lazcano Acedo*

# **RECOMENDACIONES PARA EL PROYECTO DE LAS ACTUACIONES DE REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DE FIRMES CON PAVIMENTO BITUMINOSO**

**1 OBJETO** El objeto de las presentes Recomendaciones es dar las directrices al Ingeniero encargado de estudiar la rehabilitación estructural del firme de una carretera con pavimento bituminoso que le permita programar y diseñar las soluciones más idóneas en cada caso.

## **2 ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y SELECCIÓN DE LA MÁS APROPIADA**

En el apartado 2 del anexo 1 de las presentes Recomendaciones denominada "Guía para el estudio de las deflexiones en firmes con pavimento bituminoso", se indican las diferentes etapas que se deberán desarrollar para la determinación de la solución más adecuada. De esta forma y después de recoger los datos básicos de partida, evaluar el firme existente y establecer el diagnóstico sobre su estado, se analizarán las distintas soluciones de rehabilitación posibles y se seleccionará y proyectará la más apropiada en cada caso, de acuerdo con las presentes Recomendaciones.

La selección y diseño de la rehabilitación se individualizará para cada uno de los tramos homogéneos de comportamiento uniforme que se hayan determinado basándose en la inspección visual y el estudio de las deflexiones, realizados de acuerdo con lo que se indica en el mencionado anexo. A las zonas singulares que pudieran existir dentro de cada tramo homogéneo se las dará el tratamiento específico que le corresponda.

A efectos de las posibles soluciones de rehabilitación estructural de firmes con pavimento bituminoso, básicamente se considerarán dos tipos de actuación:

- Fresado de parte del firme existente y reposición con mezcla bituminosa hasta alcanzar una superficie a la misma cota que la superficie original del pavimento antiguo. Puede, según el caso, ir seguido de un recrecido con mezcla bituminosa extendido a todo lo ancho de la calzada.
- Recreido con mezclas bituminosas (solución tipo de refuerzo convencional).

Ambos tipos de actuación se complementarán con el saneo del firme en zonas de blandones. No se considerará, en principio, la demolición total del firme y su sustitución por otro nuevo, que deberá reservarse sólo para casos muy excepcionales.

La selección de la solución idónea en cada tramo homogéneo de comportamiento uniforme deberá basarse en un estudio técnico-económico que analice y valore las distintas soluciones posibles. Dentro de este análisis, deberán combinarse conceptos como el de disponibilidad de materiales, facilidad de ejecución, durabilidad de los firmes, costes de ejecución, desvíos provisionales, elevación de barreras en su caso, gálibos, aceras, etc.

Por ello, para la selección de la mejor solución, deberá hacerse un análisis técnico-económico, que, dentro de las opciones más aconsejables, determine la más rentable, teniendo en cuenta no sólo los costos de ejecución sino también los de la conservación y explotación posterior.

Seleccionadas las soluciones más apropiadas para los distintos tramos, se procederá al desarrollo del proyecto. Sin embargo, éste no se refiere sólo a establecer su tipo y los espesores de rehabilitación. Hay que atender a toda una serie de aspectos que garanticen su éxito: estudio de los materiales, dosificaciones, pliego de prescripciones técnicas particulares que asegure la buena calidad del firme, modo de tratamiento de juntas, integración de los arcenes al conjunto de la carretera (con previsión de la naturaleza y

espesores de las capas que se construyan o recrezcan), sistemas de drenaje existentes y su eventual mejora, etc.; además de tener prevista la manera de resolver los problemas constructivos que puedan surgir durante la ejecución de las obras.

En síntesis, y a efectos de aplicación de las presentes Recomendaciones, en el análisis de la solución habrá que considerar, entre otros, los siguientes parámetros:

- Características del tramo (si es calzada única o doble, si existen limitaciones de gálibo, si se trata de una estructura, etc.).
- Coste de la actuación.
- Coste adicional ocasionado a los usuarios por la ejecución de las obras.
- Vida útil prevista de la actuación, es decir, tiempo que transcurrirá hasta que sea necesario realizar otra rehabilitación.
- Coste de conservación ordinaria de la actuación a lo largo de su vida.

Sin perjuicio de los estudios basados en los anteriores principios, como regla general puede indicarse que:

- La solución de fresado y reposición del firme será, en principio, la más indicada en los casos en los que exista un carril que requiera una rehabilitación mucho más importante que la de los restantes carriles de la calzada.

Tal es el caso de las autovías y carreteras de calzada doble en las que haya que rehabilitar los carriles exteriores, por donde circula principalmente el tráfico pesado, y en las que probablemente el resto de los carriles no precisen la misma rehabilitación estructural, siendo suficiente, probablemente, la extensión de una nueva capa de rodadura. Podrá ocurrir lo mismo en carreteras de calzada única, en las que el carril adicional para vehículos lentos se encuentre mucho más degradado que los dos restantes, o en aquellas en las que la composición del tráfico pesado ponga de manifiesto un fuerte desequilibrio entre ambos sentidos de circulación.

- Prescindiendo de criterios económicos y atendiendo únicamente a razones de tipo funcional, la solución de fresado y reposición del firme se elegirá siempre que tenga que mantenerse la rasante por limitaciones de gálibo (paso bajo estructuras, túneles, etc.) o por otros motivos (travesías, intersecciones, etc). Asimismo, se elegirá esta solución en el paso sobre estructuras, para no recargarlas innecesariamente.
- En los demás casos (carreteras de calzada única, fundamentalmente), la solución de recrecido suele tener ventajas económicas ya que representa en muchas situaciones un menor perjuicio para los usuarios, al ser las interrupciones y cortes de circulación durante las obras menos prolongados.

### **3 FACTORES DE DIMENSIONAMIENTO**

#### **3.1 Tráfico pesado**

A efectos de aplicación de las presentes Recomendaciones y de la evaluación de las solicitudes del tráfico, se definirán las categorías de tráfico pesado de acuerdo con la tabla 1 de la vigente Instrucción 6.1 y 2-IC "Secciones de Firme".

#### **3.2 Deflexión de cálculo**

A efectos de aplicación de las presentes Recomendaciones, la deflexión de cálculo ( $d_{kc}$ ), según se obtiene en el apartado 5.10 del anejo "Guía para el estudio de las deflexiones

en firmes con pavimento bituminoso", será el parámetro básico de dimensionamiento, junto con la categoría de tráfico pesado, para la obtención de los espesores de fresado y reposición, así como el de recrecido del firme existente.

### **3.3 Materiales para la rehabilitación del firme**

En el mismo sentido que el apartado anterior, en los aspectos referentes a las capas que en su conjunto conformen la solución de rehabilitación adoptada y a sus materiales constituyentes, se seguirán las prescripciones técnicas indicadas en los siguientes documentos técnicos actualmente vigentes:

- Instrucción 6.1 y 2-IC "Secciones de firme", aprobada por Orden Ministerial de 23 de mayo de 1989.
- Artículos 500 "Zahorra natural" y 501 "Zahorra artificial", incluídos como anexos en la Instrucción sobre secciones de firmes en autovías, aprobados por Orden Ministerial de 31 de julio de 1986.
- Artículos 211 "Betunes asfálticos" y 213 "Emulsiones asfálticas", aprobados por Orden Ministerial de 21 de enero de 1988 y parcialmente modificada posteriormente por Orden Ministerial de 8 de mayo de 1989.
- Orden Circular 294/87T de 23 de diciembre de 1987 "Recomendaciones sobre riegos con ligantes hidrocarbonados".
- Orden Circular 299/89T de 23 de febrero de 1989 "Mezclas bituminosas en caliente".
- Orden Circular 322/97T de 24 de febrero de 1997 "Ligantes bituminosos de reología modificada y mezclas bituminosas discontinuas en caliente para capas de rodadura de pequeño espesor".

## **4 TIPOLOGÍA DE LAS SOLUCIONES DE REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL**

### **4.1 Fresado y reposición del firme existente**

Consistirá esta solución en el fresado y retirada por medios mecánicos de los materiales que constituyan el firme hasta la profundidad que sea precisa, para posteriormente reponerlo con el espesor de mezcla bituminosa necesario. Los tipos de actuación, así como las diferentes capas y sus espesores, se determinarán de acuerdo con los valores de las deflexiones y la inspección visual.

Para la delimitación de la superficie y profundidad de fresado se partirá de los valores puntuales de las deflexiones patrón (corregidos por humedad y temperatura, de acuerdo con los criterios recogidos en el anejo 1 de estas Recomendaciones, denominado "Guía para el estudio de las deflexiones en firmes con pavimento bituminoso") y de los resultados de una inspección visual detallada realizada por el ingeniero autor del proyecto.

Si el agotamiento estructural que ya existiese o esté próximo a producirse afectara a las capas del firme, pero no a la explanada, se saneará el firme fresando y sustituyendo por mezcla bituminosa en caliente hasta una profundidad total variable, según la categoría del tráfico pesado. Esta profundidad, será la necesaria para que el espesor total de mezcla bituminosa de reposición y nueva extensión (incluido, en su caso, el del recrecido que se vaya a realizar) sea el indicado en la tabla 1.

Se entenderá que existe o está próximo a producirse el agotamiento estructural del firme siempre que el valor puntual de la deflexión patrón supere los umbrales indicados

**TABLA 1.- ESPESOR TOTAL DE MEZCLA BITUMINOSA (cm)**

TIPO DE FIRME		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO
Flexible y semiflexible	Semirrígido	
30	18	T0
25	15	T1
20	12	T2
15	12	T3

en la tabla 2, salvo que un estudio y análisis más específico del estado de cada tramo homogéneo justifique la asignación de valores distintos para dichos umbrales.

**TABLA 2**

TIPO DE FIRME	TRÁFICO PESADO	DEFLEXIÓN PATRÓN (centésimas de milímetro)
FLEXIBLE Y SEMIFLEXIBLE	T0	40
	T1	60
	T2	80
	T3	125
	T4	*150 **200
SEMIRRÍGIDO	T0 y T1	35
	T2 y T3	50
	T4	75

\* firmes con espesor de pavimento bituminoso  $\geq 5$  cm.

\*\* firmes con pavimento bituminoso inferior a 5 cm.

También se entenderá que existe agotamiento estructural del firme cuando se observe en su superficie un agrietamiento de tipo estructural (zonas del carril cuarteadas en malla gruesa o fina y zonas de las rodadas con grietas longitudinales, ramificadas o no). En este caso, si no se conoce la causa del agrietamiento, se procederá a un reconocimiento más detallado del firme del carril mediante extracción de testigos y ejecución de calicatas escalonadas capa a capa, para conocer cuál es el nivel de deterioro existente. El fresado (y consiguiente reposición del firme) deberá llegar hasta la capa cuya superficie no presente agrietamiento estructural, siempre que las deflexiones en la zona no superen los umbrales indicados en la tabla 2.

#### **4.2 Reparación de las zonas singulares en las que el agotamiento estructural afecta a la explanada**

Previamente a la actuación tipo indicada en el apartado 4.1, se sanearán los blandones o zonas singulares en las que el agotamiento estructural afecta a la explanada, demoliendo el firme hasta una profundidad de 50 cm por debajo de la sub-rasante del firme si la coronación dispone de suelos adecuados y de 80 cm para suelos inadecuados. La excavación realizada se rellenará en su parte inferior con zorra artificial, sobre la cual, se dispondrá el espesor calculado de mezcla bituminosa. También, en estos casos, se colocará un dren que permita la salida del agua que pudiera acumularse en el fondo de la zona excavada.

Si no se dispusiera de un estudio específico del tramo que demuestre lo contrario, se entenderá que el agotamiento estructural afecta a la explanada no sólo en las zonas localizadas de blandones, detectadas visualmente, sino cuando la deflexión puntual supere los valores indicados en la tabla 3.

**TABLA 3**

TIPO DE FIRME	TRÁFICO PESADO	DEFLEXIÓN PATRÓN (centésimas de milímetro)
FLEXIBLE Y SEMIFLEXIBLE	T0	125
	T1	150
	T2	200
	T3	250
	T4	300
SEMIRRÍGIDO	T0 y T1	100
	T2 y T3	150
	T4	200

#### 4.3 Sellado de grietas y fisuras

Si en las zonas no tratadas existieran grietas y fisuras debidas a causas no imputables a pérdida de capacidad estructural del firme, se sellarán siempre que la longitud de sellado sea inferior a 3 km por kilómetro de calzada, incluso si estuviera previsto un recrecido en dichas zonas.

En caso de que la longitud de sellado en el tramo fuera superior a los 3 km por kilómetro de calzada se realizará un estudio especial para determinar sus causas y su evolución previsible, con objeto de proyectar la solución de rehabilitación más adecuada y rentable.

#### 4.4 Recrecido del firme existente

La solución de recrecido (denominación que se emplea en las presentes Recomendaciones para el refuerzo convencional) consistirá en la extensión de una capa de mezcla bituminosa de un determinado espesor sobre el firme existente. La actuación se extenderá a todo el tramo definido como homogéneo y de comportamiento uniforme, de acuerdo con los criterios indicados en el anejo 1 "Guía para el estudio de las deflexiones en firmes con pavimento bituminoso".

Previamente se procederá a sanear los blandones o las zonas singulares en las que las deflexiones puntuales superan los valores indicados en la tabla 3. En este saneo se demolerá el firme hasta una profundidad de 50 cm por debajo de la subrasante del firme para suelos adecuados y 80 cm por debajo de la subrasante del firme para suelos inadecuados, de acuerdo con lo indicado en el apartado 4.2.

La superficie de la explanada deberá quedar al menos a 60 cm por encima del nivel más alto previsible de la capa freática donde el suelo existente sea seleccionado, a 80 cm donde sea adecuado, y a 100 cm donde sea tolerable. A tal fin, se adoptarán medidas tales como la colocación de drenes subterráneos, la interposición de geotextiles o de una capa drenante, etc., y se asegurará la evacuación del agua infiltrada a través del firme de la calzada y arceles, o a través de la junta entre éstos.

La excavación realizada para suprimir blandones se rellenará en su parte inferior con zahorra artificial hasta la cota inferior de la mezcla bituminosa existente, en el caso de firmes flexibles o semiflexibles, o hasta la del material de base tratado con conglomerante hidráulico, en el caso de firmes semirrígidos. A continuación, se repondrá con mezcla bituminosa hasta enrasar con la cota superior del firme existente. Se preverá en estos casos la realización de un dren subterráneo que dé salida al agua que se puede acumular en el fondo de la zona excavada.

Una vez realizados los saneos, se procederá al recrecido con el espesor de mezcla bituminosa indicado en las tablas 4 y 5 de las presentes Recomendaciones, previo sellado

de las grietas no debidas a agotamiento estructural, de acuerdo con lo indicado en el apartado 4.3. Las grietas transversales se sellarán en todos los supuestos, y las longitudinales sólo en el caso de que el espesor del recrecido de mezcla bituminosa sea igual o inferior al indicado en la tabla 1 para firmes semirrígidos.

La tabla 4 corresponde al refuerzo de los firmes flexibles y semiflexibles, es decir, los constituidos por capas de mezcla bituminosa sobre materiales granulares. Este tipo de actuación consistirá en un recrecido con el espesor de mezclas bituminosas que se indica en la zona central de la tabla. Estos espesores necesarios vendrán dados en función de la deflexión de cálculo y de la categoría de tráfico pesado.

Análogamente en la tabla 5 se indican los espesores de refuerzo de los firmes semirrígidos, es decir, los constituidos por mezclas bituminosas sobre, al menos, una capa de material tratado con conglomerantes hidráulicos.

**TABLA 4.- ESPESOR DE REFUERZO PARA FIRMES FLEXIBLES Y SEMIFLEXIBLES  
(en cm de mezcla bituminosa)(\*)**

$d_{kc}$	T0	T1	T2	T3	T4
0-40	<b>ZONA DE ACTUACIÓN PREVENTIVA</b>				
40-60	10	5			
60-80	12	10	5		
80-100	15	12	10	4	
100-125	18	15	12	8	
125-150		18	15	10	4
150-200			18	12	8
> 200	<b>ZONA DE ESTUDIO ESPECIAL</b>				

\* Valor mínimo en cualquier punto de la sección transversal del carril de proyecto.

En las zonas de rehabilitación con recrecido, además de tener en cuenta los espesores de refuerzo indicados en las tablas 4 y 5, se deberá cumplir, en todos los casos, la condición de que el espesor total de mezcla bituminosa resultante (pavimento existente+recrecido) sea como mínimo el indicado en la tabla 1.

**TABLA 5.- ESPESOR DE REFUERZO PARA FIRMES SEMIRRIGIDOS  
(en cm de mezcla bituminosa)(\*)**

$d_{kc}$	T0	T1	T2	T3	T4
0-35	<b>ZONA DE ACTUACIÓN PREVENTIVA</b>				
35-50	12	10			
50-80	15	12	10	8	
80-125		15	12	8	4
125-150		18	15	10	4
150-200			18	12	8
> 200	<b>ZONA DE ESTUDIO ESPECIAL</b>				

\* Valor mínimo en cualquier punto de la sección transversal del carril de proyecto.

A los efectos de la evaluación del espesor total en los casos en que el firme esté muy cuarteado, no se tendrá en cuenta el espesor de las capas del existente que estén afectadas por ese tipo de deterioro. Así, por ejemplo, si la capa de rodadura se encontrase agrietada, pero las inferiores estuvieran en buen estado, sólo se descontará del espesor total, el de la capa de rodadura.

Además de los casos considerados, podrá ser conveniente la extensión de una capa de rodadura (en general, de 5 cm de espesor para las categorías de tráfico T0, T1 y T2, y de 4 cm, para T3 y T4) cuando se trate de zonas de pequeña longitud relativa entre tramos sobre los que se actúa, con el fin de dar continuidad a la capa de rodadura.

En el caso de obras de acondicionamiento o duplicación de calzada en las que se aprovechen parte o la totalidad de calzadas existentes, se aplicarán a éstas los espesores definidos en las tablas 4 y 5 anteriores, siguiendo la metodología contenida en las presentes Recomendaciones. Cuando en estos tipos de obras existan tramos situados en la zona denominada en dichas tablas de actuación preventiva, se proyectarán en cualquier caso, con los espesores mínimos de firme que figuran en las tablas, en la zona correspondiente a la rehabilitación.

#### **4.5 Actuaciones de rehabilitación preventiva**

En las zonas denominadas en las tablas 4 y 5 como de actuación preventiva, el valor de la deflexión de cálculo es menor del que se requiere para hacer una actuación de rehabilitación estructural, al no alcanzar los umbrales de agotamiento definidos en las tablas anteriores. En estos casos (con la salvedad explicitada en el último párrafo del apartado 4.4) suele ser rentable una actuación preventiva que prolongue la vida del firme antes de que la aceleración de las degradaciones obligue a una rehabilitación estructural más profunda (de las contempladas anteriormente).

Las actuaciones preventivas consistirán, en general, en recrecidos ligeros de mezclas bituminosas (4 ó 5 cm) e incluso en tratamientos superficiales, por la capacidad de éstos para impermeabilizar, lo que también supone un retraso de la degradación estructural generalizada. No obstante, para las categorías de tráfico pesado T0 a T2 son preferibles los recrecidos por la mayor prolongación de la vida útil de la estructura del firme que implican.

La determinación del momento adecuado para llevar a cabo una actuación preventiva se deducirá de estudios técnico-económicos en los que se tenga en cuenta la evolución previsible del estado del firme, de acuerdo con sus características (tipo, espesores, edad, estado, tráfico, clima, etc), la prolongación de la vida útil que suponen distintas alternativas de actuación preventiva y/o correctiva, y el coste de dichas alternativas. Para la realización de dichos estudios pueden servir de orientación los conceptos y consideraciones indicados en la nota técnica de la Subdirección General de Conservación y Explotación, que se adjunta como anejo 2 de las presentes Recomendaciones.

Como orientación suele ser conveniente intervenir preventivamente a partir de índices de deterioro estructural del tramo homogéneo (porcentaje de longitud de carril con deterioros por agotamiento estructural) de 5 ó 10 para las categorías de tráfico pesado más altas (T0 ó T1, respectivamente), especialmente en firmes semirrígidos. Con este tipo de actuaciones se puede conseguir una economía muy importante de los gastos de conservación a largo plazo, por lo que, siempre que sea posible, previo estudio correspondiente, se seguirá la metodología que se expone en el punto 2 de la nota técnica mencionada (anejo 2).

#### **4.6 Zonas singulares de estudio especial**

Las zonas de estudio especial indicadas en las tablas 4 y 5 quedan fuera de la solución convencional de recrecido, debido al elevado valor de la deflexión de cálculo. En estos

casos, se analizarán con detalle los motivos de esta anomalía para determinar la solución de rehabilitación más apropiada.

El estudio especial tendrá por objeto decidir entre la reconstrucción del firme, total o parcial (el fresado y reposición se incluye en este concepto), o el recrecido con las correcciones complementarias de drenaje u otras que procedan. Requerirá, en general, la realización de extracción de testigos y calicatas, en las que se tomarán muestras de los materiales del firme y explanada existentes para su ensayo y evaluación en el laboratorio. Por otra parte, se anotarán los espesores de las capas, grado de compactación, humedad, etc.

#### **4.7 Rehabilitación de arcenes**

En el supuesto de la rehabilitación de la calzada con soluciones basadas en su recrecido, el firme de los arcenes de anchura no superior a 1,25 m será prolongación del firme de la calzada rehabilitada adyacente. Su ejecución será simultánea, sin junta longitudinal entre calzada y arcén.

En arcenes de anchura superior a 1,25 m, su firme dependerá de la categoría de tráfico pesado prevista para la calzada y de la sección adoptada en ésta. Salvo justificación en contrario, se adoptará una de las soluciones que se indican en los apartados 5.1, 5.2 y 5.3, de la Instrucción 6.1 y 2-IC en lo referente a arcenes para secciones de firme con pavimento bituminoso, que están previstas para unas sollicitaciones del tráfico pesado acordes con la función propia de los arcenes.

El espesor total de pavimento en los arcenes no será nunca superior al especificado en la Norma 6.1 y 2-IC para secciones de nueva construcción, excepto por limitaciones constructivas derivadas de una rasante de la calzada elevada por un importante espesor de recrecido. En este supuesto, y teniendo en cuenta la gran incidencia que en la medición pueden tener los arcenes, en especial en carreteras con calzadas separadas, será imprescindible recurrir a soluciones mixtas de fresado, reposición y recrecido frente a las de recrecido, como se ha indicado en el apartado 2 de las presentes Recomendaciones. En el caso de que se previeran sollicitaciones anormalmente intensas, podrán justificarse rehabilitaciones de arcenes de mayor capacidad estructural.

En el caso de que la calzada que se va a rehabilitar dispusiera de una capa drenante, ésta se deberá prolongar bajo el arcén, hasta desaguar a un sistema de drenaje adecuado.

Para fijar los espesores de las capas del firme del arcén se tendrá en cuenta la distribución del firme de la calzada, a fin de coordinar su construcción. Si fuera previsible un ensanche de la calzada a costa del arcén, se procurará asimismo adoptar una solución compatible con él.

#### **4.8 Algunas prescripciones de las obras a incluir en los proyectos de rehabilitación**

En capas de rodadura correspondientes a la rehabilitación de una carretera en servicio con solución de recrecido de espesor superior a diez centímetros (10 cm), realizadas con mezclas bituminosas y para las categorías de tráfico pesado T0, T1 y T2, el índice de regularidad internacional (I.R.I.) será inferior a una unidad y cinco décimas (1,5) en el cincuenta por ciento (50%) de los hectómetros del tramo, a dos (2) en el ochenta por ciento (80%) y a dos unidades cinco décimas (2,5) en la totalidad.

Para el resto de las actuaciones de rehabilitación superficial o estructural, en las categorías de tráfico pesado T0 a T2, terminadas con una capa de rodadura de mezcla bituminosa, el índice de regularidad internacional será inferior a dos unidades (2) en el cincuenta por ciento (50%) de los hectómetros del tramo, a dos unidades cinco décimas (2,5) en el ochenta por ciento (80%) y a tres unidades (3) en la totalidad.

En actuaciones de rehabilitación superficial y/o estructural con espesores totales inferiores a diez centímetros (10 cm) y capa de rodadura con mezclas bituminosas para las categorías de tráfico pesado T3 y T4, el índice de regularidad internacional (I.R.I.) será inferior a tres unidades y cinco décimas (3,5) en la totalidad de los hectómetros del tramo. A los efectos de esta prescripción, se excluyen los firmes y pavimentos constituidos por capas granulares y tratamientos superficiales en los que la actuación de rehabilitación consista únicamente en la aplicación de otro tratamiento superficial (riego con gravilla o lechada bituminosa).

# **ANEJO 1**

## **GUÍA PARA EL ESTUDIO DE LAS DEFLEXIONES EN FIRMES CON PAVIMENTO BITUMINOSO**

# GUÍA PARA EL ESTUDIO DE LAS DEFLEXIONES EN FIRMES CON PAVIMENTO BITUMINOSO

**1 OBJETO** Esta guía tiene por objeto facilitar la labor del Ingeniero que tenga que analizar las deflexiones de una carretera con pavimento bituminoso y, basándose en ellas, además de en otros datos de estudio, proyectar la rehabilitación estructural más adecuada en cada uno de los tramos homogéneos diferenciados, que se establezcan a partir del análisis completo de su problemática específica.

La guía pretende además simplificar y armonizar todas las fases de evaluación, interpretación y determinación de las deflexiones, así como del posterior cálculo de los espesores de fresado, reposición y/o recrecido con los que se definirán finalmente las actuaciones que haya que llevar a cabo.

## 2 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DE UN FIRME

Planteada la necesidad de la rehabilitación estructural de un firme de carretera, para la determinación de la solución más adecuada, en el caso más general se deberán realizar las siguientes etapas:

1. Recogida de los datos sobre las características básicas del firme, así como de su entorno y cuantificación de las solicitaciones.
2. Evaluación del firme.
3. Establecimiento de un diagnóstico sobre su estado.
4. Análisis de soluciones.
5. Selección y diseño de la solución más apropiada.

Estas etapas podrán en algunos casos, simultanearse y simplificarse, según la naturaleza de los deterioros del firme y la técnica de rehabilitación que se pretenda utilizar como más idónea.

Dada su finalidad, esta guía se centra específicamente en la etapa de evaluación del firme mediante el estudio de deflexiones, contando con el imprescindible auxilio de la inspección visual y otros datos complementarios de los que se disponga en el momento de realizar el proyecto de rehabilitación.

## 3 DATOS BÁSICOS DE PARTIDA

Para poder evaluar el estado de un firme, es muy importante recopilar previamente sus parámetros más significativos, así como los del entorno y de las solicitaciones del tráfico. Los datos básicos, de un tramo de carretera, más interesantes de analizar pueden ser:

### *a) Datos del firme existente*

- Tipo y estructura del firme de la calzada y arcenes (naturaleza y espesor de sus capas).
- Características iniciales de los materiales constituyentes.
- Fecha de puesta en servicio.
- Tipos y fechas de realización de las distintas actuaciones de conservación o rehabilitación del firme desde su construcción.
- Otros datos de los que se disponga (inspección visual previa, auscultaciones, etc.).

### *b) Entorno y solicitaciones*

- Características geométricas (sección transversal, perfil longitudinal).
- Tipo y características de la explanada.

- Naturaleza del suelo.
- Drenaje.
- Condiciones climáticas de la zona.
- Intensidad y composición del tráfico, fundamentalmente, el pesado.

## **4 EVALUACIÓN DEL FIRME**

### **4.1 Generalidades**

La evaluación del firme existente tendrá por objeto caracterizar su estado con la finalidad de establecer un diagnóstico que permita seleccionar y proyectar la actuación de rehabilitación más adecuada en cada uno de los tramos homogéneos, de comportamiento sensiblemente uniforme, en que pueda dividirse la carretera en estudio.

El proceso de recopilación de la información necesaria para evaluar el firme se deberá hacer con la amplitud y detalle precisos en cada caso para conseguir los objetivos de la evaluación y definición de la actuación a llevar a cabo.

Para el estudio del estado del firme de una carretera se dispondrá como elementos básicos de la evaluación del deflectograma y de la segmentación en tramos homogéneos de comportamiento uniforme, caracterizados por el valor medio de las deflexiones patrón, su dispersión y la deflexión característica.

Junto con las deflexiones, una inspección visual detallada definirá los trabajos complementarios de extracción de testigos, calicatas y eventuales ensayos que se deban realizar. La inspección visual se intensificará en aspectos concretos que convenga aclarar (como por ejemplo, zonas singulares que no cumplan las condiciones de tramificación, puntos o zonas de extensión muy limitada con deflexiones anormalmente altas, estado del drenaje, etc). Es importante determinar los tramos homogéneos de comportamiento uniforme, cuyo estudio puede hacerse globalmente, incluso aunque no sean adyacentes. Se tendrá así una visión más amplia de los problemas, que puede reducir los trabajos de reconocimiento y análisis mediante extracción de testigos, calicatas, ensayos de laboratorios o in situ, u otros igualmente costosos.

### **4.2 Tramificación previa**

El análisis de los datos de partida, antes mencionados, permitirá hacer una primera tramificación. Esta es especialmente importante en itinerarios largos, ya que facilitará la programación de los trabajos de campo necesarios para conseguir muestras suficientemente representativas, y el análisis de los datos disponibles para establecer el posterior diagnóstico sobre el estado del firme.

A los efectos de esta tramificación, se considerarán tramos distintos aquellos en los que existan variaciones sensibles en los datos de partida indicados en el apartado 3, que puedan influir significativamente en el comportamiento del firme, y en la solución de rehabilitación a adoptar.

En principio, se considerarán tramos homogéneos (salvo mayor información de origen, por ejemplo, relativa a la naturaleza de la explanada) los que respondan simultáneamente a los siguientes datos idénticos de partida en el inventario de firmes y en la categoría de tráfico pesado:

- Estructura del firme (naturaleza y espesor de capas).
- Fecha en que se realizó la última actuación de tipo estructural sobre el firme (sin tener en cuenta las de tipo superficial, como riegos con gravilla, lechadas bituminosas, microaglomerados o mezclas drenantes, de espesor igual o menor que 3 cm).
- Categoría de tráfico pesado.

Los tramos de estudio deberán ser homogéneos no sólo en cuanto a su origen, sino también de comportamiento uniforme. Esta uniformidad no podrá normalmente establecerse contando exclusivamente con los datos antes reseñados, sino que deberán basarse además en la inspección visual y en la auscultación con equipos de medida de deflexiones, completándose el análisis con sondeos, calicatas, toma de muestras y ensayos de laboratorio, según se indica en los apartados posteriores de esta guía.

### **4.3 Inspección visual**

La inspección visual es fundamental para la evaluación precisa del estado del firme. Independientemente de disponer de los datos de las campañas de auscultación superficial de los pavimentos, cuando sea preciso abordar un proyecto de rehabilitación estructural, los datos disponibles se tendrán que complementar con una inspección visual detallada que deberá hacerse por técnicos especialistas, a poder ser en la época más adecuada del año, de acuerdo con las características climáticas de cada zona.

El objeto de la inspección visual será el firme; pero también todo lo de su entorno que pueda tener influencia en su estado, tal como la situación de la explanada (desmonte, terraplén o media ladera), las condiciones de drenaje (cunetas, desagües, drenes, etc.) y las características del terreno que lo sustenta.

Con la inspección visual se intentará fundamentalmente caracterizar el estado del firme. Al mismo tiempo, esta inspección ayudará a tramificar la carretera objeto de estudio, y a interpretar los resultados de la auscultación, efectuada con equipos de medida de la deflexión.

La inspección visual, las deflexiones y los otros parámetros de que se disponga, servirán para hacer una programación óptima de los trabajos de campo, que no deberán ser más que los necesarios (lo que redundaría en un mayor coste económico y en un aumento de los plazos de estudio y redacción del proyecto), ni menos de lo conveniente, para poder evaluar correctamente el estado del firme y definir con suficiente precisión la tipología de las soluciones de rehabilitación.

En algún caso, la inspección visual puede ser determinante en la elección de la solución de rehabilitación más adecuada. También este tipo de reconocimiento cuidadoso juega un papel importante, aunque no exclusivo, en la determinación de la solución correcta en las zonas donde, por la magnitud de las deflexiones, se requiera un estudio especial o donde convenga un tratamiento singular y diferenciado del tramo en su conjunto.

### **4.4 Auscultación estructural**

La inspección visual realizada, según se indica en el apartado 4.3., deberá completarse con la auscultación mediante equipos que proporcionen información sobre la capacidad resistente del firme. Básicamente, con todos los equipos de medida existentes se aplica una sollicitación al firme, se mide su respuesta (normalmente, la deformación vertical o deflexión) y, a partir de ella, se evalúan sus características estructurales y, en su caso, las de la coronación de la explanada. La sollicitación aplicada, la respuesta obtenida y la forma de medirla, varían de unos equipos y métodos a otros, por lo que es preciso unificar los resultados según se indica en el apartado 5 de esta guía.

Por otra parte, el rendimiento de estos equipos es también muy variable: los hay que se desplazan a velocidad constante, midiendo en una o ambas rodadas a intervalos constantes, normalmente entre 3 y 5 m (deflectógrafos tipo Lacroix, curvímetro, etc.), mientras que otros deben ser estacionados en cada punto de medida (viga Benkelman, deflectómetro óptico, deflectómetros de impacto, etc.). Todo ello obliga a adoptar unos parámetros de referencia (deflexión patrón y deflexión de cálculo) que se desarrollan también en el apartado 5 de esta guía.

En el proceso completo de evaluación del firme existente, tras el análisis de los datos de partida, la inspección visual y la auscultación con equipos, será aconsejable, en algunos casos realizar sondeos, calicatas, toma de muestras y ensayos de laboratorio para completar los datos anteriores. Básicamente se deberá obtener información de carácter puntual, pero precisa, sobre:

- La naturaleza y espesor de las distintas capas del firme
- Las características resistentes de las capas y adherencia entre ellas
- Las características y estado de la explanada
- El origen y extensión de los deterioros observados.

Cuando sea preciso este último tipo de información estará basado en la toma de muestras; el número de zonas que se debe investigar y su localización dependerá de cada caso concreto, pero deben ser tales que permitan el estudio de la problemática de cada uno de los tramos homogéneos de comportamiento uniforme y zonas singulares, que se hayan establecido.

En la mayoría de las ocasiones, las deflexiones excesivas en zonas de desmonte se deben a defectos de drenaje que deben corregirse. Es frecuente que, aunque no se llegue a esos valores considerados como excesivos, existan deficiencias generalizadas de drenaje (por lo menos, en lo que al drenaje superficial se refiere), que repercutan negativamente en la capacidad resistente del firme, y que habría que corregir en cualquier circunstancia, para garantizar la eficacia de cualquier solución de rehabilitación del firme que después se aplique.

El análisis de otros datos que proporcionan algunos equipos de medida de deflexión, como la línea de influencia de la deformada o el radio de curvatura, puede contribuir a clarificar o cuantificar los problemas y sus posibles soluciones.

## **5 ESTUDIO DE DEFLEXIONES**

### **5.1 Deflexión patrón**

A efectos de calcular los espesores de refuerzo de un firme, se considerará como deflexión patrón la recuperación elástica de la superficie del firme, al retirarse un par de ruedas gemelas (norma NLT-356), y en las condiciones siguientes:

- Eje de 128 kN (13 toneladas).
- Temperatura en la superficie del pavimento de 20°C.
- Valor mínimo del módulo de deformación de la explanada, dentro del campo de variación debida a los cambios de humedad en ella.

### **5.2 Procedimiento de medida**

Según el método de recuperación de la norma NLT-356, la deflexión patrón normalizada es la que se obtiene con la viga Benkelman.

Cuando se empleen equipos distintos para medir la deflexión, la obtenida se relacionará con la normalizada según se indica en el apartado 5.7.

### **5.3 Limitaciones de ensayo de la medida de la deflexión**

En cualquier caso, para que la medida de la deflexión sea válida y aplicable a soluciones de rehabilitación estructural, los ensayos se realizarán siempre que la temperatura de la superficie del pavimento esté comprendida entre los límites siguientes:

- De 2°C a 30°C, si el pavimento tiene 10 cm o más de mezcla bituminosa.
- De 2°C a 40°C, si el pavimento tiene menos de 10 cm de mezcla bituminosa.

#### 5.4 Deflectograma, tramificación y definición de zonas singulares

Para hacer una tramificación de zonas homogéneas en las que luego se aplicará una única solución de refuerzo o de rehabilitación estructural, es recomendable disponer de una representación gráfica de las deflexiones (deflectograma), tomando como abscisas las distancias al origen de los puntos de medida y, como ordenadas, los valores de las deflexiones. Un ejemplo puede ser el esquematizado en la figura 1.

Visualmente en él, se puede hacer una tramificación provisional de zonas homogéneas de comportamiento uniforme que complete o corrija la efectuada previamente, según lo indicado en el apartado 4.2. En la mayoría de los equipos de auscultación actuales, este deflectograma vendrá dado directamente por el propio equipo de medida.

Este método visual puede sustituirse o completarse con otros realizados con ordenador. Son interesantes, sobre todo, aquellos programas existentes de tratamiento automático de las deflexiones que permitan determinar, de una manera precisa, tramos estadísticamente homogéneos mediante tests de homogeneidad.

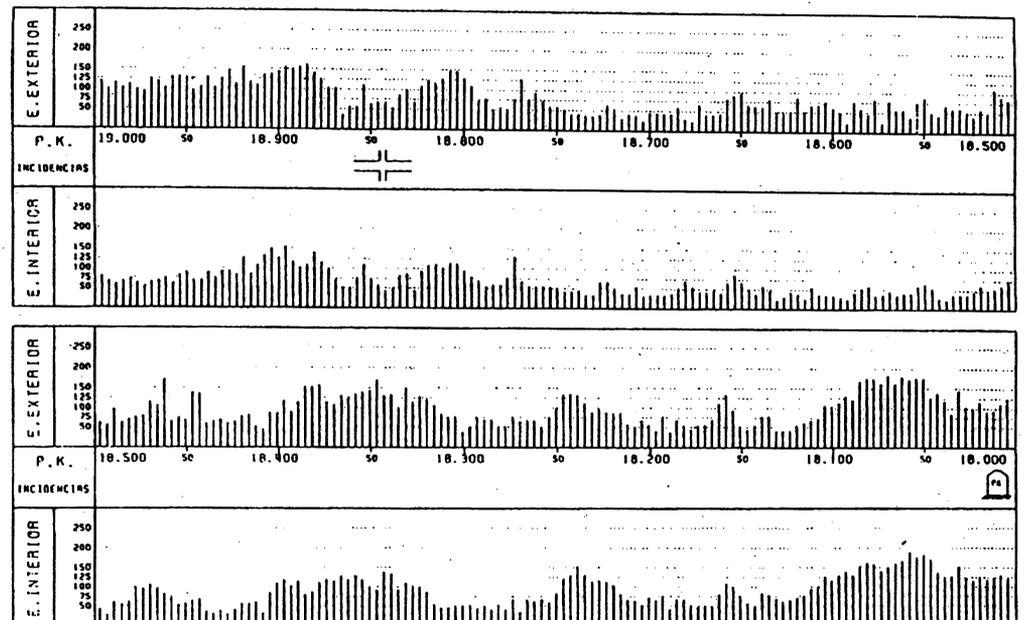


FIGURA 1.- EJEMPLO DE DEFLECTOGRAMA

Como a efectos constructivos no es operativo que los espesores de refuerzo estén cambiando cada pocos metros, convendrá establecer en cada proyecto de rehabilitación estructural una longitud mínima operativa de tramo de estudio, considerándose zonas singulares que requerirán un estudio especial, las que no alcancen la longitud mínima, que a efectos de aplicación de esta guía, se considera de 100 m.

En un tramo homogéneo (ver apartado 4.2) que tenga un comportamiento uniforme, sus deflexiones se distribuirán aleatoriamente alrededor de la media ( $m$ ), siguiendo una distribución normal con una desviación típica muestral ( $s$ ). La enorme experiencia acumulada en nuestro país sobre el tratamiento de las deflexiones medidas con cualquiera de los equipos de auscultación indica que es frecuente encontrar, en este tipo de tramos, unos coeficientes de variación de las deflexiones determinados por el cociente ( $s/m$ ) comprendidos entre 0,20 y 0,30. En tramos muy uniformes, se dan valores inferiores a estos. Entre 0,30 y 0,40 indican menor uniformidad, pero se considera todavía aceptable. Si el coeficiente de variación de las deflexiones supera ampliamente el valor de 0,40, no podrá considerarse que el tramo tiene un comportamiento uniforme.

Como consecuencia de todo lo expuesto, la tramificación deberá hacerse, entre otros, con los criterios siguientes:

1. En los tramos homogéneos de comportamiento uniforme, los valores de las deflexiones variarán aleatoriamente alrededor del valor medio (m).
2. Del orden del 95% de los valores de las deflexiones de cada tramo estarán comprendidos dentro del intervalo cuyo extremo superior sea vez y media el valor medio de las deflexiones, y cuyo extremo inferior sea la mitad de dicho valor medio (es decir, entre 0,5 m y 1,5 m).
3. Se considerarán distintos los tramos con valores medios diferentes.
4. Dos tramos con los mismos valores medios, pero con diferentes amplitudes de variación de las deflexiones (o sea, diferentes s), serán asimismo distintos.
5. El coeficiente de variación de las deflexiones será normalmente inferior a 0,40.
6. La longitud de los tramos estará, en general, comprendida entre 200 y 1000 metros, diferenciando en el caso de autopistas y autovías ambas calzadas como independientes a efectos de tramificación de las deflexiones y cálculo de la rehabilitación estructural.
7. En cualquier caso la longitud mínima en un tramo será de 100 metros.

Analizado el deflectograma, las zonas que no hayan podido tramificarse según los criterios indicados, en especial los numerados 2, 5 y 7, se considerarán como singulares y, por tanto, en ellos será preceptivo disponer de información complementaria, según se indica en el apartado 5.5.

### **5.5 Estudios complementarios**

Realizada la tramificación según los criterios definidos en el apartado anterior, ésta deberá ser comprobada y verificada "in situ" por el ingeniero encargado del proyecto de rehabilitación.

Se estudiarán especialmente los casos en que exista discrepancia entre los valores de deflexión, el aspecto superficial del pavimento y la sección estructural del firme, para conocer las razones de tal discrepancia, efectuando eventualmente trabajos complementarios de reconocimiento (nuevas medidas de deflexión, calcatas y ensayos complementarios, etc.).

La tabla 1 de esta guía recoge y resume las diferentes opciones que se pueden presentar. En general, se considerará que hay suficiente concordancia cuando, siendo las deflexiones altas, el pavimento esté degradado y se estime que la sección estructural del firme es escasa para las sollicitaciones que soporta; así mismo, cuando las deflexiones sean bajas, el pavimento presente buen aspecto superficial y la estructura del firme parezca adecuada para las sollicitaciones que soporta. Estos dos supuestos corresponden a los números 1 y 8 de la tabla 1 y los casos en que no hay concordancia vienen dados por los números 2 a 7 de la misma tabla. En ésta se indica la conveniencia o no de emplear en el dimensionamiento de la rehabilitación estructural los valores de las deflexiones y algunas posibles causas de las discrepancias observadas.

Conviene tener en cuenta que la calificación de las deflexiones como altas o bajas es relativa y éstas deben relacionarse siempre con las características de la sección estructural del firme existente; como es evidente, no cabe esperar los mismos valores de deflexión en los firmes flexibles, que en los semiflexibles y semirrígidos.

**TABLA 1.- COMPATIBILIZACIÓN DE LAS MEDIDAS DE LA DEFLEXIÓN, LA INSPECCIÓN VISUAL Y EL TIPO DE SECCIÓN ESTRUCTURAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE REHABILITACIÓN**

CASO	ASPECTO SUPERFICIAL	ESTRUCTURA FIRME	DEFLEXIONES	DIMENSINAMIENTO POR DEFLEXIONES	OBSERVACIONES Y ALGUNAS CAUSAS POSIBLES DE DISCREPANCIA
1	M	M	M	SI	Se precisa una rehabilitación estructural
2	M	M	B	NO	Si las deflexiones son bajas por haberlas medido en época seca, repartirlas en época adecuada o emplear un coeficiente corrector más ajustado al real. La aparente discrepancia también puede deberse a que alguna capa del firme haya sido tratada con un conglomerante hidráulico, y no se haya tenido en cuenta esta circunstancia
3	M	B	M	DUDOSO	Si hay deterioros de una capa del firme o de la explanada, corregirlos antes de efectuar la rehabilitación generalizada. Si la vida del firme está agorada, puede dimensionarse el refuerzo por deflexiones
4	B	M	M	DUDOSO	Posible refuerzo o renovación superficial reciente, firme recién construido (en tales casos, puede dimensionarse el refuerzo por deflexiones)
5	M	B	B	NO	Defectos en la capa superficial (debe hacerse rehabilitación superficial)
6	B	M	B	NO	Si el buen aspecto del pavimento proviene de una reciente renovación superficial, se está en un caso análogo al 2.
7	B	B	M	NO	Posible medida de deflexiones con temperatura elevada del pavimento, o tramo con pocas medidas
8	B	B	B	SI	Puede no ser precisa una rehabilitación

LEYENDA			
SÍMBOLO	ASPECTO SUPERFICIAL	ESTRUCTURA FIRME	DEFLEXIONES
M	Malo	Escasa	Altas
B	Bueno	Adecuada	Bajas

Sin perjuicio de lo anterior, deberán estudiarse con detalle las zonas singulares, en particular las de los valores altos de deflexión, para proyectar y realizar en ellas los tratamientos necesarios independientes del refuerzo general, tales como mejora de drenaje, corrección de blandones, saneos específicos más profundos, reconstrucción del firme, etc.

### 5.6 Deflexión característica

Cada tramo homogéneo establecido se estudiará por separado y en él se determinará un valor de la deflexión que se considerará representativo del estado del firme. Lo normal será emplear un valor de deflexión característica  $d_k$ , que, suponiendo que los valores de la deflexión se reparten según una curva de Gauss, vendrá definido por la expresión:

$$d_k = m + 2s,$$

en donde:

$$m = \frac{\sum d_i}{n} \quad \text{y} \quad \sqrt{\frac{\sum (d_i - m)^2}{n - 1}}$$

siendo  $d_i$  la deflexión del punto  $i$ , y  $n$  el número de puntos medidos.

El coeficiente 2 que figura en la fórmula de  $d_k$  equivale a una probabilidad del 97,5 % de que la deflexión característica no sea sobrepasada a lo largo del tramo (el valor 2 es una aproximación del de 1,96 que se obtiene con una distribución normal).

Es importante, en todo caso, tratar independientemente las poblaciones de las deflexiones del carril derecho e izquierdo de la misma calzada, puesto que corresponden, en general, a familias claramente diferenciadas, y se cometería un error no admisible en el tratamiento de los datos y en el cálculo del espesor de refuerzo correspondiente. La diferenciación de los valores entre los diferentes carriles podría explicarse porque, aparte de que la estructura del firme es a veces distinta en ambos (sobre todo, si se ha ensanchado la carretera por un lado), las condiciones de drenaje y del suelo suelen ser diferentes en las carreteras a media ladera, y también en ocasiones las de drenaje en los desmontes, ya que el agua del subsuelo puede provenir preferentemente del lado derecho o izquierdo de la carretera, en función de las pendientes longitudinales y transversales de la calzada y de la explanada.

Si se miden por separado las deflexiones en la rueda derecha e izquierda del equipo de auscultación, como hacen los deflectógrafos, se podrá observar también que las medidas corresponden a poblaciones distintas, siendo generalmente más desfavorables la de la rodada derecha, situada más cerca del borde de la carretera, que la de la rodada interior, correspondiente al centro, que normalmente tiene menos humedad en la explanada.

Cuando la solución de rehabilitación estructural que se adopte consista en un refuerzo por igual en todo lo ancho de la calzada, a efectos de cálculo del espesor necesario deberán tomarse las deflexiones del carril y la rodada más desfavorables.

### 5.7 Correlaciones con la deflexión patrón

Si se emplean equipos de medida diferentes a la viga Benkelman, las deflexiones se determinarán por correlación con la deflexión patrón mediante estudios debidamente justificados. Para los equipos de auscultación más habituales, en España podrá prescindirse de ellos en los casos que a continuación se indican, al haberse realizado estudios específicos para cada uno de ellos en la Dirección General de Carreteras:

1. En auscultaciones efectuadas con deflectógrafos tipo **Lacroix de chasis largo** podrá considerarse que las deflexiones con viga Benkelman equivalen a las obtenidas con dicho tipo de deflectógrafo:  $VB = D$ ; siendo VB la deflexión obtenida con la viga Benkelman y D la del deflectógrafo Lacroix de chasis largo.
2. Para medidas realizadas con el equipo denominado **curviómetro MT-15**, se utilizará la siguiente correlación:  $VB = 1,4 C$ ; siendo VB la deflexión obtenida con la viga Benkelman y C, la del curviómetro. Esta correlación será apta tanto para los valores individuales de la deflexión, como para la media o característica del tramo, dado el carácter lineal de la ecuación de correlación.
3. Para deflectógrafos tipo **Lacroix de chasis corto**, como los que dispone todavía el Ministerio de Fomento (Dirección General de Carreteras y CEDEX), se utilizará la correlación:  $VB = 1,15 DL + 15$ ; que proporciona, con deflexiones pequeñas, valores más bajos y más adaptados a la realidad que la expresión  $VB = DL + 25$ , que se venía utilizando de acuerdo con la Norma 6.3-IC. En estas fórmulas DL representa la deflexión puntual, media o característica (dado el carácter lineal de la ecuación de correlación) obtenidas con los referidos deflectógrafos tipo Lacroix de chasis corto.

### 5.8 Corrección por humedad en la explanada

En principio, y siempre que sea posible, para las medidas de la deflexión del tramo objeto de estudio, se realizarán en la época de máxima humedad de la explanada, que se-

rá función de la climatología de la zona y del tipo de sección estructural del firme auscultado. En caso contrario, a las medidas habrá que aplicarles un coeficiente corrector  $C_h$ , determinado por estudios de variación de deflexiones con la humedad de la explanada en la zona de que se trate.

La aplicación del coeficiente  $C_h$  es bastante imprecisa y con un margen a la interpretación, basándose en la experiencia del ingeniero encargado del proyecto de rehabilitación. Por ello, en caso de duda, a veces se podrá recurrir a comparar los diferentes espesores de refuerzo que resultarían aplicando distintos coeficientes  $C_h$  con el estado de degradación que muestre una inspección detallada de la carretera. Con ello se podrá comprobar indirectamente el posible grado de acierto en la elección del coeficiente corrector. De todas formas, hay que prescindir de medidas hechas con la explanada helada y será preferible no utilizar tampoco medidas realizadas en época muy seca.

Cuando no se disponga de estudios adecuados de variación de deflexiones con la humedad, se podrán utilizar los coeficientes correctores obtenidos por el proceso siguiente: Se considerarán dos tipos de explanada según la clasificación de suelos hecha de acuerdo con el artículo 330 <sup>(1)</sup> del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3/97):

- A: Suelos seleccionados y adecuados.
- B: Suelos tolerables, marginales e inadecuados.

Se considerarán además dos tipos de condiciones de drenaje:

- 1. Buenas condiciones de drenaje.
- 2. Malas condiciones de drenaje.

A estos tipos de explanada y drenaje les corresponderán los coeficientes correctores  $C_h$  de la deflexión característica, según la época del año en la que se ha realizado la medida de acuerdo con lo indicado en el tabla 2 de esta guía.

**TABLA 2.- COEFICIENTES CORRECTORES DE LA DEFLEXIÓN POR HUMEDAD DE LA EXPLANADA**

TIPO DE EXPLANADA Y DRENAJE	COEFICIENTE $C_h$		
	PERÍODO HÚMEDO	PERÍODO INTERMEDIO	PERÍODO SECO
A 1	1	1,15	1,30
A 2, B 1	1	1,25	1,45
B 2	1	1,30 <sup>(1)</sup>	1,60 <sup>(1)</sup>

\* Valor orientativo para estudios especiales. Deben mejorarse necesariamente las condiciones de drenaje y, posteriormente, medir nuevamente las deflexiones.

Los períodos húmedo, intermedio y seco deberán determinarse en cada caso específico, teniendo en cuenta que las máximas deflexiones suelen producirse con cierto desfase respecto a la época de lluvias (nunca inferior a las dos semanas). En el caso de no disponer de datos suficientemente fiables para determinar si la medida de las deflexiones corresponden a un período húmedo, intermedio o seco, se adoptará el siguiente criterio:

Se tomará la precipitación de la estación meteorológica más apropiada al tramo en estudio dentro de cada zona de referencia, y en comparación con los valores de la tabla 3, se determinará si el período climático en el que se ha realizado la medida de la deflexión es húmedo, intermedio o seco.

<sup>(1)</sup> Pendiente de publicación: mientras tanto puede consultarse con el Servicio de Geotecnia de la Dirección General de Carreteras



FIGURA 2.- ZONAS CON NIVEL DE PRECIPITACIÓN ANUAL SEMEJANTE

Si las deflexiones se han medido en la segunda quincena de un determinado mes, se comparará la precipitación recogida en dicha estación meteorológica durante el mes anterior al de las medidas, con los valores que figuran en la tabla 3, para determinar si el período climático es húmedo, intermedio o seco, y aplicar, en su caso, el coeficiente corrector  $C_h$  indicado en la tabla 2.

Si la medida se ha hecho en la primera quincena de un mes, la comparación con los valores de la tabla 3, se hará sumando la precipitación de la primera quincena del mes anterior y la de la segunda quincena de dos meses antes, al mes en que se han medido las deflexiones.

**TABLA 3.- ZONAS CON NIVEL DE PRECIPITACIÓN ANUAL SEMEJANTE PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS PERÍODOS HÚMEDO, INTERMEDIO Y SECO**

ZONA	Precipitación en el mes de referencia (mm)		
	Período húmedo	Período intermedio	Período seco
1	> 125	90-125	< 90
2	> 100	70-100	< 70
3	> 80	50-80	< 50
4	> 65	45-65	< 45
5	> 45	30-45	< 30
6	> 30	20-30	< 20
7	> 20	10-20	< 10

\* Los datos de la tabla se han determinado por adaptación y simplificación de los datos disponibles durante un período de 30 años en las estaciones principales del Instituto Nacional de Meteorología.

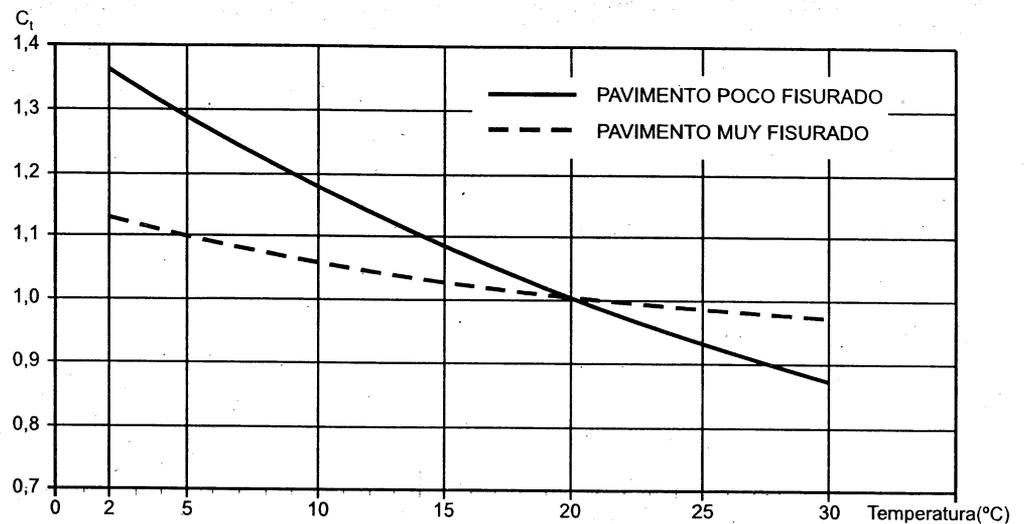
Así, por ejemplo, para deflexiones medidas entre el 6 y 8 de marzo se tomará como comparación con los valores de la tabla, la precipitación total ocurrida en la estación meteorológica de referencia entre el 16 de enero y el 15 de febrero del mismo año; para deflexiones medidas entre el 20 y el 22 de marzo, se tomará como precipitación total la del mes de febrero del mismo año. Con esta metodología, se tiene en cuenta el desfase habitual entre las máximas deflexiones y la época de lluvias, a que se ha hecho referencia anteriormente.

### 5.9 Corrección por temperatura del pavimento

La deflexión patrón se referirá, como se ha indicado, a una temperatura patrón del pavimento igual a 20°C. En firmes sin mezclas bituminosas no hay problemas, a efectos prácticos, porque la temperatura no influye en las deflexiones y, por tanto, valen las medidas hechas sin aplicar ninguna corrección. Lo mismo puede decirse cuando el espesor de las mezclas es pequeño (inferior a 10 cm).

Cuando el espesor es mayor (10 o más centímetros de mezclas bituminosas), hay que aplicar un coeficiente de corrección  $C_t$  por temperatura, en función de la obtenida en el pavimento, siguiendo el procedimiento indicado en la norma NLT-356. En la figura 3 se representan los coeficientes  $C_t$  de la norma NLT-356 que deben aplicarse en función de que el pavimento esté poco o muy fisurado. Cuando el pavimento está muy fisurado, la temperatura tiene menos influencia en la deflexión (figura 3). En el caso límite de un pavimento totalmente fisurado, el firme se comportaría como un material granular sin cohesión en el que no habría que aplicar coeficiente corrector por temperatura.

En ningún caso deberán hacerse las medidas con temperaturas del pavimento inferior a 2° C, para prevenir hacerlo con un firme helado, que invalidaría los resultados. En los firmes con cierto espesor de mezclas bituminosas (10 o más centímetros), tampoco deberán hacerse con más de 30° C, ya que no se podría obtener una deflexión fiable (ver apartado 5.3).



**FIGURA 3.- COEFICIENTE DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA DEL PAVIMENTO**

Como expresiones analíticas del coeficiente  $C_t$  pueden tomarse las siguientes (en función de la temperatura  $t$  del pavimento en grados Celsius).

- En firmes con pavimento poco fisurado (y espesor de mezclas bituminosas igual o mayor que 10 cm):

$$C_t = \frac{200}{3t+140}$$

- En firmes con pavimentos muy fisurados:

$$C_t = \frac{2t+160}{3t+140}$$

- En firmes flexibles con menos de 10 cm de mezclas bituminosas o totalmente fisurados:  $C_t = 1$

### 5.10 Deflexión de cálculo

Aplicando a la deflexión característica  $d_k$  de cada tramo los coeficientes de corrección por humedad de la explanada  $C_h$  y por temperatura  $C_t$ , se obtendrá la deflexión de cálculo, referida siempre a las deflexiones patrón medidas con la viga Benkelman:

$$d_{kc} = C_h \cdot C_t \cdot d_k$$

## 6 SELECCIÓN Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

Las etapas que se han venido considerando para el estudio de la rehabilitación estructural del firme se completarán, tras el diagnóstico sobre el estado del firme y sobre las causas de las degradaciones observadas, con el análisis de las distintas soluciones de rehabilitación posibles y con la selección y diseño de las más apropiadas en cada caso, de acuerdo con la presente Orden Circular 323/97 T sobre el proyecto de las actuaciones de rehabilitación estructural de firmes de pavimento bituminoso, de la que esta guía es uno de sus anejos.

Estas últimas fases del estudio no son evidentemente objeto de esta guía, referida exclusivamente a la medición y análisis de las deflexiones. No obstante, con lo indicado en ella se dispone de una ayuda eficaz para que, partiendo del estudio de los tramos homogéneos de comportamiento uniforme, se llegue, en cada caso a la solución más adecuada, de acuerdo con la presente Orden Circular.

## **ANEJO 2**

### **CRITERIOS A TENER EN CUENTA PARA EL ESTUDIO DE LAS ACTUACIONES PREVENTIVAS\***

(\*) Nota Técnica nº 2 de la IIª Convención COEX (mayo 1995) revisada por la Subdirección General de Conservación y Explotación para incluir como anejo a la Orden Circular 323/97 T

## CRITERIOS A TENER EN CUENTA PARA EL ESTUDIO DE LAS ACTUACIONES PREVENTIVAS

### 1 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE PREVENCIÓN Y REFUERZO DE FIRMES

Los firmes son estructuras que se agotan por fatiga, produciéndose su rotura cuando han sufrido la acción de un número elevado de repeticiones de cargas -transmitidas por las ruedas de los vehículos, fundamentalmente las de los vehículos pesados- que de forma individual no les producen prácticamente ningún daño.

El número de repeticiones de carga que es capaz de soportar el firme antes de romperse depende -entre otros factores- de su espesor. Por tanto, a mayor espesor más tiempo tarda en romperse, a igualdad de los demás factores.

Esto es así dado que los criterios de rotura que se consideran habitualmente para los firmes están relacionados con:

- la deformación unitaria en la fibra inferior de las capas de mezcla asfáltica
- la tensión de tracción en la fibra inferior de las capas tratadas con cemento
- la deformación vertical de las capas granulares y suelos

y estas tensiones y deformaciones son menores cuanto mayor es el espesor del firme. Por tanto, de acuerdo con las leyes que rigen la fatiga de los materiales, cuanto más bajo sea el nivel de la tensión aplicada en cada ciclo, mayor número de ciclos de aplicación resistirá el material antes de iniciar su agrietamiento (es decir, de llegar a la rotura).

La vida de un firme que ha soportado ya un cierto número de repeticiones de carga, pero que aún no han sido tantas como para que se inicie la rotura, es susceptible de ser alargada incrementando su espesor, ya que esta actuación implica una disminución de las tensiones y deformaciones que produce cada ciclo de carga. Sin embargo, un vez que una capa de aglomerado asfáltico o tratada con cemento, se ha empezado a agrietar ya no hay posibilidad de alargar su vida desde un punto de vista teórico debido a que la rotura estructural es irreversible y la capa agrietada es una estructura completamente diferente de la capa íntegra y notablemente menos capaz estructuralmente que ésta.

Sin embargo, la adición de un espesor suplementario a una capa que aún no ha iniciado su rotura alarga su vida de fatiga y, además, suma los efectos del nuevo espesor.

Este funcionamiento determina que la estrategia óptima (es decir la más económica) de conservación suele ser la de ir suplementando el espesor del firme con capas no muy gruesas un poco antes de que se inicie su rotura. De esta manera se consigue "exprimir" al máximo la capacidad estructural de los firmes construidos. Esta actuación es básicamente lo que se suele denominar **conservación preventiva**, la cual se justifica principalmente a partir de las consideraciones anteriores y de otras complementarias relativas a los beneficiosos efectos sobre las referidas tensiones y deformaciones que tiene la buena impermeabilidad del firme.

La alternativa a este tipo de conservación consiste en actuar no antes, sino después de iniciada la rotura. En este caso, la estructura que hay que conservar es una estructura ya rota cuya deformabilidad es mucho mayor que la de una capa estructuralmente íntegra, por lo que el espesor de la mezcla que hay que colocar sobre ella es bastante mayor que en el caso anterior, a igualdad de duración del firme reforzado. Esta forma de actuar es la denominada **conservación correctiva o curativa** y es, generalmente, menos económica que la anterior especialmente a largo plazo.

Las consideraciones anteriores se refieren al firme como si fuera una estructura ideal homogénea sin tener en cuenta que, en la práctica, los firmes no son homogéneos sino más

bien muy heterogéneos -comparándolos con otras estructuras- siendo su comportamiento bastante aleatorio. El conocimiento y consideración de esta circunstancia es esencial a la hora de analizar y establecer la conservación más adecuada.

En una estructura de firme determinada, existen numerosas características que varían en torno a un valor medio, entre otras las que gobiernan su comportamiento estructural, por ejemplo:

- Espesores de las capas.
- Grado de adherencia entre capas.
- Módulos (o características) de deformabilidad, dependientes a su vez de un conjunto de condiciones que pueden ser muy variables no sólo en el espacio sino también en el tiempo: humedad, temperatura, materiales, etc, etc.

Esto supone que dada una estructura-tipo teórica de firme extendida en un tramo de carretera, no fallará toda ella a la vez en el momento en el que haya soportado el número teórico de ejes equivalentes  $N$  que produce la rotura por fatiga en dicha estructura-tipo. Más bien, lo que sucederá en aquel tramo es que, bastante antes de que el número de ciclos alcance a  $N$ , se empezarán a producir roturas por fatiga en aquellas zonas elementales donde el conjunto de las dispersiones sea más desfavorable. Conforme vaya creciendo el número de cargas que han circulado por el tramo, más zonas alcanzarán el agotamiento.

Si se supone que el comportamiento estructural del conjunto de zonas elementales tiene una distribución normal o parecida a la normal, la velocidad de aparición de zonas agotadas será creciente hasta alcanzar el número de repeticiones de carga que agotan a la estructura de características medias, decreciendo a partir de este momento de manera que, siempre, quedará un cierto porcentaje del firme que no se agota, a pesar de que las repeticiones de cargas sean muy superiores al máximo teórico para la estructura-tipo.

Este comportamiento condiciona las actuaciones de rehabilitación, debido a que dentro de un tramo con la misma estructura teórica existirán en general zonas con un nivel de degradación muy diferente, que requerirán actuaciones de rehabilitación también bastante diferentes.

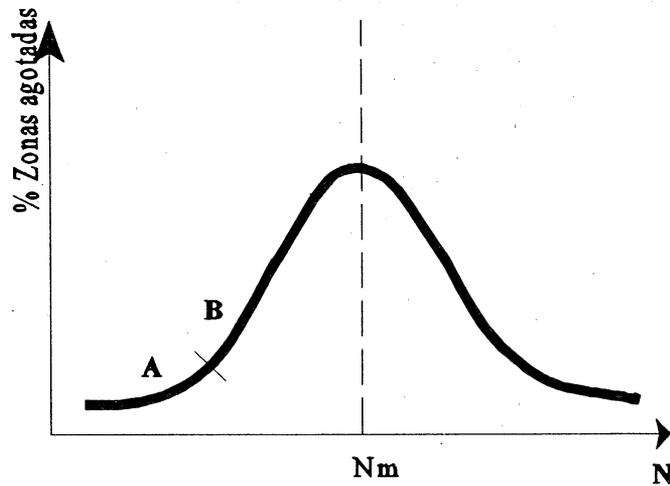
La forma de soslayar esta dificultad es tratar de diferenciar las situaciones y comportamientos locales de las situaciones y comportamientos más generales, especialmente cuando aquéllos son peores que éstos, y definir tratamientos diferentes para cada caso.

La consideración conjunta de los criterios, expuestos al principio, sobre las diferencias entre lo "preventivo" y lo "correctivo" y de lo dicho sobre el comportamiento aleatorio del firme, permite una primera aproximación al problema de la tramificación y de la elección de las condiciones características que sirvan de base para el diseño de las actuaciones.

Como ejemplo se podría suponer que la capacidad de respuesta estructural del firme de un determinado tramo homogéneo, en cuanto a las acciones y en cuanto a su estructura tipo, está representado por una curva del tipo indicado en la figura.

A partir del momento de la puesta en servicio del firme, el número de ciclos de carga  $N$  va creciendo llegando, con valores relativamente bajos, a producir el agotamiento de las zonas más desfavorables (A). Sin embargo estas zonas deben suponer un pequeño porcentaje del conjunto por lo que la velocidad de aparición de estas primeras zonas agotadas es lenta.

Conforme crece el número de ciclos se entra en la parte B de la curva, en la cual la velocidad de aparición de zonas agotadas se va acelerando y en la que se extiende el agotamiento del firme a una superficie mucho mayor. Una vez alcanzado  $N_m$  estaría aproximadamente la mitad del firme agotado, mientras que el resto se iría agotando con el tiempo a una velocidad decreciente.



Una estrategia "ciegamente" preventiva exigiría recrecer la estructura antes de que fallara ninguna zona elemental, lo que conllevaría el recrecer muy poco después de la primera implantación del firme y llevaría al absurdo de tener que estar continuamente recreciendo para evitar que se agotaran partes pequeñísimas del total de superficie afirmada.

Por el contrario, si se retrasaran mucho las actuaciones se arruinaría de forma irreversible buena parte del firme del tramo en cuestión y esto exigiría actuaciones correctivas importantes lo cual, como se ha dicho, es desfavorable económicamente.

Desde la perspectiva económica, parece lógico aceptar que se produzcan algunas zonas agotadas, tratar éstas localmente mediante las actuaciones correctivas oportunas y aplicar una estrategia preventiva al resto del tramo en el momento en el que la velocidad de aparición de zonas agotadas empieza a crecer con rapidez. El porcentaje máximo de zonas agotadas que se puede admitir, debe elegirse minimizando el coste a largo plazo, del conjunto de la actuación.

Desde este punto de vista, una estrategia de conservación del firme adecuada sería ir reparando mediante acciones correctivas localizadas las zonas que se van agotando desde la puesta en servicio del firme hasta el momento elegido para el refuerzo: normalmente, inmediatamente antes de que la velocidad de deterioro empiece a crecer rápidamente. Previamente a éste se habrían así eliminado las zonas agotadas -e incluso aquéllas con muy baja vida residual- evitando que condicionen el espesor del recrecimiento generalizado del firme.

El diseño de las actuaciones debe tener muy en cuenta la diferencia entre zonas agotadas y zonas con vida residual remanente (zonas no agotadas).

En las primeras el firme preexistente está roto y por tanto su deformabilidad es muy superior a la que se exige a las capas íntegras del firme. Si la actuación que se diseña consiste únicamente en colocar nuevos espesores de mezcla sobre él, habría que considerar esta situación en el cálculo a través, por ejemplo, de unos módulos de deformación muy bajos, lo que exigirá fuertes espesores de recrecido. Dado que el espesor del recrecimiento sobre estas zonas condiciona el espesor del recrecimiento sobre la totalidad de la calzada y arcenes, el coste del tratamiento de la zona agotada será innecesariamente alto.

Sin embargo, si se elimina mediante fresado el material roto y se sustituye por mezcla nueva en el espesor necesario para homogeneizar la capacidad soporte o vida residual de la zona reparada con la de las zonas no agotadas, se conseguirá un ahorro notable de material, especialmente en carreteras de doble calzada en las que normalmente el carril izquierdo está muy lejos de estar agotado aún cuando lo esté el derecho.

La actuación sobre las zonas no agotadas para alargar su vida consiste, como se ha dicho, en un incremento del espesor. El punto de partida a tener en cuenta para el dimensionamiento del espesor adicional necesario, es el conocimiento de la vida residual del firme existente. Es preciso definir unas condiciones características de este firme y en base a ellas dimensionar el refuerzo. Sin embargo, las condiciones características así definidas no incluyen las zonas agotadas, ya que éstas son objeto de un tratamiento local especial previo al refuerzo mencionado en el párrafo anterior.

Por consiguiente, las condiciones del firme existente tenidas en cuenta para dimensionar el recrecimiento generalizado, serán notablemente mejores -y por tanto los espesores de refuerzo menores- que las resultantes si se hubieran considerado indiscriminadamente zonas agotadas y zonas no agotadas. El estudio económico de alternativas suele poner, además, de manifiesto la conveniencia de extender los tratamientos locales previos al refuerzo no sólo a las zonas agotadas sino a aquéllas otras con vida residual muy baja.

## **2 METODOLOGÍA RECOMENDABLE**

La sistemática expuesta consiste en:

- 1º) Tratamiento local de las zonas agotadas que van apareciendo en los años anteriores al refuerzo. Este tratamiento se haría en campañas anuales o bienales, en las que cada año se sanearían las zonas agotadas que han aparecido desde la finalización de la campaña anterior.

El tratamiento consistirá por lo general en la eliminación mediante fresado de los materiales agrietados y en su sustitución por materiales nuevos. La profundidad del tratamiento vendrá determinada por el espesor de material nuevo necesario para que, cuando en el futuro se le sumara el espesor del refuerzo previsible (normalmente 5 cm), la sección así constituida tuviese la vida prevista para la actuación general de rehabilitación. En el punto 4.1 de las Recomendaciones se dan los criterios básicos para fijar el espesor de estos saneos.

- 2º) Tratamiento local, inmediatamente anterior al recrecimiento generalizado, de las zonas con vida residual muy baja, menor de la que se ha considerado como característica para el dimensionamiento del recrecimiento (y de las zonas agotadas que puedan quedar desde la última campaña de saneos). Este tratamiento es idéntico al de zonas agotadas y los criterios de dimensionamiento del espesor son los mismos.

La determinación de la vida residual por debajo de la cual conviene fresar un cierto espesor del firme existente, se deduce del estudio económico, minimizando el coste a largo plazo del conjunto de actuaciones contempladas en la presente metodología.

- 3º) Recrecimiento generalizado con un espesor de mezcla calculado a partir de las condiciones características de las zonas no agotadas. Estas condiciones se pueden expresar a través de un parámetro globalizador del comportamiento como es la deflexión y están directamente relacionadas con la vida residual de cada zona.

La sección del firme reforzado será la suma de un espesor de firme nuevo, con su capacidad de resistir a la fatiga intacta, más un espesor de firme antiguo que ya ha gastado una parte de su capacidad de resistir a fatiga. (La vida residual de la sección conjunta se puede obtener a partir de la ley de Miner).

## **3 CONSIDERACIONES SOBRE LA DEFLEXIÓN**

La evaluación del estado y comportamiento del firme existente es, sin duda, lo más delicado de un proyecto de refuerzo.

A la hora de proyectar un refuerzo hay que distinguir, en primer lugar, las zonas agotadas y las zonas muy próximas a agotarse, ya que las mismas, como se ha indicado anteriormente, deben ser objeto de tratamientos locales previos.

Esta labor puede hacerse mediante la inspección visual solo en los casos de zonas agotadas con grietas de fatiga aparentes en la superficie. Sin embargo, dado que las grietas de fatiga se inician normalmente en la parte inferior de las secciones, la observación superficial puede no detectar zonas donde ya se ha iniciado la fatiga. Tampoco se pueden detectar así las zonas con baja vida residual.

La deflexión es el principal instrumento disponible para conocer la heterogeneidad del firme y la vida residual de las distintas secciones.

Dentro de un tramo con una misma sección-tipo teórica, y sometido a las mismas acciones, se miden diferentes valores de la deflexión, que reflejan dicho comportamiento heterogéneo.

Las diferentes deflexiones (supuesto que el tráfico ha sido el mismo en todas las secciones) son un reflejo de las diferencias entre las secciones: espesores, materiales y especialmente características del cimientado. Las menores deflexiones corresponden a las secciones más resistentes y con mayor vida residual ya que, en general, una deflexión menor implica tensiones y deformaciones unitarias menores y por tanto mayor número de ciclos antes de rotura. Las deflexiones altas pueden corresponder a zonas con poca vida residual o incluso a secciones agotadas.

Para cada nivel de tráfico soportado hay un valor de la deflexión para el cual se produce el agotamiento de la sección (deflexión crítica:  $D_c$ ). Expresado de otra manera, para cada deflexión (en tanto que es un parámetro global que representa las características de la sección), existe un número de repeticiones de carga que produce la rotura.

Comparando el deflectograma con la inspección visual se puede conocer el valor de la deflexión que corresponde a las zonas agotadas con fisuración aparente en la superficie. No se conoce, sin embargo, el valor de la deflexión correspondiente a secciones cuya fatiga esté iniciada pero en las cuales la fisuración aún no haya ascendido a la superficie del firme, ni tampoco el valor de la deflexión para el cual se inicia la fisuración ( $D_c$ ). Estos valores se pueden estimar mediante la observación de catas y testigos realizados en las zonas de mayores deflexiones pero sin fisuración observable en superficie.

El análisis del deflectograma bajo esta perspectiva permite separar por una parte las zonas agotadas o próximas a agotarse, en las cuales se llevarán a cabo los tratamientos correctivos locales adecuados y, por otra, las zonas con una vida aún apreciable en las que el tratamiento será exclusivamente el recrecido, pudiendo subdividir éstas en zonas con diferentes características y por tanto con necesidad de diferentes espesores de refuerzo.

Esta metodología permite eliminar del deflectograma las deflexiones mayores antes del cálculo de la deflexión característica de los tramos, con el consiguiente ahorro de espesores.

En los firmes semirrígidos el mecanismo de rotura es diferente del que se presenta en los semiflexibles (y en los flexibles) ya que el agotamiento de las secciones se produce en dos escalones diferenciados, y mientras no se produce el primero de ellos (agotamiento de las capas tratadas con cemento) los valores de la deflexión son muy bajos y poco indicativos de la vida residual.

Por consiguiente, en estos firmes, la estimación de la vida residual antes de la rotura de la grava-cemento no se puede hacer mediante el análisis de la deflexión, debiendo realizarse a partir del seguimiento de la aparición de zonas rotas conforme se van incrementando los ejes soportados, y a partir del conocimiento de las leyes de fatiga de los materiales, considerando en todo caso que en las capas tratadas con cemento pequeñas variaciones de las condiciones (espesor, módulos, etc) pueden tener una influencia muy grande en la vida residual y, debido a esta circunstancia, las dispersiones del comportamiento pueden ser muy fuertes, especialmente si el dimensionamiento ha sido estricto.

