

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO**



**EMPLEO EN MEZCLAS  
ASFÁLTICAS DE CAUCHO  
RECUPERADO DE NEUMÁTICOS  
FUERA DE USO**

PROYECTO FIN DE CARRERA  
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL  
Especialidad Química Industrial

ALUMNO:  
Rafael Carlos Llago Serrano

DIRECCIÓN:  
Antonio D. Rodríguez López

Valencia, 28 Septiembre 2015

## INDICE

<b>1- OBJETO.....</b>	<b>1</b>
<b>2.- INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1.- DATOS ESTADÍSTICOS.....</b>	<b>2</b>
<b>2.2.-LEGISLACIÓN NACIONAL .....</b>	<b>4</b>
<b>El Plan Nacional De Neumáticos Fuera De Uso.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3.- APLICACIÓN DEL PLAN.....</b>	<b>8</b>
<b>2.4.-ORGANIZACIÓN DE LA GESTIÓN Y FINANCIACIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>3.- PROCESO FABRICACIÓN.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1.- PANORÁMICA GENERAL SOBRE LA UTILIZACIÓN DE         NFUs EN CARRETERAS.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2.- EL NEUMÁTICO.....</b>	<b>14</b>
<b>3.3.- PRODUCTOS BITUMINOSOS.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.1. Betunes asfálticos.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.2.- Tipología y nomenclatura.....</b>	<b>45</b>
<b>3.3.3.- Ensayos aplicables a ligantes.....</b>	<b>45</b>
<b>3.3.4.-Ensayos relativos al manejo.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.5.- Especificaciones del PG-4.....</b>	<b>51</b>
<b>4.- MATERIAS PRIMAS.....</b>	<b>54</b>
<b>4.1.- APLICACIONES EN MATERIALES BITUMINOSOS.....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.- APLICACIONES POR VÍA HÚMEDA.....</b>	<b>55</b>
<b>4.3.- CARACTERÍSTICAS DE LOS BETUNES MODIFICADOS CON         CNR.....</b>	<b>57</b>
<b>4.4.- FACTORES A CONSIDERAR EN LA DOSIFICACIÓN BETÚN-         CAUCHO.....</b>	<b>58</b>
<b>4.5.- BETUNES-CAUCHO EN ESPAÑA.....</b>	<b>59</b>
<b>4.6.- FABRICACIÓN DEL BETÚN-CAUCHO.....</b>	<b>60</b>
<b>4.7.- APLICACIONES.....</b>	<b>61</b>
<b>4.8.- CRITERIOS DE DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS Y         CARACTERÍSTICAS.....</b>	<b>62</b>
<b>4.9.- FABRICACIÓN, PUESTA EN OBRA Y COMPACTACIÓN</b>	<b>63</b>
<b>4.10.- TRAMOS CONSTRUIDOS EN ESPAÑA.....</b>	<b>63</b>
<b>4.11.- PROCEDIMIENTO POR VÍA SECA.....</b>	<b>63</b>
<b>4.12.- EXPERIENCIA EN ESPAÑA.....</b>	<b>65</b>
<b>5.- CONCLUSIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>6.- AFIRMADOS.....</b>	<b>70</b>
<b>6.1.- FIRMES.....</b>	<b>70</b>
<b>6.2.- FUNCIONES DEL FIRME.....</b>	<b>70</b>

<b>6.3.- CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES.....</b>	<b>71</b>
<b>6.3.1.- Características superficiales.....</b>	<b>71</b>
<b>6.3.2.- Características estructurales.....</b>	<b>72</b>
<b>6.4.- TIPOS DE FIRMES.....</b>	<b>73</b>
<b>6.4.1.- Firmes flexibles.....</b>	<b>73</b>
<b>6.4.2.- Firmes rígidos.....</b>	<b>74</b>
<b>6.4.3.- Firmes mixtos.....</b>	<b>76</b>
<b>7.- DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>77</b>
<b>FASE 1: ESTUDIO CON CAUCHO AMERICANO (TEM 0.8)..</b>	<b>83</b>
<b>FASE 2: ESTUDIO COMPARATIVO CON CAUCHO AMERICANO TEM 0.8 Y CAUCHO NECALFLEX.....</b>	<b>87</b>
<b>FASE 3: ESTUDIO COMPARATIVO CON MEZCLAS DE BETÚN 60/70 Y 150/200 EN DIFERENTES PROPORCIONES MÁS LA ADICIÓN DE LOS DOS TIPOS DE CAUCHO EN PROPORCIONES DEL 10% Y DEL 14%.....</b>	<b>89</b>
<b>8.- PRESUPUESTO ECONÓMICO.....</b>	<b>94</b>
<b>9.- CONCLUSIONES.....</b>	<b>95</b>
<b>10.- BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>97</b>

## **1.- OBJETO**

El objetivo del presente proyecto consiste en establecer distintas fórmulas de trabajo de mezclas bituminosas a través de la adición de caucho procedentes de la molienda de neumáticos fuera de uso (NFU) a las mismas, así como el análisis de sus características físicas, durabilidad... con el fin de dar una solución al caucho de neumáticos, que en la actualidad representa una problemática debido a ser un residuo con tratamiento especial.

Mediante la adición de caucho en polvo recuperado de los neumáticos fuera de uso, se pretende lograr:

1. Obtención de mezclas asfálticas, principalmente para capas de rodadura de pequeño espesor, con características mejoradas en los aspectos de disgregación, rugosidad superficial y absorción del ruido de rodadura, aspecto este último que cobra especial importancia cuando se trata de pavimentos de ciudades y poblaciones.

2. Reciclado del caucho y las fibras procedentes del machaqueo de los neumáticos fuera de uso, que en la actualidad representa un residuo que genera grandes problemas medioambientales.

3. Obtener betunes modificados con caucho provenientes del machaqueo de neumáticos.

## **2.- INTRODUCCIÓN**

El neumático es un producto de consumo que cuando llega al final de su vida útil, se transforma en un residuo y como tal, exige una gestión adecuada del mismo.

Esta gestión que de acuerdo con las indicaciones de la Política Integrada del Producto (IPP) europea, del VI Programa de Acción de la comunidad Europea en materia de Medio Ambiente, así como del artículo 1 ( Objeto) de la ley 10/1998 de Residuos, debe tener como objetivos fundamentales prevenir la producción de residuos y fomentar, por este orden, su reducción, su reutilización, reciclado y otras formas de valorización, dejando para el último lugar su depósito en vertederos u otras formas de eliminación que no contemplen ningún tipo de recuperación.

Cabe destacar que las características propias de los NFUs condicionan las actividades para su gestión, puesto que:

- Si no se actúa sobre ellos, son prácticamente indestructibles.
- Son inflamables.
- Las dificultades para su eliminación mediante su depósito en vertedero son debidas a que:
  - No son compactables debido a su flexibilidad.
  - No permiten recuperar los productos de los que están formados.
  - Son un refugio ideal para “vectores biológicos”.
  - Pueden acumular lixiviados y gases.

A pesar de las consecuencias que, por todo lo expuesto, pueden tener sobre el medio ambiente, no se ha emitido una Directiva por parte de las instituciones europeas que regule con criterios uniformes la gestión de este residuo en la Unión.

Por todo ello no es de extrañar que sea uno de los residuos que se han seleccionado para confeccionar un Plan Nacional que permita mejorar su gestión, Plan que adquiere especial importancia por no disponer de tal Directiva, tan diferente de la situación reguladora de la gestión de otros residuos.

### **2.1.- DATOS ESTADÍSTICOS**

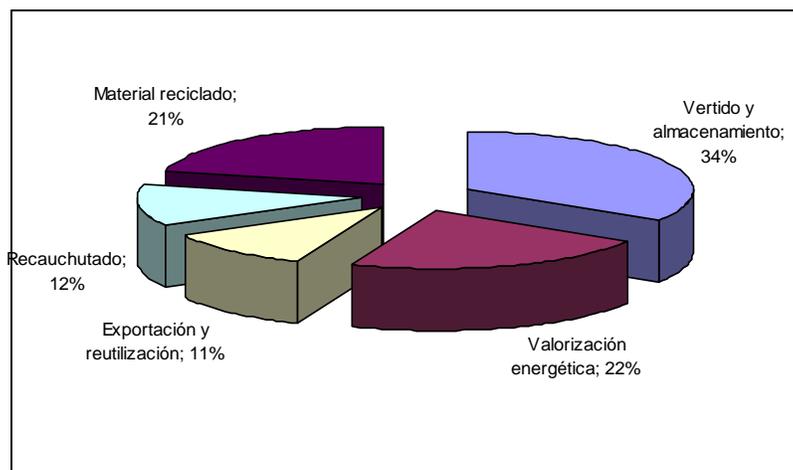
La evolución de la gestión de los NFUs, según los datos facilitados por AER ( relativos al recauchutado), CEDEX (los del reciclado), NEUCICLAJE y OFICEMEN (los de valorización energética) y FENACOR (los de eliminación), se puede apreciar en la siguiente tabla:

<i>Destino</i>				
Generación	239.000 Tm	265.000 Tm	280.000 Tm	300.958 Tm
Porcentaje	%	%	%	%
<b>Reutilización</b>	-	0	0	0
<b>Recauchutado</b>	11,1	13,0	13,5	14
<b>Material reciclado</b>	1,5	1,0	1,5	8
<b>Valorización Energetica</b>	4,6	8,0	7,0	10
<b>Exportación</b>	-	3,0	3,0	4
<b>Vertido</b>	<b>82,8</b>	<b>75,0</b>	<b>75,0</b>	<b>64</b>

Observando los datos, se aprecia una ligera disminución de la eliminación a través del depósito en vertedero. Estos datos, difieren con los de otros países de la Unión Europea.

El elevado porcentaje de vertido en nuestro país conlleva una especial dificultad para la gestión de este residuo, en gran parte debido a la conformidad con el Real Decreto 1481 / 2001, de 27 de diciembre, mediante el que se transpone a nuestra legislación nacional la Directiva 1999/CE, del Consejo, de 26 de abril, sobre vertidos de residuos, que no está permitiendo el vertido de los NFUs enteros desde el 16 de julio de 2003, prohibiéndose también el de los NFUs troceados a partir del 16 de julio del año 2006.

Con todo esto, las previsiones de la generación y gestión en los países de la Unión Europea, que efectúa ETRA son:



Por lo tanto, las cantidades recicladas y las valorizadas en los países de Europa son más elevadas que en nuestro país, lo que determina las diferencias patentes en las cantidades vertidas. Así pues, con el objetivo de fomentar y mejorar la gestión de los NFUs la Administración Española, tanto la Central como la Autónoma, ha emitido instrumentos legislativos que vemos a continuación.

## 2.2.- LEGISLACIÓN NACIONAL

La herramienta principal legal de ámbito nacional en nuestro país, es la Ley 10/1998 de 21 de abril, de Residuos; esta Ley regula lo relativo a la producción y gestión de los residuos, salvo los radiactivos, las emisiones a la atmósfera, y los vertidos de efluentes líquidos a las aguas continentales y al mar, tanto desde tierra como de buques y aeronaves, que están regidas por sus propias legislaciones.

Al mismo tiempo, las Comunidades Autónomas y las Administraciones Locales vienen fomentando su propia legislación manteniendo como es natural, la coherencia con la legislación nacional, en concreto con la Ley 10/1998 antes mencionada.

Centrándonos sobre los NFUs, hasta la actualidad se han emitido disposiciones legislativas por los Gobiernos del País Vasco, Región Valenciana, Castilla – León y el de la Isla de Mallorca.

En segundo lugar, se tiene el documento legislativo que afecta a los NFUs, el Real Decreto 1383/2002, de 20 de diciembre, sobre gestión de Vehículos al Final de su Vida Útil, que contiene requisitos reguladores que son aplicables a la gestión de los NFUs que procedan del desmontaje de los mencionados vehículos.

El tercer instrumento legal es el ya citado Real Decreto 1481/2001, por el que se regula la eliminación de residuos mediante el depósito en vertedero, que contiene las prohibiciones del vertido de los NFUs comentadas. Se debe decir que de estas prohibiciones se excluyen los NFUs cuyos diámetros son mayores de 1.400mm y los de bicicleta.

Por último, la mencionada Ley 10/1998, de Residuos establece en su artículo 5 que la Administración General del Estado, a través de la integración de los respectivos planes autonómicos de residuos, confeccionará distintos planes nacionales de residuos, en los que se fijarán los objetivos específicos de reducción, reutilización, reciclado, otras formas de valorización y eliminación; las medidas a adoptar para la consecución de dichos objetivos, los medios de financiación y el procedimiento de revisión.

Como se ha comentado, entre estos planes, se ha emitido el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso, cuyos contenidos se detallan seguidamente.

## **El Plan Nacional De Neumáticos Fuera De Uso (PNNFUS)**

El Consejo de Ministros aprobó el citado Plan en su reunión del 5 de octubre de 2001, (BOE, núm 260 de 30 de octubre).

Los principales puntos del plan se detallan a continuación:

### **Principios de Gestión.**

En primer lugar establece que debe respetarse el denominado *Principio de Jerarquía*, según el cual se debe prevenir la generación del residuo en la medida de lo posible, reutilizar lo que se pueda, reciclar lo que no se pueda reutilizar y por último valorizar energéticamente lo que no se pueda reutilizar o reciclar.

Se excluye de forma expresa el vertido por lo requerido en la Directiva 1999/31/CE ya citada.

En segundo lugar se establecen medidas concretas para promover a las autoridades, agentes económicos y consumidores a que los NFUs sean tratados correctamente desde el respeto medioambiental, lo que precisa la colaboración de los tres estamentos mencionados.

Se determinan, finalmente los objetivos ecológicos específicos a lograr mediante la aplicación del Plan junto con las medidas necesarias para lograr cada uno de ellos.

### **Objetivos ecológicos.**

El plan se establece con los siguientes objetivos:

Recuperación y valorización del 100% de los NFUs enteros generados antes de 2003. Valorización del 100% de los NFUs troceados que se generen antes de 2007, incluidos los NFUs ya almacenados en los vertederos o depósitos existentes.

Prohibición de la eliminación a través del vertido o incineración sin recuperación energética de los NFUs enteros a partir del 1 de enero de 2003; y prohibición de dicha eliminación de los NFUs troceados antes del 1 de enero de 2006.

Reducción en un 5% en peso de los NFUs generados mediante la prolongación de la vida útil de los neumáticos, la mejora del uso del neumático y de la conducción de los vehículos.

Recauchutado de, por lo menos de un 20% en peso de los NFUs generados antes del 1 de enero de 2007.

Valorización distinta del recauchutado del 65% en peso de los NFUs procedentes de los vehículos de turismo generados antes del 1 de enero de 2005.

Reciclado del 25% en peso de los NFUs que vienen de los vehículos de turismo fabricados antes del 1 de enero de 2007, teniendo presente las posibles mejoras que se puedan introducir.

Valorización de, al menos, el 95% de los NFUs procedentes de camiones, antes del 1 de enero de 2003. Antes del 1 de enero de 2007, reciclado de, al menos, el 25% en peso de los NFUs procedentes de camiones; al igual que en el caso anterior, se introducirán aquellas novedades de reciclado que se vayan conociendo.

Creación de un sistema estadístico de generación de datos sobre NFUs y su gestión, para su inclusión en el futuro Inventario Nacional de Residuos.

### **Instrumentos.**

Con la finalidad de alcanzar lo anteriormente expuesto el Plan establece las siguientes medidas instrumentales:

En primer lugar, en el texto del Plan se indicaba que las Comunidades Autónomas debían designar los vertederos autorizados en sus respectivos territorios para recibir correctamente los NFUs. Actualmente la Administración General y las Comunidades Autónomas, conjuntamente, deben determinar los vertederos (del orden de unos treinta) ubicados estratégicamente en todo el país, destinados a la recepción de los NFUs troceados. Cabe destacar que la localización geográfica debe ser tal manera que permita optimizar la posterior valorización de los NFUs.

En segundo lugar, el Plan precisa del diseño y puesta en práctica de un esquema económico de cofinanciación de las actividades de gestión de los NFUs basado en los principios de responsabilidad del productor y de responsabilidad compartida.

En tercer lugar se determina la firma de un Acuerdo Marco de gestión de los NFUs con los agentes económicos involucrados.

En cuarto puesto se prescribe establecer un sistema de ayudas a Programas de I+D+I cuya finalidad sea la búsqueda de nuevas posibilidades de reutilización o reciclado de los NFUs, así como el alargamiento de la vida útil de los neumáticos.

En el quinto lugar se determina la elaboración de normas de calidad para los diferentes materiales reutilizables o reciclables obtenidos de los NFUs.

Acto seguido se establece que en las obras públicas en las que su utilización sea técnica y económicamente viable, tendrán prioridad los materiales procedentes del reciclaje de los NFUs. Para tales casos se prescribe que se incluya este requisito en los correspondientes pliegos de condiciones técnicas de las obras.

En último lugar, el plan requiere establecer sistemas de apoyo y ayudas a programas de divulgación y concienciación ciudadana para la mejora de la reutilización y el reciclaje

de los NFUs, así como ayudas a la formación de personal especializado y a la elaboración de un sistema de información y bases de datos sobre la generación y gestión de los NFUs.

### **Mecanismos de financiación de las inversiones.**

El desglose del presupuesto es el siguiente:

Prevención, en la que se incluye el fomento del recauchutado.

Plantas de trituración y plantas para producir gránulos y polvo de goma que permitan su utilización en la fabricación de materiales reciclados.

Instalaciones de valorización energética (adaptación de hornos de fabricación de cemento y similares).

- Programas de I+D+I.
- Sensibilización pública, concienciación ciudadana y formación de personal especializado.
- Creación y mejoras de sistemas de información y bases de datos.

Los mecanismos de financiación se especifican en el Plan diferenciando entre inversiones de iniciativa pública, de iniciativa privada, inversiones de investigación, desarrollo e innovación y actuaciones de concienciación ciudadana, control estadístico y formación de personal especializado, tal y como vemos seguidamente:

Las inversiones de iniciativa pública en prevención e infraestructuras se financiarán con cargo a la contribución de los agentes, organizaciones o personas legalmente responsables del coste de la correcta gestión ambiental de los residuos, a las aportaciones presupuestarias de las Administraciones Públicas competentes y a los Fondos Comunitarios (Fondos de Cohesión y Fondos FEDER). En el Plan se incluyen los criterios para la utilización de los Fondos mencionados.

Las inversiones de iniciativa privada en prevención e infraestructuras se llevarán a cabo con cargo a las contribuciones de los agentes, organizaciones o personas legalmente responsables del coste de la correcta gestión ambiental de los residuos y, en su caso, con el apoyo de las aportaciones presupuestarias de las Administraciones Públicas competentes y de otras ayudas del Estado que tienen como objetivo fomentar la actividad empresarial en determinadas zonas para corregir desequilibrios en la situación económica en el territorio nacional.

La financiación de los programas de investigación, desarrollo e innovación llevará a cabo, del mismo modo que se determina en los apartados anteriores, es decir, por los agentes económicos, organizaciones o personas responsables de la correcta gestión

medioambiental de los NFUs, y a las aportaciones de las Administraciones Públicas, con el apoyo de las Comunidades Autónomas, y la Administración General del Estado.

Las actividades de concienciación ciudadana, formación del personal especializado y control estadístico serán asimismo compartidas por los agentes económicos, organizaciones y Administraciones anteriormente citadas.

### **Control y Revisión del Plan.**

El control del cumplimiento de los objetivos del Plan se efectúan por el Ministerio de Medio Ambiente en colaboración con las Comunidades Autónomas.

Cabe destacar que en el Plan se establece que debe ser revisado a los dos años de su entrada en vigor. La finalidad de tal revisión es la incorporación de la nueva normativa que se vaya aprobando, así como reconsiderar y actualizar los objetivos establecidos según la experiencia que se vaya obteniendo.

## **2.3.- APLICACIÓN DEL PLAN.**

Para la posible aplicación del Plan, se ha establecido un Grupo de Trabajo específico que realiza los análisis y estudios necesarios y emite informes como documentación de apoyo para proponer las recomendaciones específicas pertinentes a las autoridades medioambientales tanto de la Administración General como de las CC.AA.

Este Grupo de trabajo está formado por representantes de los sectores industriales afectados, empresas de ingeniería medioambiental, instituciones de investigación, la Federación de Municipios y Provincias, las CC.AA.y el Ministerio de Medio Ambiente.

El Grupo se ha organizado en los siguientes siete Subgrupos específicos:

- Actualización de las estadísticas.
- Prevención y reutilización.
- Reciclado.
- Recuperación energética.
- Vertido.
- Gestión y financiación.
- Concienciación ciudadana y formación de personal especializado.

### **Situación actual de los trabajos**

El Subgrupo de actualización de las estadísticas, cuyo Coordinador es un representante de los fabricantes, está en contacto con el sector industrial para la continua información sobre el proceso de fabricación y gestión de los neumáticos nuevos y de los

NFUs, a fin de obtener siempre nuevos datos para revisar el Plan e incluirlos en el sistema de información de residuos que se ha mencionado con anterioridad.

Adicionalmente por parte de la industria del recauchutado se está aportando valiosa información al Subgrupo de prevención y reutilización, cuyo Coordinador es un representante de este sector. Los resultados obtenidos hasta la fecha indican que en nuestro país, los neumáticos recauchutados se utilizan principalmente en camiones y vehículos industriales. Es por esto, que el Subgrupo trata de proponer medidas para fomentar el uso del recauchutado en vehículos de turismo puesto que no está muy extendido hasta el momento actual.

Por su parte, el Subgrupo de reciclado viene desempeñando sus actividades fundamentales en los usos de los materiales procedentes del reciclado de los NFUs distintos del recauchutado, así como la descripción de la situación actual en España y en la identificación de las acciones que se consideran imprescindibles para el fomento de su desarrollo.

El Coordinador de este Subgrupo es un ingeniero del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX, Organismo de Investigación del Ministerio de Fomento. Los miembros de este subgrupo son representantes de otros laboratorios de investigación, responsables de las principales compañías de la industria del reciclado, fabricantes y empresas de ingeniería medioambiental.

Una de las principales actividades en curso de este Subgrupo es la preparación de un dossier en el que se describen los diferentes usos de los materiales procedentes del reciclado y su clasificación de acuerdo con su grado de utilización en España.

Entre los usos que ya se están aplicando con éxito destacan las instalaciones deportivas y pavimentos de seguridad; revestimientos de suelos, objetos de goma como pueden ser los productos para la industria del automóvil, industria del calzado, etc.

Entre las aplicaciones que ya se han iniciado, pero que todavía requieren de un mayor desarrollo, se encuentran las aplicaciones en materiales para mezclas bituminosas en pavimentos de carreteras(objeto de este proyecto), láminas de protección e impermeabilización...

Se debe destacar por lo tanto, que el empleo en los citados materiales para mezclas bituminosas es una de las metas de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, debido a que es una aplicación genuina de reciclado de este residuo, actividad que como se ha expuesto es de una gran importancia ecológica. Por ello actualmente es cada día mayor la que ya venía siendo una estrecha colaboración con el Ministerio de Fomento para que esta utilización, que es del interés de ambos Organismos, llegue a ser una realidad habitual en el menor tiempo posible.

Y los usos que aún no se encuentran totalmente desarrollados son las aplicaciones para taludes de carreteras, elementos para drenajes, piezas para aislamientos acústicos, etc.

Por otra parte, las actividades del Subgrupo de recuperación energética, cuyo Coordinador es un representante de este sector industrial, se llevan a cabo con la participación de representantes de la industria de fabricación del cemento, que son los principales usuarios en nuestro país, y representantes de algunas instalaciones de generación de energía eléctrica; su labor principal es efectuar recomendaciones sobre las mejoras técnicas disponibles en este material.

El Subgrupo de vertido, cuyo Coordinador es un representante de los talleres de una importante federación de los talleres de reposición de neumáticos, centra su trabajo en un documento en el que se establecen medidas concretas para el cumplimiento de los requisitos que se prescriben en el R.D. 1481/2001, ya mencionado anteriormente, en lo que concierne al vertido de los NFUs.

En concreto, este subgrupo efectúa el análisis y el estudio de las características de diseño de áreas especiales, o de celdas de vertederos para la deposición de los NFUs troceados.

Los aspectos que se están estudiando son los requisitos sobre protección de incendios, protección física, requisitos de accesibilidad, etc.

El trabajo que se está realizando por parte del Subgrupo de gestión y financiación del residuo, cuyo Coordinador es un representante de los fabricantes de neumáticos, es de especial importancia. Se está trabajando con gran intensidad en establecer un modelo de gestión y financiación de los NFUs, de acuerdo con la Ley 10/1998, de Residuos.

El Subgrupo de concienciación ciudadana y formación del personal especializado, coordinado por el representante de los talleres de reposición de neumáticos comentado, centra sus trabajos en el estudio y evaluación de las diferentes posibilidades para realizar campañas de anuncios y de difusión de la información, con el objetivo de reducir en la medida de lo posible la generación de NFUs, mediante la mejora de la conducción y el control de la presión del aire en los neumáticos en servicio. Se contempla también la realización de cursos de formación para los trabajadores de las industrias involucradas como pueden ser talleres de cambio de neumáticos, instalaciones de reciclado, empleados de vertederos, etc.

Para terminar se destaca que esta colaboración en el Grupo de Trabajo entre representantes de la Administración y de los sectores industriales que emplean su actividad profesional a esta materia, permite realizar las actividades con informaciones y datos técnicos de primera mano que son aportados por especialistas que disponen del conocimiento detallado de cada aspecto que es considerado y de la trascendencia de cada uno de ellos.

## **2.4.- ORGANIZACIÓN DE LA GESTIÓN Y FINANCIACIÓN**

La ley 10/1998, de Residuos establece en su Título II, “De las obligaciones nacidas de la puesta en el mercado de productos generadores de residuos” y, en concreto en su artículo 7.1.b), entre otras determinaciones, que “el productor, importador o adquiriente intracomunitario, agente intermediario o cualquier otra persona responsable de la puesta en el mercado de productos que con su uso se conviertan en residuos, podrá ser obligado”, entre otras, “a hacerse cargo directamente de la gestión de los residuos derivados de sus productos o a participar en un sistema organizado de gestión de dichos residuos”.

Y en su artículo 8, referente a los “Acuerdos voluntarios y convenios de colaboración” determina que para el cumplimiento de tales obligaciones los responsables nombrados “podrán organizar sistemas propios de gestión mediante la celebración de acuerdos voluntarios aprobados o autorizados por las Administraciones públicas competentes..”

Por todo ello, y con la finalidad de que se pueda disponer de un instrumento legislativo en el que se pueda apoyar más específicamente la organización de los comentados sistemas de gestión, el Grupo de Trabajo para la aplicación del Plan está redactando un borrador en el se describe un diseño de carácter general al que puedan responder los modelos concretos de los distintos sistemas de gestión y de la financiación de los mismos, para elevarlo a la consideración de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental comentada.

El contenido del borrador comprende los siguientes criterios genéricos:

- El principio de responsabilidad del Productor.
- El criterio de responsabilidad compartida de todos los agentes que intervienen en la producción y gestión de los NFUs.
- Transparencia y seguimiento factible de la financiación de los sistemas de gestión.

Las consecuencias de tales criterios son las obligaciones, funciones y derechos de cada uno de los actores que participan en el sistema. Por todo ello, los fabricantes, importadores y adquirientes intracomunitarios de neumáticos nuevos deberían hacerse cargo de los neumáticos del mercado nacional de reemplazo que sean aportados por los talleres de recambio en las cantidades que corresponden a su cuota de participación en el mercado nacional. También deberían entregarlos por si mismos o a través de gestores autorizados, a instalaciones adecuadas para el reciclado y valorización, en su caso.

Y, por supuesto, se debe garantizar que se efectúa la correcta gestión medioambiental de los neumáticos.

En la parte concerniente a los distribuidores y los titulares de los talleres de recambio de neumáticos les correspondería hacerse cargo de los neumáticos procedentes de los

usuarios, entregar los NFUs a gestores autorizados y disponer de las autorizaciones pertinentes de las Comunidades Autónomas en la que ejerzan sus actividades, entre otras obligaciones.

Por último, los demás agentes que intervengan en el sistema, esto es, los gestores y valorizaciones deberían contar con las autorizaciones correspondientes de las Comunidades Autónomas en las que realicen sus actividades, mantener un registro documental del tratamiento aplicado a los NFUs, haciendo constatar aspectos tales como las cantidades de los NFUs gestionados, el origen y destino de los mismos, la frecuencia de recogida, el método de valorización, en su caso, etc.

El borrador se apoya en los modelos de otros países, tomándolos como referencias, y que se incluyen resumidamente a continuación:

<b>País</b>	<b>Marco Legislativo</b>	<b>Productores: fabricantes, importadores, etc.</b>	<b>Distribuidores, talleres, recogedores y gestores</b>
1. Bélgica	Decreto del 27/06/1997 Decreto del Gobierno Valón del 25/04/2002 Proyecto de Acuerdo Ambiental Acuerdos VLAREA	Principio de responsabilidad del productor. Asociación de los productores: RECYTYRE	
2. Dinamarca	Orden nº 111 del 5/02/2000	Principio de responsabilidad del productor. Productos que pagan trimestralmente a la Agencia de Protección Ambiental unos impuestos fijados por ley	La agencia de Protección Ambiental concede subvenciones mensuales a las empresas recogedoras que no cobren por la gestión
3. Finlandia	Decisión 1246/1995	Principio de responsabilidad del productor. Asociación de los productores: Finnish Tyre Recycling Financiación: tasa de reciclaje por tipo de neumático, al comprar uno nuevo	
4. Francia	Decreto del 4/08/2000 Decreto 2002-1563 del 24/12/2002	Obligados a recoger dentro de las toneladas que hayan comercializado, los neumáticos usados de los distribuidores y usuarios. Asociación de los productores: Aliapur Financiación: contribución medioambiental mensual, por tipo de neumático	Obligación de recoger gratuitamente NFU en toneladas y tipos parecidos a los que hayan vendido ese año

### 3.- PROCESO FABRICACIÓN

#### 3.1.- PANORÁMICA GENERAL SOBRE LA UTILIZACIÓN DE NFU EN CARRETERAS

A pesar de que los neumáticos fuera de uso (recordemos NFU) no constituyen por sí mismos un residuo ni tóxico ni peligroso, los volúmenes en que son producidos, las dificultades de almacenabilidad, su forma favorecedora de almacenar agua a cierta temperatura creando el ambiente propicio a la proliferación de insectos, la toxicidad de los gases que se producen caso de incendio, etc., obliga a que se adopten medidas para su aprovechamiento y eliminación.

Valga el ejemplo de EEUU donde se desechan anualmente más de 285 millones de unidades, lo que equivale a más de 1 neumático/ habitante / año, calculándose, según datos de la ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), y que actualmente existen para su eliminación entre 2 y 3 mil millones de unidades acumuladas en vertederos.

Las cifras se manejan para la C.E.E. están en intervalos parecidos, esto es, 1 NFU/hab./año, que con un peso medio de 7,0 kg/ NFU obtendríamos unas cantidades aproximadas generadas de sus estados miembros similares a las que se recogen en la siguiente tabla y que equivale a 300 millones de NFU/año.

Estado miembro	Habitantes (10 <sup>3</sup> )	NFU (Tn/año)
Alemania	82.060	598.000
Austria	8.075	52.000
Bélgica	10.192	66.000
Dinamarca	5.295	35.000
España	39.348	255.000
Finlandia	5.147	33.000
Francia	58.815	380.000
Gran Bretaña	59.084	385.000
Grecia	10.508	65.000
Holanda	15.650	100.000
Irlanda	3.693	20.000
Italia	56.911	370.000
Luxemburgo	424	3.000
Portugal	9.957	60.000
Suecia	8.848	58.000
Unión Europea - UE	374.566	2.480.000

Centrándonos en España y si tenemos en consideración que el número de NFU que se generan depende no solo de la población, sino también del nivel de renta, del parque automovilístico, etc., se puede proporcionar la cifra de 255.000 Tn/ año con el fin de

evaluar el orden de magnitud del problema que estamos tratando. Este número de Tn/año equivladría a 40 millones de unidades/año que sumando los generados en años anteriores no nos equivocamos mucho si hablamos de que existen para ser tratados en nuestro país alrededor de 400 – 600 millones de NFU.

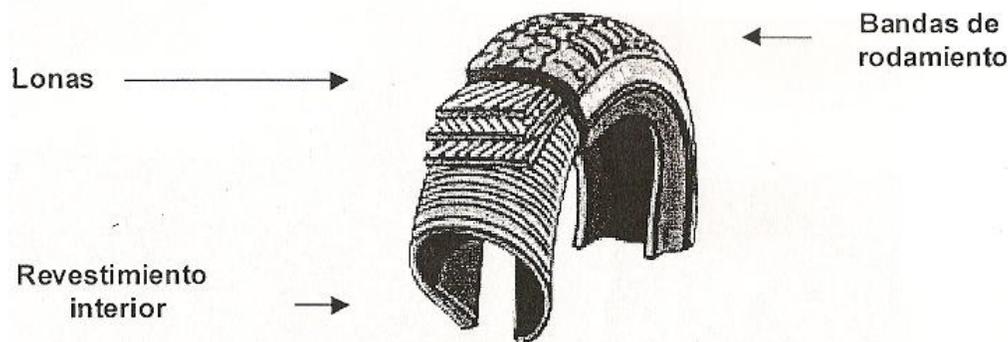
Bajo el punto de vista de reutilización como materia prima, debemos tener en cuenta, como posteriormente veremos, que en un neumático alrededor de un 50% de su composición son cauchos naturales o sintéticos con posibilidades de ser reutilizados en otras aplicaciones, aprovechando las características residuales que permanecen tras su primer ciclo de uso.

Nos encontramos pues, ante un residuo que conviene analizar con detenimiento para llevarlo de la “cuna a la sepultura” por el camino más limpio y rentable que sea posible. Este es pues el reto al que ninguna organización política o social, nacional, comunitaria o municipal, de fabricantes o consumidores, etc., debe sentirse ajena.

### 3.2.- EL NEUMÁTICO

La clasificación puede establecerse en función de diferentes parámetros. Así podemos definirlos como radiales, que suelen ser la mayoría, o diagonales según la estructura de la carcasa, de bicicletas, turismos, camiones, vehículos industriales pesados según el campo de aplicación al que van destinados, de diseño textil o cable de acero, de verano o invierno, etc.

La profundidad de estudio y perfeccionamiento alcanzada en los neumáticos para el mejor cumplimiento de las misiones para las que fue diseñado, ha llevado a hacer coincidir en cada uno de ellos diferentes composiciones para cada una de sus partes: así carcasa, flancos, talones, bandas de rodadura, cámaras, engomados, rellenos, etc. tienen estructuras químicas distintas.



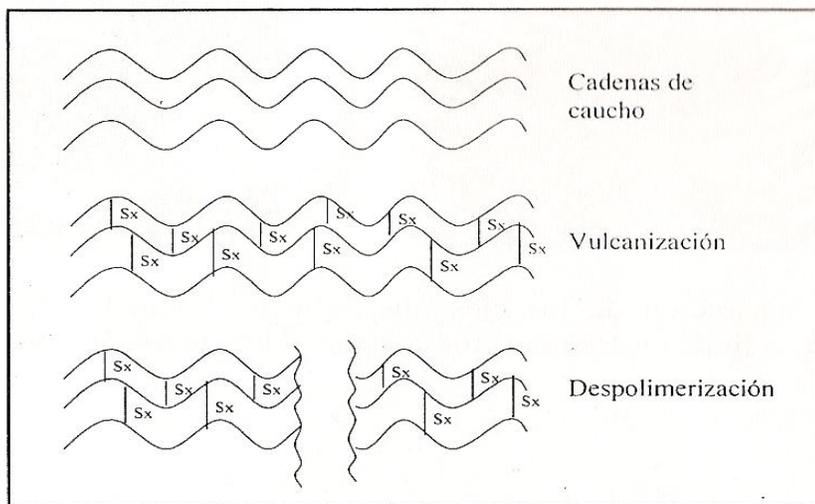
No obstante podemos hablar por lo menos de un elemento común puesto que en conjunto los neumáticos son los destinatarios principales de la industria del caucho, pues absorben más de un 60% de la producción mundial del mismo.

Los tipos de caucho que más se utilizan son los naturales (NR), los de estireno – butadieno (SBR) y los polibutadienos (BR) poliisopropenos (IR), etc., los cuales entran en proporciones variables según el destino o aplicación específica que vaya a tener.

El caucho natural en líneas generales proporciona elasticidad, mientras que los sintéticos del neumático lo que aportan es estabilidad térmica. Durante la fabricación del neumático los cauchos se someten al proceso de vulcanización consistente en entrelazar las cadenas de polímeros con moléculas de azufre mediante la acción de elevadas presiones y temperaturas. Los enlaces así formados son muy estables lo que provoca que el proceso de desvulcanización sea muy difícil, por lo que salvo aplicaciones muy específicas lo que generalmente se hace es una despolimerización parcial.

Otro componente que entra en proporciones altas es el negro de humo como carga de refuerzo y mejoras de la resistencia de los cauchos a la oxidación.

El acero y materia textil forman el tercer y cuarto componente en magnitud del neumático, con la misión de ser el esqueleto del mismo y soportar y transmitir las cargas y esfuerzos que sobre el, se producen durante la circulación de los vehículos.



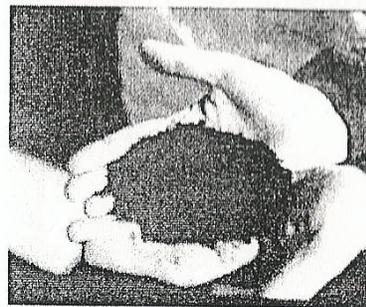
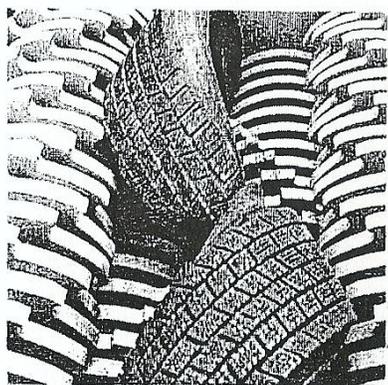
El óxido de Zinc como catalizador de la reacción de vulcanización y otra serie de productos químicos que actúan como plastificantes, adhesivos, etc. acaban de darnos la composición de un neumático y que queda de la forma que a continuación se muestra:

- **Cauchos** ..... **47%**
- **Negro de humo** ..... **22%**
- **Acero** ..... **16%**
- **Material textil** ..... **5%**
- **Oxido de Zinc** ..... **1%**
- **Varios( productos químicos) ...** **9%**

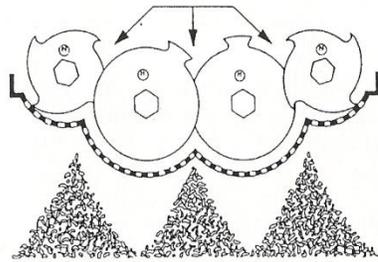
### **Trituración y molienda de los nfu.**

Es de suponer que muchas de las aplicaciones de los NFU precisan una trituración previa, hasta un grado de molienda adecuado con el objetivo que se persiga. Este proceso es muy complicado ya que los NFU coordinan elasticidad con resistencia a la perfección y además están ayudados por su componente de acero.

En cualquier proceso que se describa es necesario un paso previo de trituración del NFU hasta tamaños de 10 – 20 cm. Esto se realiza a través de trituradoras formadas por dos o más ejes paralelos de cuchillas que giran a distintas velocidades( no sobrepasan por regla general las 15 r.p.m.), para favorecer la incorporación del neumático; las cuchillas que tienen espesores de aproximadamente 10 cm., constan en sus bordes con salientes en forma de garfio que ayudan también a la introducción del neumático.



La separación de los ejes nos definen el tamaño de los trozos obtenidos, pudiendo realimentar los más gruesos para conseguir tamaños inferiores.



Este tipo de trituradoras existen varias en España puesto que se trata de un importante paso previo en vertedero o centros de recogida para disminuir el volumen de los neumáticos.

En caso de que se deseen obtener tamaños inferiores a varios mm. se precisa pasar a un proceso de molienda.

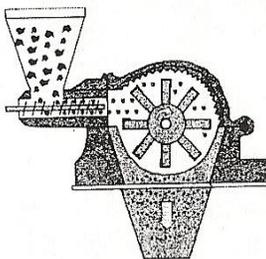
En líneas generales, se puede hacer por molido a **temperatura ambiente o por criogénesis**.

El proceso a temperatura ambiente se efectúa pasando el triturado por molinos clásicos que están formados por un rotor y el estator que lo rodea. Previamente al molido ha habido que separar el componente metálico para evitar daños al molino, lo cual se hace normalmente mediante separadores magnéticos dispuestos sobre las cintas.

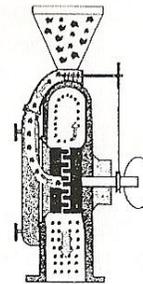
Para eliminar la parte textil se emplean cintas o bandejas vibratorias que originan apelmazamiento de las fibras y que posteriormente se separan por tamizado, ciclones u otro dispositivo.

La molienda por criogenia consiste en enfriar el NFU a temperaturas por debajo de los  $-60^{\circ}\text{C}$  para lograr su rigidez y poder molerse con molinos clásicos de impacto o bolas.

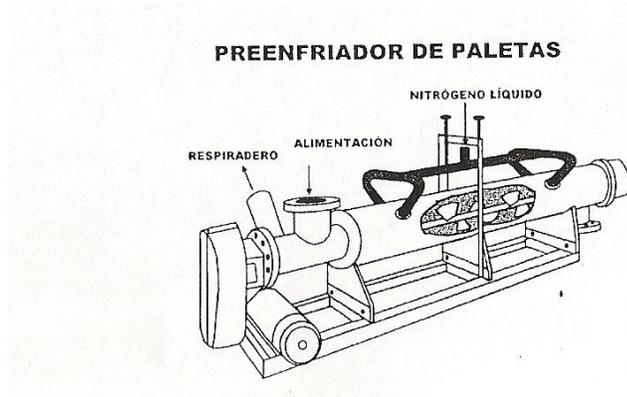
**MOLINO DE MARTILLO**



**MOLINO DE AGUJAS**



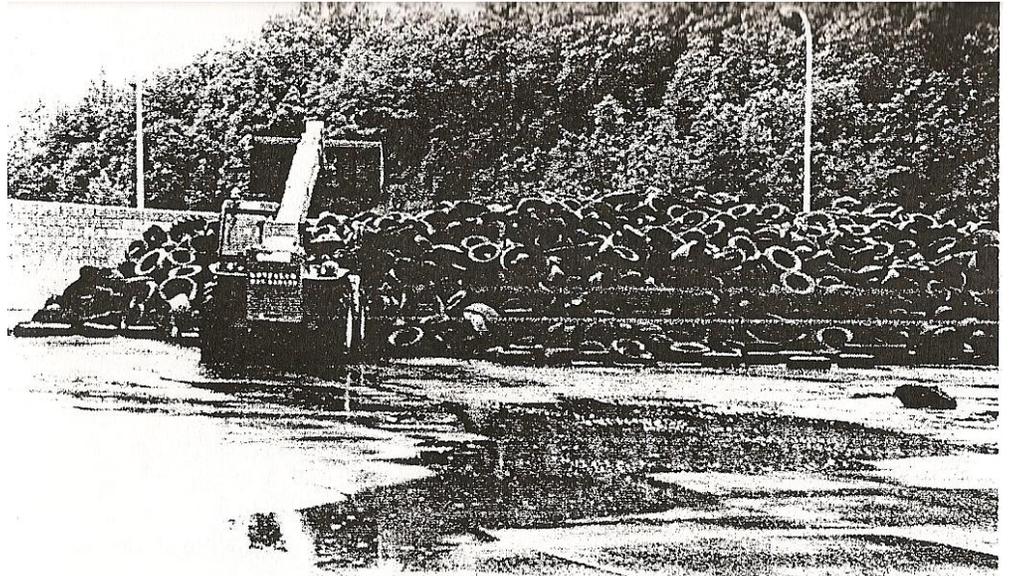
El enfriamiento se obtiene, haciendo entrar en contacto el neumático troceado con nitrógeno líquido existiendo diferentes maneras de hacerlo, una de las cuales la representamos en la figura siguiente:



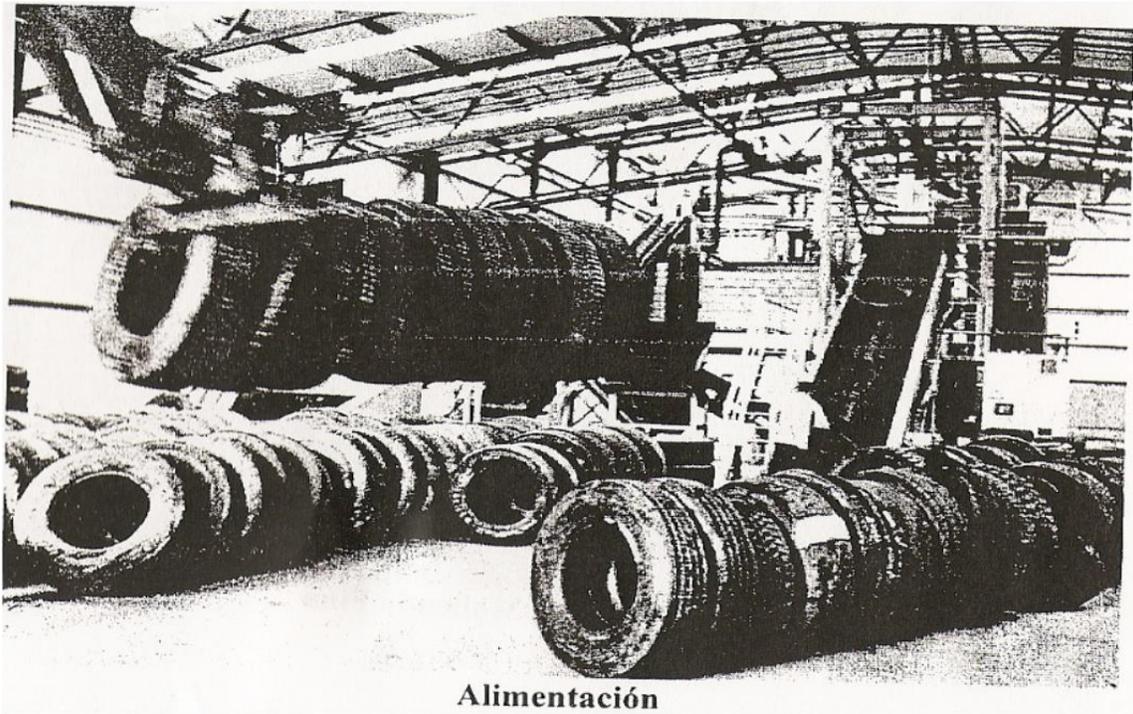
Tal y como es de suponer, las bajas temperaturas favorecen la condensación de agua sobre el grano molido, por lo que se precisa de un proceso de secado antes de su ensacado.

Las diferencias que unas y otras instalaciones originan en los molidos que se han ido obteniendo son fundamentalmente, la mayor redondez y consecuentemente menor superficie específica que tiene el grano logrado por criogénesis.

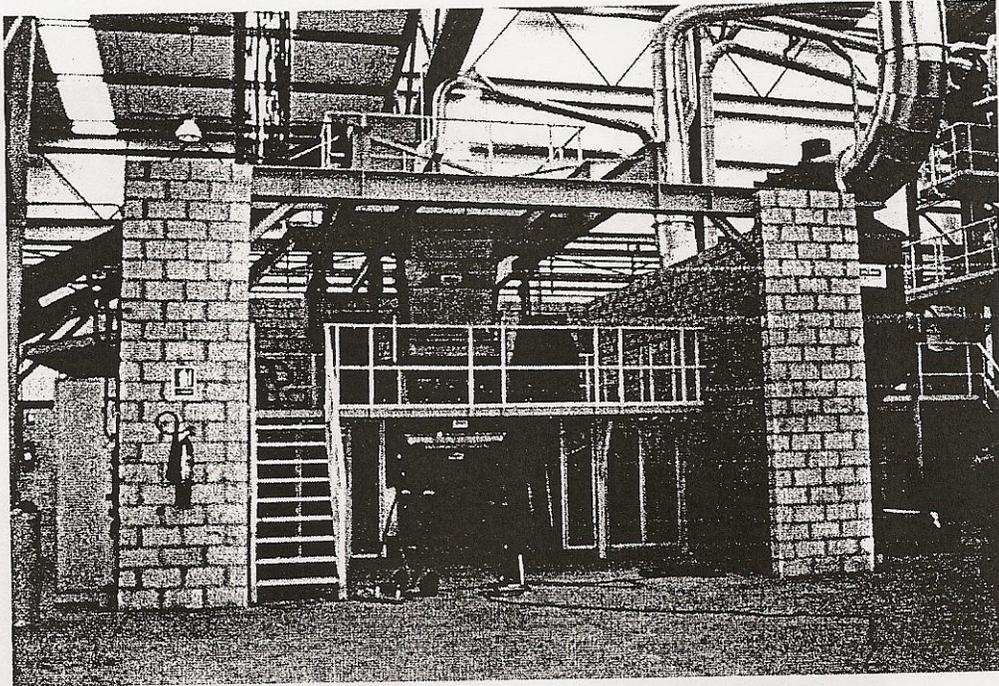
Valgan de ejemplo algunas fotografías de la planta de Renecal en Palencia, que es capaz de triturar a temperatura ambiente o por criogénesis, en función de la demanda del mercado.



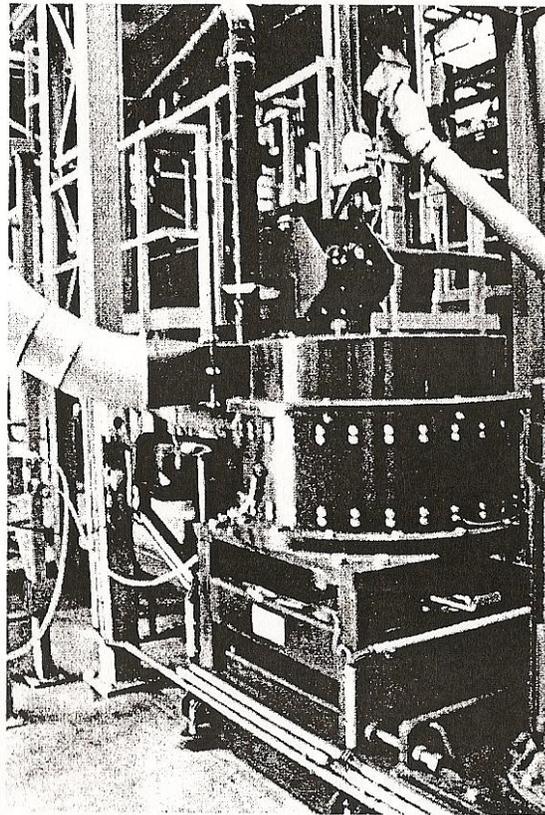
**Recepción de material**



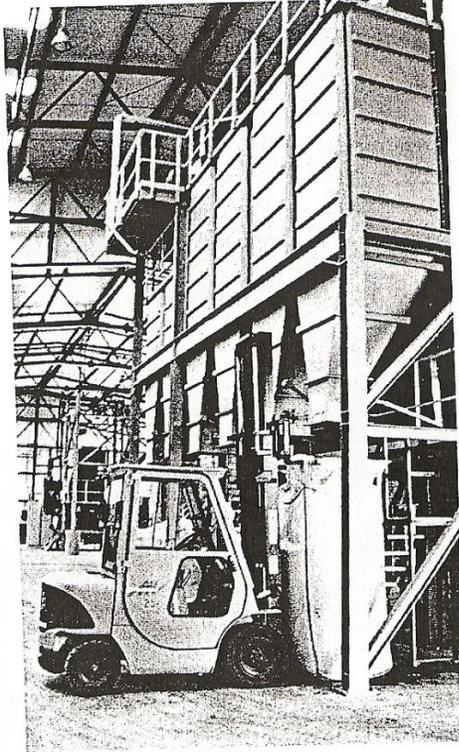
**Alimentación**



**Molienda Fina**



**Molienda fina con criogenesis**



**Almacenado**



**Empaquetado**

### *Productos obtenidos en dos fases sucesivas de la trituración de un neumático*



En concreto la capacidad de molienda que existe en España ronda las 50.000 Tn/año con un total de siete plantas, la mayor parte de las mismas de trituración mecánica a temperatura ambiente. Existen de igual manera proyectos de nuevos montajes. En cuanto a los trituradores primarios existentes deben de estar alrededor de quince.

#### **Normativa legal sobre los NFU.**

Los documentos de mayor relevancia que conforman en el marco legal para los NFU y de los que ampliamente se ha hablado, podríamos decir que son para el Estado Español:

La Ley de Residuos 10/1998 de 21 de Abril que tiene por objeto, según comenta en su artículo primero:

“El objeto de esta ley es prevenir la producción de residuos, establecer el régimen jurídico de su producción y gestión, y fomentar, por este orden, su reducción, su reutilización, reciclado y otras formas de valorización(...)”.

En su artículo tercero, “Definiciones” establece:

a) Reciclado: la transformación de los residuos, dentro de un proceso de producción, para su fin inicial o para otros fines, incluido el compostaje y la biometanización, pero no la incineración con recuperación de energía.

b) Valorización: todo procedimiento que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos (...). En cualquier caso, estarán incluidos los procedimientos nombrados en el anexo II.B de la Decisión de la Comisión (96/350/CE)”.

Plan Nacional para los neumáticos fuera de uso 2001-2006 BOE nº 260 de 30/10/2001.

Real Decreto 1481/2001 de 27 de Diciembre que regula el depósito en vertederos.

Y en lo relacionado con el ambiente comunitario:

1. El V Programa Comunitario de Política Ambiental.
2. Las 3 últimas directivas europeas, recogidas en el siguiente cuadro:

Directiva	Entrada En vigor	Impacto potencial
Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos.	2003 2006	Prohibición vertido neumáticos enteros. Prohibición vertido neumáticos troceados. Total de NFU afectados <b>1.033.56 Tn/año</b> que todavía se siguen vertiendo en el 2000.
Directiva 2000/53/CE relativa a los vehículos al final de su vida útil.	2006	Deberán tratarse neumáticos de aprox. 7.589.000 vehículos fuera de uso, equivalentes a 30.356.000 neumáticos o aprox. <b>300.000Tn/año</b> .
Directiva relativa a la incineración de residuos 2000/76 CE	2008	El cumplimiento de límites de emisión a la atmósfera más bajos podría obligar al cierre de los hornos rotativos de vía húmeda que actualmente tratan aprox. el 20% de los NFUvalorizados en cementeras. Aprox. <b>111.706 Tn/año</b> de neumáticos podrían volver al mercado.

Suponiendo un incremento al problema actual de 1.500.000 Tn/año de NFU.

Si intentáramos entresacar y simplificar de todos ellos las obligaciones a que nos comprometen hablaríamos de:

- Estar en situación de controlar el 100% de NFU que se producen.
- Establecer el régimen jurídico que regule su producción y gestión.
- Reducir su producción en base a una mayor dirección.
- Aumentar el % de su reutilización (recauchutados, etc.).
- Reciclar aquello que no se pueda utilizar.
- Valorizar lo que no se pueda ni reutilizar, ni reciclar.
- Eliminación en vertedero 0%.

En el 2003 el neumático entero.

En el 2006 el neumático triturado.

### **Su destino final.**

Una vez que el neumático ha cumplido su ciclo de vida útil para el que fue diseñado, tiene distintas opciones de seguir para alcanzar su estado final y que van a ser explicadas en los puntos que siguen:

**El recanalado** se define como un paso intermedio antes de convertirse de manera definitiva en residuo. Consiste en remarcar el dibujo primitivo en aquellos que no han perdido más de un 75% de su profundidad original. No parece ser este método el más adecuado para disminuir la producción global de neumáticos al aumentar su periodo de utilización, pensando fundamentalmente en la seguridad y confort de los usuarios. De cualquier forma, unos meses o años más tarde se convertirán definitivamente en residuo.

**El recauchutado**, se trata de una práctica bastante extendida que permite, tanto si se realiza en frío como en caliente, disponer de neumáticos seminuevos ya que mantienen del antiguo la carcasa, sobre la que se aplica una banda de rodadura nueva.

Tanto una técnica como la otra, son sin duda, tal y como señala el documento informativo nº XI/623/91-ES Diciembre del 91 sobre la gestión de VFU en la Unión Europea, los procesos más ecológicos y económicos de reutilización de neumáticos.

Todos los neumáticos, hayan o no sufrido alguno de los dos procesos anteriores, tienen muy distintos campos de aplicación. Veamos como sin sufrir ninguna transformación, pueden ser empleados en:

**Arrecifes artificiales**, tales como rompeolas. Ejemplos de ello existen en Fort Lauderdale (Florida) donde se emplearon más de 2 millones de ellos o en Nueva Jersey donde está proyectado absorber anualmente más de 100.000 unidades. La compañía Minesota construyó un rompeolas flotante con neumáticos entrelazados de 150 m. de largo; muchos más ejemplos podrían citarse en Japón, Australia, Nueva Zelanda, etc.

**Pistas provisionales**, para la circulación de vehículos sobre terrenos poco estables en explotaciones forestales, accesos a canteras, etc.

**Obras de ingeniería civil**, como barreras de protección en costas, carreteras, circuitos de velocidad, rampas de aparcamientos, paredes de muelles para embarcaciones, etc.

**Aislamientos**, para tuberías y cables o en cimentaciones de edificios, etc.

**Decoración**, y elementos de recreo en parques infantiles, ferias, etc.

Además de estas aplicaciones existen otras muchas cuando el neumático se tritura.

No en vano, aplicaciones de granulado son:

**Pistas de atletismo**, donde la goma constituye la carga mineral de la mezcla fabricada normalmente con poliuretanos.

**Campos de juego y gimnasios**, entrando a formar parte de la moqueta que sirve de base al revestimiento final.

**Pistas ecuestres e instalaciones ganaderas**, como elemento base de la construcción de pavimentos especiales, altamente flexibles.

**Elementos de señalización**, para carreteras.

**Absorbente**, de distintos productos químicos contaminantes impidiendo su filtración a través del subsuelo.

**Retentor de humedad**, en usos agrícolas.

**Capa drenante**, de fondos de vertederos, etc.

**Césped artificial**, como capa soporte.

**Regenerador de goma**, mediante degradación térmica y mecánica para su reutilización posterior en la industria del neumático, del calzado, etc.

Todas las aplicaciones hasta el momento vistas para los neumáticos usados son sin duda alguna interesantes, pero en la realidad solo son capaces de procesar una mínima parte del volumen total que se genere.

Otras tecnologías tales como la **pirolisis** y **termólisis** se encuentran en vías de investigación y desarrollo ya que hasta el momento hay dudas sobre si las materias primas que son susceptibles de obtenerse, como aceite y negro de humo, tienen la calidad deseada, ni si las inversiones que es necesario realizar están justificadas.

Las fuentes válidas que a nivel mundial son aceptables como capaces de minimizar el problema son:

- **La producción de combustible TDF (Tire Derived Fuel).**
- **Su empleo en carreteras en líneas muy específicas de actuación.**

Todo aquello que estas dos tecnologías no sean capaces de absorber, provocará que grandes cantidades de neumático tendrían que seguir yendo a vertedero hasta que nuevas líneas de investigación nos indiquen mejores soluciones.

La utilización como **combustible** trata de aprovechar la energía térmica que produce la combustión de la goma de los mismos. Existen experiencias para la producción de papel, vapor, electricidad, cemento, etc.

Los hornos de cemento en función del tamaño y estructura, pueden utilizar neumáticos enteros como substitutivos de otros combustibles, si bien, no todas las normativas vigentes permiten su utilización desde el punto de vista medioambiental, por los riesgos que en el caso de que los controles no sean perfectos, pueden ocasionar.

Fuentes consultadas de la Dirección General de Medio Ambiente, Seguridad Nuclear y Protección Civil de la Comunidad Europea, nos indican que la adecuación de los hornos para este fin con capacidad para la quema de hasta 1.000 Tn/año, implica inversiones entre 1y 2 millones de euros necesitándose 9 meses para su puesta en marcha.

Los datos para las instalaciones de producción de vapor, con capacidad de eliminar 4.000 Tn/año, hablan de 15 meses de trabajo e inversiones no inferiores a 5 millones de euros.

Cuando se habla de incineración con recuperación de energía, con capacidad de eliminar cantidades entre 50 y 100.000 Tn/año de neumáticos, de las que ya existen experiencias en Alemania, Francia, Italia y Reino Unido, las cifras que las mismas fuentes nos indican, hablan de inversiones por encima de los 50 millones de euros ya que los sistemas de tratamiento de gases y medidas de control obligan a ello.

La utilización en **carreteras**, consultadas las fuentes pertinentes y nuestra experiencia, parece un camino limpio, rápido y rentable para la valorización de los NFU.

Estas exigencias vienen a su vez avaladas por las experiencias que en los propios EEUU han tenido del empleo de triturado de neumáticos en carreteras.

### **Prácticas de gestión en la unión europea.**

Tomando datos procedentes de ETRA (European Tyre Recycling Association) nos dan información para ser empleada solo en su orden de magnitud, la evolución del mercado del NFU que se muestra en esta tabla:

<b>Valorización/ Eliminación</b>	<b>1992</b>	<b>1994</b>	<b>1996</b>	<b>1998</b>	<b>2000</b>
Neumático de segunda/Exportación	6%	8%	8%	11%	11%
Recauchutado	13%	12%	11%	11%	11%
Reciclaje materia	5%	6%	11%	18%	20%
Aprovechamiento energético	14%	18%	20%	20%	21%
Vertido	62%	56%	49%	40%	37%

Del análisis del cuadro se desprende:

- El mercado de segunda crece, y probablemente lo siga haciendo aunque lentamente.
- El recauchutado se estabiliza a la baja.
- El reciclaje aumenta de manera importante así como el aprovechamiento energético.
- El vertido disminuye considerablemente.

Fijándonos en la situación del mercado estimado en España:

<b>Mercados</b>	<b>Tn/año</b>	<b>%sobre el Total de Tn/año</b>
Reutilización-Exportación	12.040	4
Recauchutado	42.140	14
Reciclaje	24.080	8
Recuperación Energética	30.100	10
Vertedero	192.640	64
<b>Total</b>	<b>301.000</b>	<b>100</b>

Frente a estas perspectivas las tendencias en los distintos países Europeos son dispares. En los países Nórdicos abogan por incorporar un canon al neumático nuevo (en Noruega es de 2 euros para los neumáticos de turismo y unos 10 euros para los de camión) con el que se crea un fondo gestionado por una sociedad para dar solución al problema.

Otros países optan por dejarlos a la evolución del mercado libre, pero con restricciones severas como son:

1. Prohibición de verter neumáticos enteros y troceados.
2. Posesión de tasas disuasorias de vertido.
3. Obligación de entregar del NFU a gestores autorizados.
4. Pago de los costes de recuperación entre talleres, consumidor, mayorista y fabricante.
5. Puesta en marcha de sistemas de vigilancia y control sobre la gestión, etc.

En nuestro país, se está empezando a implantar tendencias en ambos sentidos e inclusive se ensaya el cobro del canon a través de los impuestos de circulación de los vehículos.

## **Valorización de NFU para carreteras.**

A partir de la década de los 60 han sido muchas las experiencias realizadas; valgan por ejemplo en el año 1968 el “Arizona Department of Transportation (ADOT)” colocó la primera membrana SAM y en 1972 la primera SAMI como retardador de figuración.

Experiencias de índole parecida fueron llevadas a la práctica por la Arizona Refinery Company (ARCO) o la Envir Otire INC con su sistema PlusRide de incorporación de triturado al agregado para fabricar una mezcla discontinua.

En nuestro país, ya en 1974 el Centro de Investigación E.M.S. trabajó en fórmulas de incorporación de caucho al betún para posteriormente fabricar mezclas asfálticas que fueron con éxito aplicadas en calles de la ciudad de Barcelona. Pese a esto, ni los conocimientos ni los medios de fabricación, eran los más adecuados para disponer de un producto homogéneo y de garantía.

Con todos estos antecedentes el Centro de Investigación Elpidio Sánchez Marcos estimó necesario el estudio en profundidad de la aplicación de triturados de neumático usado en carreteras. Debido a ello, se elaboró un proyecto de Investigación titulado “**Modificación de betún y mezclas asfálticas con caucho reciclado**” y que fue desarrollado en colaboración con las empresas Elsamex, S.A. y el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid y financiado parcialmente por el CDTI y el entonces MINER.

El Ministerio de Fomento en su orden circular 5 bis/2002 de 31 de Octubre de 2002 avala el empleo del NFU en carreteras al afirmar que en las obras en las que se ha utilizado el producto resultado de la trituración de los neumáticos usados sea técnica y económicamente viable, se dará prioridad a estos materiales.

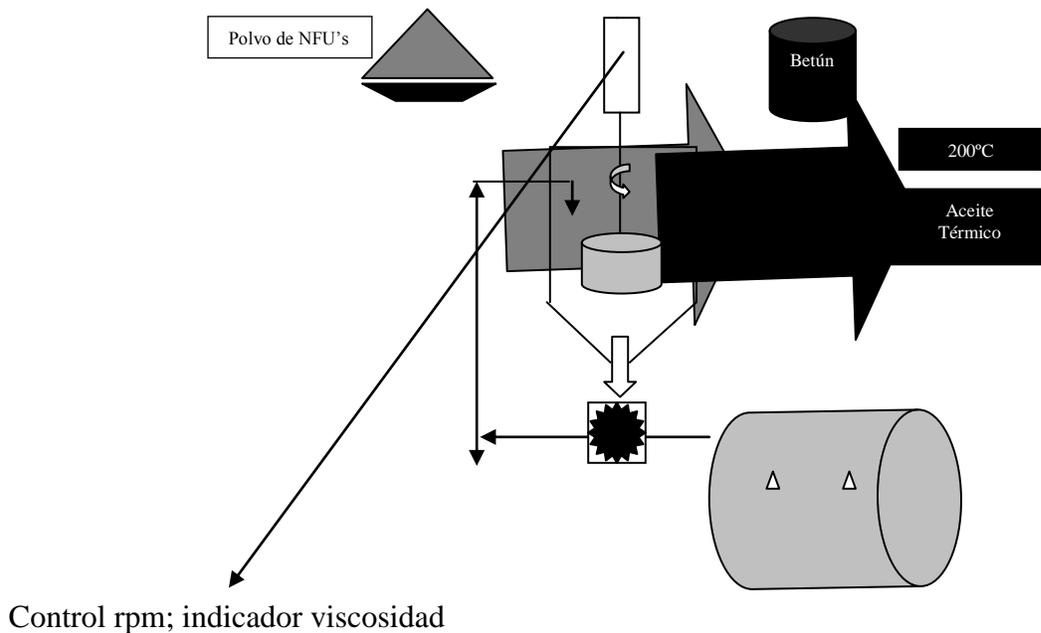
Dentro del empleo en carreteras, las posibles aplicaciones son muy variadas;

Así el triturado de neumático puede ser empleado para:

✓ Modificar betunes de destilación para su empleo en:

- Mezclas bituminosas.
- Membranas SAM o SAMI antifisuras.
- Membranas impermeabilizantes (tableros de puente, edificación, etc.).
- Materiales para juntas de dilatación.
- Productos para puentado de fisuras, etc.

### Esquema planta de fabricación betún-caucho



Sustitución parcial de los materiales pétreos en la estructura de mezclas asfálticas para ser empleados en:

- Capas de base e intermedias.
- Capas de rodadura de granulometría densa (continua o discontinua).
- Mezclas porosas.

Las exigencias cada vez mayores a las que sometemos a nuestras carreteras por:

- Aumento en la intensidad de tráfico.
- Aumentos de cargas por eje y presión de inflado.
- Construcción de capas de rodadura de bajo espesor.
- Necesidad de una mayor durabilidad.
- Necesidades de mejora en el confort y seguridad de los pavimentos, etc.

Precisan que en algunas de ellas sustituyamos el betún convencional por betunes modificados con polímeros. Actualmente los de mayor utilización son el SBS, EVA, polietilenos, EPDM, etc.

La modificación de betunes, llamada **vía húmeda**, consiste en incorporar al betún una proporción de neumático triturado, bajo ciertas condiciones de mezclado (temperatura, tiempo, sistema mecánico, aditivos, etc.) con el fin de mejorar la estructura de este con aquellos componentes del neumático más nobles, que alcanzan en él, proporciones del 50% y que son fundamentalmente mezclas de cauchos naturales y sintéticos tal y como se ha comentado.

Uno de los caminos lleva a fabricar betunes estables al transporte y almacenamiento y que pueden fabricarse en las actuales plantas de betunes modificados.

Los resultados obtenidos se recogen en la tabla, donde se compara un betún convencional con otro de parecida penetración pero modificado con neumático triturado. Evidentemente los cambios de características se verán influenciados por el tipo de betún, porcentaje de caucho empleado, sistema de fabricación, etc.

Incorporados estos polímeros a la estructura del betún se logra un ligante capaz de fabricar mezclas que nos cumplen las nuevas expectativas que se han citado.

### **Propiedades del ligante betún/caucho**

<b>Ensayos</b>	<b>Unidad</b>	<b>NLT</b>	<b>B. 60/70</b>	<b>B. Caucho</b>
Penetración (25°C; 100g; 5 s.)	0.1 mm	124	65	57
Punto de reblandecimiento (Ay B)	°C	125	49.7	62.1
Índice de penetración		181	-0.62	1.8
Punto de fragilidad FRAASS	°C	182	-10	-19
Ductilidad (5° C; cm./min.)	Cm	126	NA	21
Densidad relativa (25°C/25°C)	g/cm <sup>2</sup>	122	1.029	1.041
Consistencia por flotador a 60°C	s.	183	328	>2000
Rec. Elástica por torsión a 25°C	%	329	0	47.2
Estabilidad al almacenamiento:		328	NA	
- Difer.punto reblandecimiento	°C	125		4.2
- Difer. Penetración	0.1 mm	125		1
<b>Residuo película fina:</b>				
Variación de masa	%	185	0.06	-0.18
Penetración (25°C; 100g; 5 s.)	% p.o.	124	69	70.8
Variación punto reblandecimiento	°C	125	+3	+7.7
Ductilidad (5°C; 5cm./min.)	Cm	126	NA	13

Otra opción de la vía húmeda es modificar betunes para su empleo de inmediato en la fabricación de mezclas, por lo cual han de fabricarse próximo a las plantas ya que los betunes que se han obtenido de este modo no son almacenables. El sistema, consiste en premezclar betún y triturado con un flujo continuo hacia los depósitos de maduración donde permanecen bajo agitación 45-60 min. antes de incorporarlos a la planta asfáltica.

Los ligantes que se han obtenido por este proceso, poseen características como las que se indican en esta tabla:

### Características de un betún de alto contenido de caucho

Características	Norma de Ensayo NLT	Resultado
Penetración (25°C, 100g, 5s), 1/10 mm	NLT	30
Punto de reblandecimiento, °C	NLT	82
Retorno elástico por torsión, %	NLT	21
Viscosidad a 175 °C, cP	NLT	3.250

El otro camino empleado consiste en la adición del triturado también de neumático al mezclador la cantidad adecuada para cada amasada (planta discontinua) o bien mezclarlo previamente con algún componente pétreo de la mezcla antes de la fabricación (planta sustituyendo una fracción de áridos, conocido como **vía seca**; se incorpora bien directamente continua).

En algunos tipos de estas últimas plantas sería viable y sencillo incorporar de manera continua la cantidad de triturado prefijada en la fórmula de trabajo, esto se haría a través de un sencillo elemento mecánico preparado a tal efecto que vierta directamente en el tambor secador-mezclador.

El camino de vía seca aporta importantes ventajas técnicas a la mezcla formando un sistema capaz de eliminar la totalidad de neumático que se produce en el país de forma limpia, económica y segura. También, estudios proporcionan datos optimistas en cuanto a adherencia de los neumáticos para estos tipos de firmes, disminución en el nivel sonoro que se produce al circular sobre ellos, eliminación mucho más rápida de las posibles placas de hielo que se producen en época invernal.

Este último aspecto ha sido corroborado a nivel de laboratorio, encontrando para estas mezclas velocidades de deformación muy inferiores a las tradicionales que no presentan triturado incorporado.

Cabe destacar que existe un tercer camino que aúna vía húmeda y vía seca, y que es en la actualidad, objeto de estudio por primera vez.

Este sistema emplea betún modificado con caucho como ligante y una cierta cantidad de triturado incorporado a la mezcla en forma de áridos. Este proceso hace todavía más compatible la incorporación del caucho por vía seca.

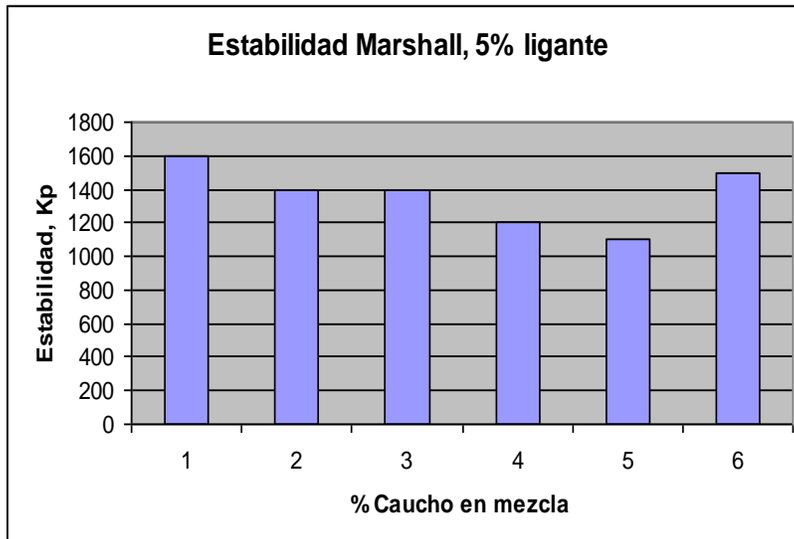
Con objeto de medir la influencia que sobre las mezclas asfálticas tiene el empleo del triturado de neumático bien por la vía húmeda (incorporándolo al betún), o la vía seca (sumándolo al árido), se han estudiado una serie de características, que son:

- Estabilidad Marshall.
- Deformación Marshall.
- Inmersión-Compresión.
- Resistencia a deformación plástica.
- Módulo dinámico.
- Resistencia a fatiga.

Valgan de ejemplo los resultados medios obtenidos para una mezcla S-20; los mostramos seguidamente:

### Estabilidad Marshall

El comportamiento del betún caucho frente a la estabilidad Marshall es bueno, superior al de un betún convencional; sin embargo, la adición directa de goma en polvo a la mezcla, cuando supera el 1% sobre el peso de los áridos, hace que disminuya ésta de una forma significativa.



1--- Betún Caucho

2--- Betún 60/70 + 0%

3--- Betún 60/70 + 1%

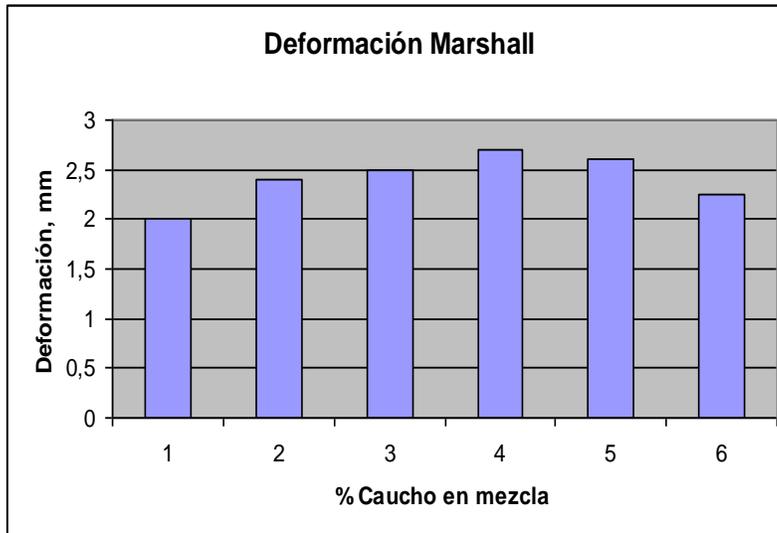
4--- Betún 60/70 + 1.5%

5--- Betún 60/70 + 2%

6--- Betún 60/70 + 1.5%  
+ 2 horas

### Deformación Marshall (Compresión diametral)

La adición de goma en polvo provoca un aumento de la deformación Marshall.



1--- Betún Caucho

2--- Betún 60/70 + 0%

3--- Betún 60/70 + 1%

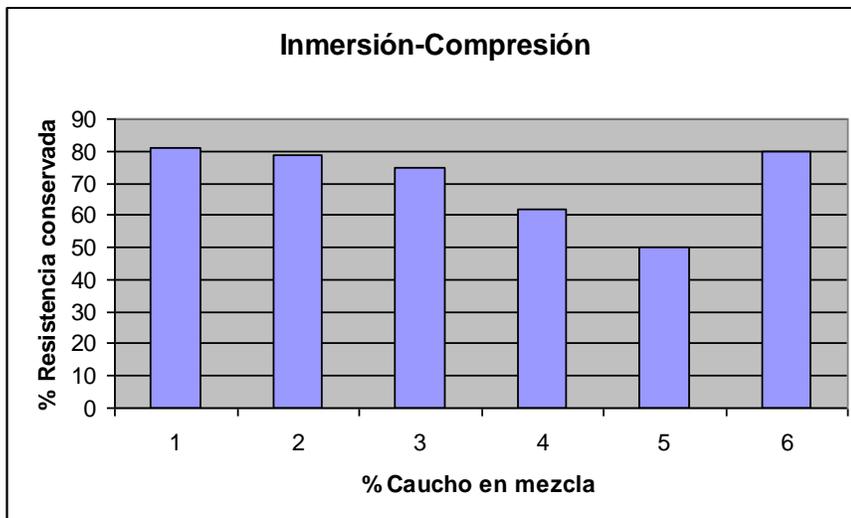
4--- Betún 60/70 + 1.5%

5--- Betún 60/70 + 2%

6--- Betún 60/70 + 1.5%  
+ 2 horas

### Inmersión- compresión (Compresión simple)

La misma reacción se presenta en la resistencia conservada del ensayo de inmersión-compresión. Con el betún caucho el comportamiento es similar al del betún 60/70, produciéndose una caída de la misma a medida que ponemos polvo de neumático a los áridos.

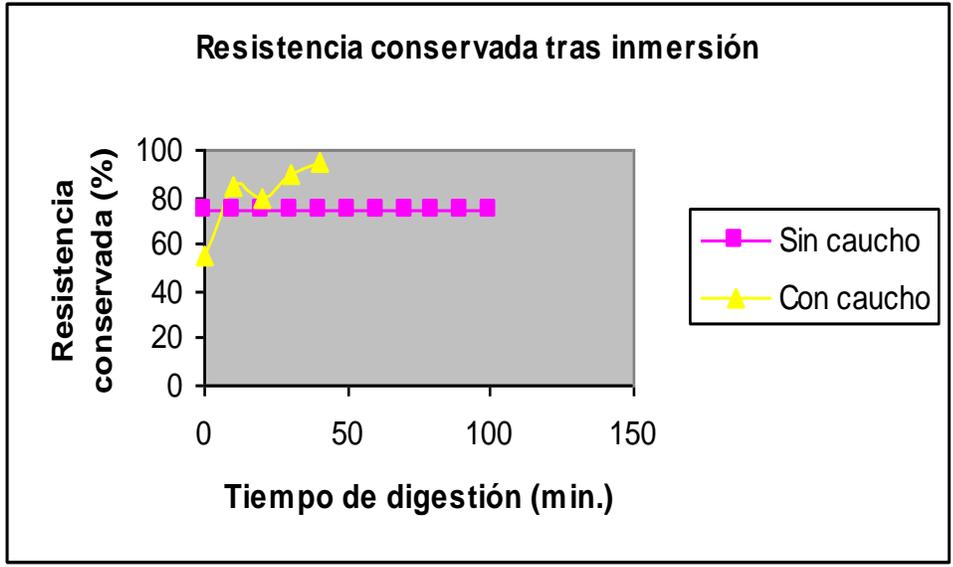


- |                         |                       |                                     |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| 1--- Betún Caucho       | 2--- Betún 60/70 + 0% | 3--- Betún 60/70 + 1%               |
| 4--- Betún 60/70 + 1.5% | 5--- Betún 60/70 + 2% | 6--- Betún 60/70 + 1.5%<br>+2 horas |

En realidad, esta disminución en la resistencia a compresión y muy especialmente después de inmersión en agua, no coincidía con los resultados que se lograron en los tramos experimentales donde los valores que se alcanzaban eran inclusive superiores a los de la mezcla patrón. Este hecho llevó a pensar que la mezcla a escala industrial tenía algo diferente a las de laboratorio. En efecto, se comprobó que el hecho diferencial era el tiempo de contacto entre el polvo de goma, el betún y el árido a temperatura de unos 150°C, que a lo largo del proceso de transporte y extendido alcanzó las dos horas.

Para verificar este hecho se realizaron en laboratorio ensayos de inmersión-compresión, variando el período de tiempo que se mantiene la mezcla en estufa tras su mezclado y antes de su compactación. A este tiempo se le ha llamado **”tiempo de digestión”** y se busca representar el tiempo que transcurre desde que la mezcla asfáltica sale de una planta de fabricación ( a elevada temperatura) hasta que se deposita en la tolva de la máquina entendedora ( momento en el que la pérdida de temperatura es más intensa), e inclusive el tiempo que permanece en la máquina hasta su extendido sobre el pavimento. Se han llevado a ensayo tiempos de digestión de 0, 60, 120 y 240 minutos. En cualquier caso, la temperatura de fabricación fue de 165°C y la de digestión en estufa de 150°C.

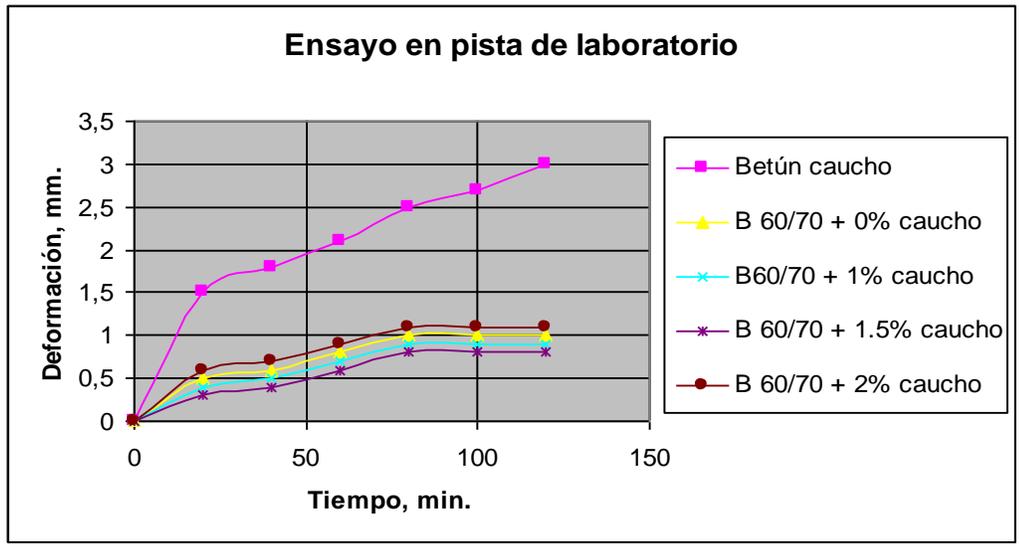
Quedó demostrado tal y como se muestra en el gráfico, el efecto que sobre la mezcla produce el tiempo de digestión ya que durante el mismo parte de la goma deja de actuar como un árido elástico, pasando a incorporarse al betún modificándolo parcialmente.



### Deformación plástica

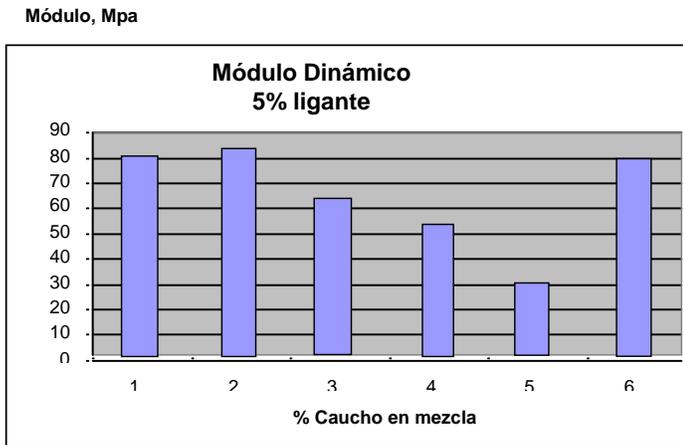
El comportamiento de las mezclas con caucho, sumado tanto por vía seca como por húmeda, a las deformaciones plásticas es bastante bueno, obteniéndose velocidades de deformación, en el intervalo de 105-120 min., del orden:

Betún caucho.....	2.0	$\mu\text{m}/\text{min}$
Betún 60/70 + 0% caucho.....	9.7	$\mu\text{m}/\text{min}$
60/70 + 1% caucho.....	2.7	$\mu\text{m}/\text{min}$
60/70 + 1.5% caucho.....	1.3	$\mu\text{m}/\text{min}$
60/70 + 2% caucho.....	1.1	$\mu\text{m}/\text{min}$



## Módulo dinámico

El módulo dinámico que se logra con el betún caucho es parecido al de las mezclas con betún convencional. Mediante la adición de goma desciende de manera notable, salvo que se someta al ya descrito proceso de digestión en cuyo caso los módulos se aproximen a los de la mezcla convencional.



1--- Betún Caucho

2--- Betún 60/70 + 0%

3--- Betún 60/70 + 1%

4--- Betún 60/70 + 1.5%

5--- Betún 60/70 + 2%

6--- Betún 60/70 + 1.5%  
+2 horas

## Fatiga

Las leyes de fatiga de estas mezclas las hemos representado mediante una recta, en escala doblemente logarítmica, de fórmula:

$$\text{Log } \varepsilon = A + B \text{ Log } N$$

Donde:

$\varepsilon$  =  $\frac{1}{2}$  de la amplitud cíclica de la deformación en el ciclo 200 del ensayo.

A = La sollicitación para que se produzca la rotura en el primer ciclo.

B = La pendiente de la recta.

N = Número total de ciclos aplicados.

Los resultados que se obtienen:



## **Capacidad de consumo de NFU en carreteras.**

### **A) Vía húmeda**

En España el consumo de betún anual se cifra en 1.200.000 Tn/año. Sabemos que no todo el betún se puede modificar con triturado de NFU, ya que no se precisan pavimentos de las calidades que se obtienen en todas las carreteras de nuestro país.

Si que se produce el hecho de que todo ese betún; unas 100.000 Tn. Se modifican con polímero, tal y como antes se ha comentado, y por lo tanto es también acertado el pensar que la mitad, esto es, 50.000 Tn., se podrían modificar con NFU, para lograr un producto de características similares a un coste parecido o inclusive más bajo, evitando con esto el consumo de cauchos vírgenes tipo SBS o EVA.

Si consideramos que el porcentaje que se viene empleando sobre betún varía entre 10-20% s/betún, estamos hablando de reutilizar entre 5-10 mil Tn. a través de este método.

### **B) Vía seca**

Por este camino hemos corroborado que en las condiciones adecuadas de fabricación y porcentaje de uso, las ventajas técnicas que se llegan a alcanzar no son tan sobresalientes como en el primer caso, puesto que unas características mejoran de forma notable como puede ser el caso de las deformaciones plásticas y otras quedan sin modificaciones tan evidentes, pero eso si, en ningún caso el proceso va en detrimento de la calidad final del pavimento.

En este caso, el triturado no sustituye a un polímero de elevado coste, sino a un árido de coste muy bajo, es por ello que esta vía encarece el sistema respecto al tradicional en un 15-20%. Se necesita por ello, apelar para su viabilidad a las mejoras técnicas que se logren y a la solución medioambiental que conseguimos.

La suma de mezclas asfálticas que anualmente se producen en nuestro país, suele estar en torno a los 20-25 millones de toneladas. Del mismo modo que en la vía húmeda, sería utópico pensar en meter en todas polvo de neumático, aunque técnicamente es viable. Debido a que el porcentaje que en mezcla se adiciona de NFU triturado, oscila de un 1-3%, s/árido, estaríamos hablando de un consumo anual medio de polvo de neumático de 400.000 Tn.

Otro factor a tener en cuenta, es el pensar que en capas de rodadura se emplean alrededor del 50% del total de mezclas; por lo tanto, si solo lo empleáramos en estas capas podríamos dar solución a 20.000 Tn., pudiendo así continuar haciendo cuantas aproximaciones quisiéramos.

No se pretende con todo esto, minimizar otras alternativas, todo lo contrario, poner de manifiesto que la carretera es capaz de solucionar o por lo menos, contribuir a la solución medioambiental de los NFU.

## Conclusiones

De los estudios y experiencias llevadas a cabo, podemos decir:

1. Que es viable eliminar una parte importante de los neumáticos que se desechan empleándolos en carreteras.
2. Que esta eliminación se puede realizar sin más inversiones que las que sean precisas para la trituración de neumáticos existiendo ya una estructura importante en España.
3. Que tanto la vía húmeda como la seca, pueden aportar ventajas de consideración importantes a la carretera desde el punto de vista técnico.
4. Que ambas vías suponen también ahorro de materias primas en origen, ya que polímeros y agregados quedan, al menos parcialmente, sustituidos por los triturados de caucho.
5. Que la eliminación a través de la carretera no tiene ningún riesgo posible de contaminación, siendo sin duda un proceso ecológico.
6. Es preciso frente a la problemática expuesta dedicar recursos a I+D+I, de forma inmediata, para optimizar procesos tanto desde el punto de vista técnico como económico, tales como:
  - Redacción de normativa y recomendaciones de uso.
  - Seguimiento más exhaustivo de obras.
  - Estudios de envejecimiento acelerado.
  - Influencia de su empleo en la producción de ruido.
  - Influencia de su empleo en la formación de placas de hielo.
  - Etc.

Debido a todo ello, el camino a seguir para los neumáticos de la **“cuna a la sepultura”** no debe ser más corto y definido. Nacen para la carretera y en ella mueren. La superficie sobre la que el neumático envejece tendrá en su interior los neumáticos anteriormente usados.

### 3.3.- PRODUCTOS BITUMINOSOS

Son conocidos desde hace más de 5.000 años pero es actualmente cuando se ha logrado un mayor grado de desarrollo tanto en la tecnología de obtención como en el tratamiento y aplicación de estos productos, procedentes de la descomposición de materia orgánica fosilizada.

Comúnmente se les denomina **ligantes hidrocarbonados**, conteniendo a todos los materiales aglomerantes formados por mezclas complejas de hidrocarburos. Se verán los de mayor empleo en carreteras como son los **betunes asfálticos** junto con sus derivados, y en menor grado los **asfaltos naturales** y los **alquitranes**, ya que poseen peores características en cuanto al uso en firmes de carreteras.

Se dan tres caracteres que cumplen los ligantes bituminosos, son:

1. **Aspecto bituminoso** y color oscuro.
2. Comportamiento **termoplástico**; esto es, varía su viscosidad en función de la temperatura.
3. **Buena adhesividad** con los áridos.

Con el objetivo de poder clasificar y caracterizar las propiedades de este grupo de compuestos que forman parte en la composición de mezclas asfálticas, riegos, estabilizaciones y tratamientos superficiales, precisamos de procedimientos normalizados de ensayo que expliquen sus características físicas, su manejo y puesta en obra y su comportamiento general en el contexto del firme.

#### 3.3.1. Betunes asfálticos

Se definen los **betunes asfálticos** o **de destilación** como aquellos productos bituminosos ya sean sólidos o viscosos, naturales u obtenidos a partir de hidrocarburos naturales por destilación, oxidación o *cracking*, contienen además un pequeño porcentaje de productos volátiles, poseen caracteres aglomerantes y son esencialmente solubles en sulfuro de carbono.

Comúnmente decimos que los betunes asfálticos son productos derivados del petróleo, son de aspecto viscoso y oscuro, con caracteres aglomerantes y propiedades termoplásticas, motivos que le confieren una buena aplicación en firmes de carreteras. Se da el caso del ensayo de penetración que vale para caracterizarlos y clasificarlos, por lo que se les llama también **betunes de penetración**.

En lo referente a los **asfaltos** propiamente dichos, son materiales formados por una mezcla de betunes e impurezas solubles en sulfuro de carbono (C<sub>2</sub>S), estando en una proporción superior al 5%.

Existe la diferencia respecto a la nomenclatura americana que no hace la diferenciación entre betunes y asfaltos, considerándolos ambos mediante la denominación: **tar**.

## Procedencia y obtención

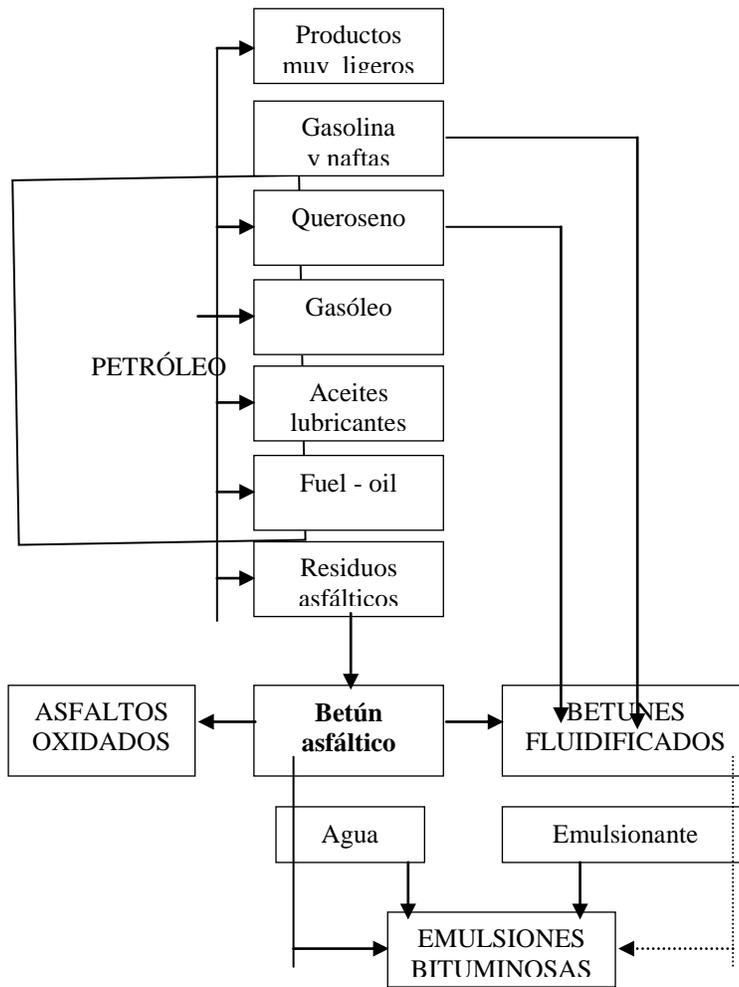
Se clasifican en dos fuentes de obtención los betunes aptos para su utilización en carreteras; estas son:

- Betunes naturales: Su fuente es la descomposición de organismos marinos, aflorando a la superficie en lagos de asfalto o bien impregnados en las rocas. Un buen ejemplo es el **asfalto de Trinidad**, que se extrae de un gran lago de asfalto existente en la isla que lleva el mismo nombre. Este lago tiene más de un 50% de betún natural que se caracteriza por tener muy buenas propiedades plásticas, resistentes e impermeabilizantes, pudiendo utilizarse en la pavimentación de vías.
  
- Betunes artificiales: En este caso la obtención es como subproductos del **petróleo**, una mezcla de hidrocarburos con impurezas. En función pues de la naturaleza de dicho petróleo, se tendrán betunes en mayor o menor grado aptos para su uso en carreteras. Así, tenemos los crudos de base parafínica (formados por hidrocarburos saturados) precisan de un proceso de oxidación parcial para su refino; en cambio, están los de base nafténica (insaturados) son perfectos para la formación de betunes asfálticos.

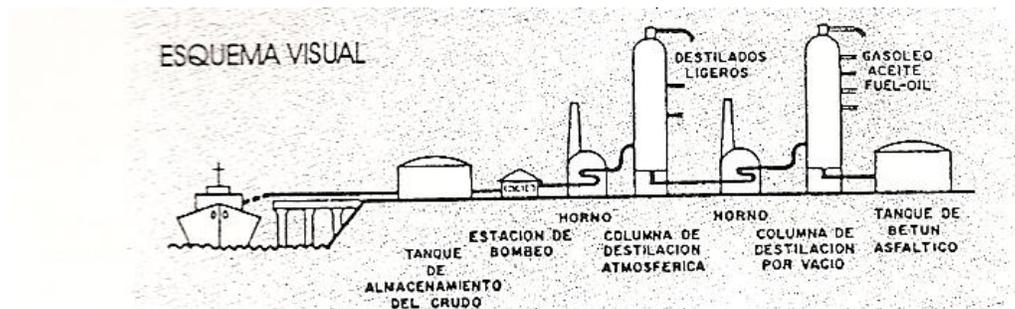
En lo referente a la **obtención** de los betunes asfálticos a partir de crudos del petróleo que se efectúa en las refinerías y que se emplea para ello diferentes técnicas y procesos industriales:

- ◆ Destilación: El fenómeno consiste en la separación de los diferentes componentes del petróleo en base a su volatilidad. Veamos mediante un esquema gráfico este proceso continuo de fraccionamiento

Proceso de destilación de los productos bituminosos



El proceso de recorrer industrialmente el crudo desde su extracción hasta la formación del betún asfáltico comprende los siguientes pasos:



- ◆ Oxidación: En este método para la obtención de los betunes asfálticos, se aplica un complicado proceso químico de oxidación a partir de los residuos más pesados de los propios crudos del petróleo, que no tenían suficiente cantidad de compuestos asfálticos.
- ◆ Cracking: En este caso, el proceso químico a emplear consiste en romper físicamente los enlaces de grandes cadenas de hidrocarburos saturados, llamadas polímeros, llegando a los betunes.

### Naturaleza y composición

El denominado betún está formado por una mezcla de hidrocarburos cíclicos saturados derivados de los ciclanos (cicloparafinas). Presentan la característica de una estructura anular con un alto número de átomos de carbono. La composición química dada en peso centesimal es:

#### Composición química de los betunes

<b><i>ELEMENTOS MAYORITARIOS</i></b>	
<b>Carbono</b>	<b>80-88%</b>
<b>Hidrógeno</b>	<b>9-12%</b>
<b><i>ELEMENTOS MINORITARIOS</i></b>	
<b>Oxígeno</b>	<b>0-5%</b>
<b>Azufre</b>	<b>0-3%</b>
<b>Nitrógeno</b>	<b>0-2%</b>

### Propiedades

Debido a la presencia de unas u otras características según sea el punto de vista que se trate; diremos que en líneas generales, todos los betunes presentan una serie de características físicas comunes, como son su color oscuro, la facultad de tener **buena adhesividad** con la superficie de las partículas minerales o bien su inmiscibilidad con el agua.

Fijándonos en el comportamiento mecánico, destacamos que resulta muy complejo y que depende de distintos factores, siendo tales, la sollicitación aplicada, el tiempo durante el que ésta actúa o la temperatura ambiente. Se recoge la explicación de este comportamiento bajo el punto de vista global de la **reología**.

En cuanto a las características que resaltamos desde el punto de vista de la construcción de carreteras y que nos interesan:

Adhesividad: Es la propiedad que presenta el betún para adherirse a la superficie de una partícula mineral. La importancia la debe a que en mezclas asfálticas el betún junto con

los áridos deben formar un conjunto homogéneo y continuo, pudiendo mejorarla a través de la aplicación de **activantes**

Viscosidad: Esta característica consiste en la resistencia que oponen las partículas a disgregarse, ya que se producen rozamientos internos en el seno del fluido. La viscosidad de los betunes varía en función de la temperatura, tiene pues, mucha susceptibilidad térmica.

Susceptibilidad térmica: Tal y como se ha indicado anteriormente, este fenómeno indica la propensión que tiene el betún a cambiar ciertas propiedades reológicas (la viscosidad vista, entre otras) con la temperatura. Gracias a esta característica se puede trabajar a altas temperaturas con ellos, teniendo una mayor estabilidad a temperatura ambiente.

Plasticidad: Es el comportamiento mecánico que presenta el betún frente a distintos estados físicos y temporales de carga. Por ejemplo, un betún que sea poco plástico no aguantará deformaciones excesivas sin que se produzcan o bien grietas o bien desconchamientos.

Envejecimiento: Se provoca cuando la acción oxidante del aire y la presencia de humedad y radiaciones solares, hacen que el betún se degrade y se transformen químicamente sus componentes, perdiendo consecuentemente las propiedades reológicas y adhesivas.

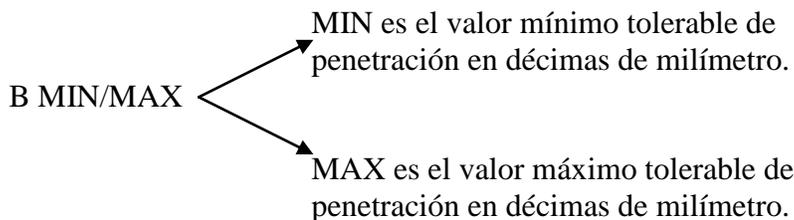
Con lo tratado anteriormente, se pueden establecer las características que debería presentar el **ligante ideal**:

1. En la puesta en obra será **fluido** para que se pueda trabajar y penetre en profundidad, recubriendo la superficie de los áridos y confiriéndoles adherencia. Con tal fin, se calienta a elevadas temperaturas, sin que llegue a inflamarse.
2. Deberá ser lo suficientemente **consistente** y **viscoso** a temperaturas ambientes altas, aunque suene un poco paradójico; ya que de lo contrario el firme sería muy deformable bajo la acción continuada de las cargas de tráfico, teniendo en su seno, fenómenos de fluencia.
3. Su comportamiento a bajas temperaturas tiene que ser **flexible**, con lo que se evita que el pavimento no se vuelva frágil y quebradizo.
4. Hay que tener presente también que la película de ligante será de un **espesor** suficiente para que el proceso de envejecimiento le afecte lo menos posible.

### 3.3.2.- Tipología y nomenclatura

El motivo por el que los betunes asfálticos son llamados también **betunes de penetración**, comentado con anterioridad, es debido a que es el ensayo de penetración el que los clasifica de una manera primaria y establece su nomenclatura. Este ensayo consiste en la introducción de una aguja tarada y calibrada en una muestra de betún que se encuentra a una temperatura constante de 25°C. Se mide la profundidad a la que llega a penetrar dicha aguja.

La normativa española (PG-4) establece la **nomenclatura** que se cita a continuación, para betunes asfálticos (betunes de penetración) considerando claro está, el explicado ensayo:



En cuanto a B, es la sigla que caracteriza a los betunes de penetración.

Se tienen seis tipos de betunes reconocidos por las especificaciones españolas, y que son:

B 20/30, B 40/50, B 60/70, B 80/100, B 150/200, B 200/300

Los betunes de penetración, además, los clasificaremos en función de la dureza que presenten en :

1. **Blandos:** Presentan como es lógico, valores de penetración altos, por lo que no son muy adecuados para zonas cálidas, puesto que serán muy susceptibles de perder consistencia a temperaturas relativamente altas. Su aplicación la encontraremos entonces en zona que sean frías, al no volverse rígidos y quebradizos.

Incluimos en este grupo a los betunes B 80/100, B 150/200, B 200/300.

2. **Duros:** Claro está que son más consistentes, esto es, rígidos y viscosos a altas temperaturas, por lo que al revés que los anteriores, se aplicarán en zonas cálidas. Por el contrario, en climas fríos tendrán un peor comportamiento.

Pertenecen a este grupo los betunes de los tipos B 20/30, B 30/50 y B60/70.

Destacamos que para definir un betún precisamos de otros ensayos además del tratado, de los que se obtendrán diferentes aspectos específicos del betún relativos a su comportamiento mecánico y puesta en obra.

## Aditivos utilizados

Se dan distintos tipos ya que se buscan mejoras en diferentes propiedades de la mezcla; los de mayor aplicación son los **polímeros**, que a su vez se dividen por una parte en plastómeros y por otra en elastómeros termoplásticos. Existen también fibras naturales, asfaltos, caucho, azufre, etcétera.

Cabe destacar que se ha producido una gran evolución desde las primeras aplicaciones de aditivos en firmes (como acabamos de ver) de las que se tiene conocimiento y que se efectuaban con látex.

Se puede llegar a pensar en si existe compensación o no en la aplicación de polímeros, ya que se aumenta el coste inicial del ligante, pudiéndose alcanzar hasta el doble de valor que cualquier otro convencional; pero se descarta de inmediato esta idea ya que el elevado coste queda con creces compensado a lo largo de la vida útil de la carretera, dado que este tipo de ligantes minimiza las operaciones de mantenimiento, **alargando la vida de servicio** del pavimento.

Existe otra ventaja añadida a lo anterior, y es que con la inclusión de estos polímeros se aplican capas de **menores espesores** que las convencionales obteniendo unas prestaciones muy parecidas, además de una reducción en los costes.

## Tipología y nomenclatura

Siguiendo la normativa reguladora de los compuestos bituminosos modificados (recogida en los Artículos 215 y 216 del PG-4) distingue dos grupos; los **betunes modificados** y las **emulsiones modificadas**.

Profundizando en cada uno de los grupos, vemos que en los **betunes modificados**, diferenciamos siete tipos en función de su penetración y su dosificación. Cuantificamos el grado de dureza del betún con un número del uno al cinco, siendo más blando cuanto mayor es este coeficiente. Los betunes mencionados y su índice de penetración son los siguientes, designados todos con las iniciales BM:

BM-1 (15/30), BM-2 (35/50), BM-3a, BM-3b y BM-3c (55/70),  
BM-4 (80/130), BM-5 (1550/200)

Los betunes de mayor dureza (BM-1 y BM-2) se emplean en refuerzos y capas resistentes a las roderas; todos los del tipo 3 son los que más se utilizan, principalmente en firmes drenantes y capas resistentes a la fatiga. En cuanto a los BM-4 y BM-5, los encontramos en tratamientos superficiales y antifisuras.

Por su parte, las **emulsiones modificadas**, distinguen seis tipos denominadas igualmente que las anteriores, con la adición del sufijo “m” que indica que están modificadas con polímeros; estas son:

ECR-1m, ECR-2m, ECR-3m, ECM-m, EAM-1m, ECL-2m

El empleo de estas emulsiones se realiza en riegos de adherencia y tratamientos superficiales las ECR, para mezclas bituminosas en frío EAM, ECM y lechadas en frío y microaglomerantes las ECL. Existe otra aplicación que consiste en la adición con los geotextiles para confeccionar membranas antifisuras, llamadas SAMI.

### **Betunes sintéticos**

El objetivo perseguido es la consecución de aglomerados asfálticos **coloreados**. Hasta la fecha no ha sido posible, puesto que la elevada proporción de asfaltenos impedía su pigmentación, inclusive con altas proporciones de colorante.

Estamos por lo tanto, ante la eliminación de los asfaltenos, con lo que al estar en lámina delgada, estos betunes tienen un aspecto transparente, pudiéndose por lo tanto, aplicar cualquier tipo de pigmentación. No hay que dejar de lado el hecho de que las propiedades mecánicas y reológicas se mantienen muy parecidas a las observadas en los betunes de penetración convencionales que presentan la misma penetración.

Este tipo de pavimentos han sido anelados desde siempre por los ingenieros de carreteras; introducidos en España en 1991 procedentes de Francia, fueron ampliamente empleados en la confección de pavimentos para viales zonas de estacionamiento en Barcelona y Sevilla por los juegos olímpicos y la Exposición Universal respectivamente.

### **3.3.3.- Ensayos aplicables a ligantes.**

La finalidad es **identificar** el producto, **clasificándolo** en uno de los diversos tipos definidos por la normativa española, **comprobando** que satisfacen las especificaciones fijadas por la misma. Los procedimientos de ensayo para betunes asfálticos y residuales (en los fluidificados y las emulsiones) pueden agruparse en tres tipologías diferenciadas, en función de los caracteres del producto a caracterizar:

1. Ensayos relacionados con las características del producto.

Calculan diferentes caracteres físicos del ligante, como pueden ser el peso específico, solubilidad, contenido en cenizas o grado de humedad.

2. Ensayos relacionados con su uso y puesta en obra.

En este caso, se trata de caracterizar factores que otorgan un seguro y correcto manejo en obra; citamos los ensayos de puntos de inflamación y combustión o el de pérdida de volátiles por calentamiento.

3. Ensayos relacionados con el comportamiento mecánico y reológico en el firme.

Las caracterizaciones se centrarán en las propiedades que influyen en la reología del ligante una vez puesto en obra, como son la penetración, la viscosidad, el punto de reblandecimiento, ductilidad y fragilidad.

Además de estos ensayos que vienen a ser genéricos, se cuenta con otros específicamente diseñados para **betunes fluidificados** y **emulsiones bituminosas**, cuya labor es la de caracterizar diversas fases del sistema coloidal formado por la dispersión del betún en un medio aceitoso o acuoso.

Todos estos ensayos mencionados, se hayan regulados por las normas NLT del Laboratorio de Transporte y Mecánica del Suelo del CEDES, pero debido a la entrada de España en la Unión Europea, estas normas, vienen siendo restituidas progresivamente por la normativa EN del Comité Europeo de Normalización.

### 3.3.4.- Ensayos relativos al manejo del ligante bituminoso en el firme

Estos ensayos, se centran en determinar las propiedades reológicas y mecánicas del producto en cuestión en el momento en el que el firme (del que forma parte) ya ha entrado en funcionamiento. Distintos ensayos valen también para tipificar los diferentes productos catalogados por la normativa española; ahondando en ellos:

- Penetración (NLT-124): Con el, se calcula la penetración de un betún asfáltico, estableciendo la tipología. Para esto, empleamos el **penetrómetro**, que consiste en un aparato formado por una aguja de dimensiones normalizadas tarada con una masa de 100g. El procedimiento es: Dejamos caer la aguja libremente (sin ejercer fuerza alguna sobre ella) durante 5 segundos sobre la muestra a ensayar, indicando en una regla graduada la penetración de dicha aguja en décimas de milímetro.

Según la penetración que se obtiene de diversos betunes, se clasifican en dos grandes grupos: blandos y duros; vistos ambos con anterioridad.

- Viscosidad: Esta propiedad es de suma importancia desde el punto de vista de su comportamiento tanto en las capas del firme como en la puesta en obra. En el caso de los ligantes hidrocarbonados, esta propiedad tiene una relación directa con la **temperatura**, con lo que su determinación a diferentes temperaturas otorga la **susceptibilidad térmica** de estos productos.

Normalmente, la viscosidad a calcular es la **viscosidad relativa Saybolt** (NLT-133 y NLT-138) utilizando para ello los viscosímetros del tipo Saybolt (Furol o Universal), proceso que se basa en el cálculo del **tiempo** que emplea en salir de dicho recipiente un volumen concreto de muestra a temperatura controlada; así pues, a mayor tiempo mayor viscosidad.

En el caso de los alquitranes en cambio, se usa el sistema EVT o llamado también de **equiviscosidad** (NLLT-188), aquí, fijaremos el tiempo de ensayo en 50 segundos y determinando la temperatura a la que fluye el producto en este tiempo. Con el valor ya calculado, se emplea en la clasificación de los distintos tipos de alquitranes.

- Punto de reblandecimiento (NLT-125): Conocido por el sobrenombre de “**anillo y bola**”, debido a los utensilios empleados en su desarrollo, este ensayo se realiza del siguiente modo: llenamos dos probetas de material bituminoso en forma de disco para ser colocadas horizontalmente dentro de un anillo metálico. Colocamos el conjunto en un baño de agua y glicerina y calentamos mediante mechero bunsen u otro tipo de fuente de calor a velocidad controlada hasta que se alcance una temperatura que obligue a deformarse a la muestra por el peso de una pequeña bola de acero colocada en el centro hasta tocar la superficie de una placa referencia colocada a 25.4 mm. (1”) por debajo del anillo, todo esto dentro del mencionado baño.

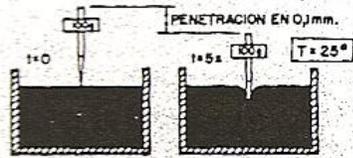
Cabe destacar que el resultado obtenido se considera a modo de valor orientativo, puesto que la consistencia del betún es susceptible a los factores como pueden ser temperatura o estado tensional al que se halle sometido el producto bituminoso.

- Ductilidad (NLT-126): Se centra en el alargamiento en centímetros que provoca la rotura de una probeta en controladas condiciones de temperatura (25°C) y velocidad de deformación (5 cm/min), esto es, la ductilidad. Tiene una relación directa con la **impermeabilidad** de un determinado firme, puesto que la formación de grietas conduce a filtraciones del agua a capas inferiores.

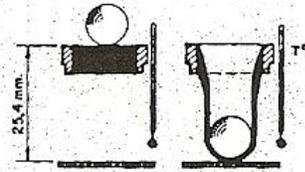
Este tipo de medición es relativo ya que hay betunes de igual penetración pero de distinto origen, con lo que presentan valores distintos, pero si deben de presentar todos la suficiente ductilidad para aguantar las deformaciones formadas por los cambios térmicos o por las sollicitaciones exigidas por el tráfico.

- Punto de fragilidad (NLT-182): Consiste en una lámina bituminosa sometida a unas determinadas condiciones de flexión y temperatura, mide esta última en el momento en el que comienza a agrietarse. Cabe destacar que este procedimiento no suele utilizarse en betunes convencionales, pero si es valedero para identificar y controlar los ligantes modificados, así como otros productos especiales de importancia en obras de distintas consideraciones.

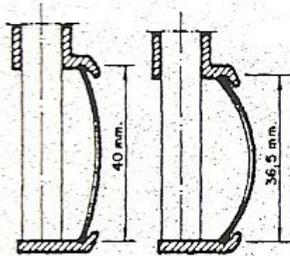
Ensayos relativos al comportamiento de los ligantes



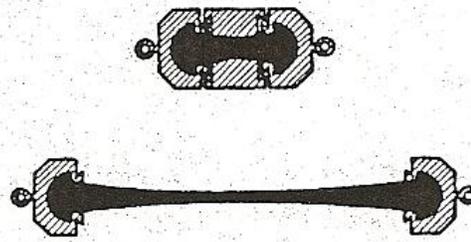
ENSAYO DE PENETRACIÓN



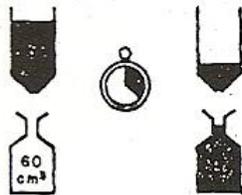
ENSAYO DE ANILLO Y BOLA



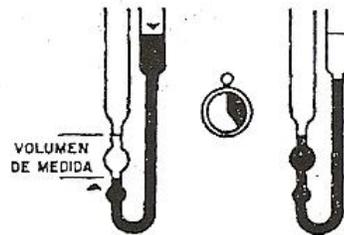
ENSAYO DE PUNTO DE FRAGILIDAD



ENSAYO DE DUCTILIDAD



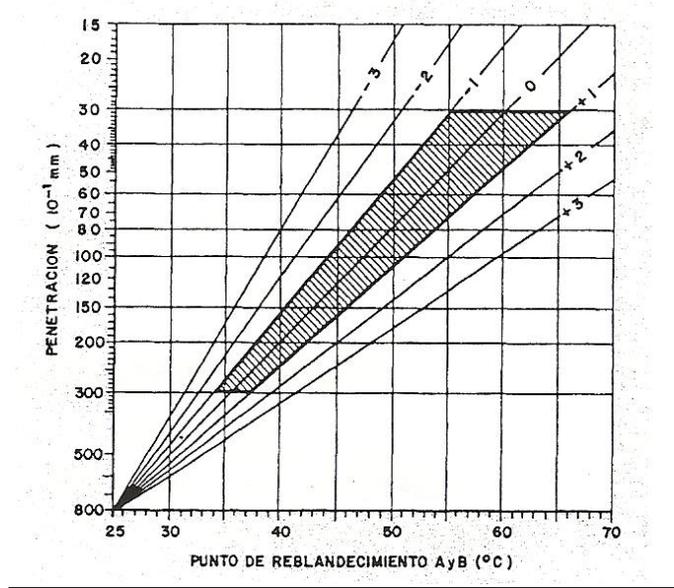
ENSAYO DE VISCOSIDAD



VISCOSÍMETRO CAPILAR

Teniendo los valores de penetración a 25°C y el punto de reblandecimiento (anillo y bola) podemos calcular el **índice de penetración** de un betún, con lo que sacamos ya una idea del tipo y las características reológicas del mismo. Así pues, los betunes normales empleados en firmes de carreteras deben tener índices de penetración entre -1 y +1, los materiales de gran susceptibilidad térmica presentan valores inferiores y los betunes modificados con polímeros, (BMP) superiores.

**Ábaco empleado en el cálculo del índice de penetración**



**3.3.5.- Especificaciones del PG-4**

Con los resultados obtenidos por los ensayos anteriormente vistos, el PG-4 establece las especificaciones que deben de cumplir los distintos productos bituminosos, que se reflejan en las siguientes tablas:

**Especificaciones de los productos bituminosos**

CARACTERÍSTICAS			TIPOS									
PROPIEDAD	Ud	NLT	AQ-38		AQ-46		BQ-30		BQ-58		BQ-62	
			Min	Máx	Min	Max	Min	Max	Min	Máx	Min	Max
EQUIVISCOSIDAD	°C	188	38 ± 1,5		46 ± 1,5		30 ± 1,5		58 ± 1,5		62 ± 1,5	
DENSIDAD RELATIVA	-	122	1,10	1,25	1,11	1,25	1,10	1,24	1,13	1,27	1,13	1,27
CONTENIDO EN AGUA	%	123	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5
INDICE DE ESPUMA	-	193	-	8	-	8	-	8	-	8	-	8
DESTILACIÓN (en masa)	%	189										
1. Hasta 200°C			-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5
2. De 200 a 270°C			3	10	2	7	4	11	-	3	-	2
3. De 270 a 300°C			4	9	2	7	4	9	1	6	1	5
4. Mas grados C			-	16	-	12	-	16	-	8	-	7
REBLANDECIMIENTO	°C	125	35	53	35	55	35	46	-	56	-	56
FENOLES (en volumen)	%	190	-	3	-	2,5	-	3	-	2	-	2
NAFTALINA (en masa)	%	191	-	4	-	3	-	4	-	2,5	-	2,5
SOLUBILIDAD TOLUENO	%	192	-	24	-	2,5	-	23	-	28	-	28

**Especificaciones de betunes**

CARACTERÍSTICAS		Ud	NLT	BETUNES DE PENETRACIÓN												
				B 20/30		B 40/50		B 60/70		B 80/100		B 150/200		B 200/300		
PROPIEDAD				Min	Máx	Min	Max	Min	Max	Min	Máx	Min	Max	Min	Max	
<b>BETÚN ORIGINAL</b>																
Penetración	mm	124	20	30	40	50	60	70	80	100	150	200	200	300		
Índice penetración	°C	181	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
Punto reblandecimiento	°C	125	57	69	52	61	48	57	45	53	38	45	34	41		
Fragilidad Fraass	°C	182		0		-4		-8		-10		-15		-20		
Ductilidad	cm	126														
A 25°C				50		70		90		100		100				
A 15°C															100	
Solubilidad tricloroetano	%	130		99.5		99.5		99.5		99.5		99.5		99.5		
Contenido en agua (vol)	%	123		0.2		0.2		0.2		0.2		0.2		0.2		
Punto de inflamación	°C	127		235		235		235		235		220		175		
Densidad relativa 25°C		122		1.00		1.00		1.00		1.00		1.00		0.99		
<b>RESIDUO</b>																
Variación de masa	%	185		0.5		0.8		0.8		1.0		1.4		1.5		
Penetración respecto B.O.	°C	124		60		55		50		45		40		35		
Variación P. Reblandec.	°C	125		7		8		9		10		11		12		
Ductilidad	cm	126														
A 25°C				35		40		50		75		100				
A 15°C															100	

**Especificaciones de betunes modificados**

CARACTERÍSTICAS		Ud	NLT	BETUNES MODIFICADOS												
				BM-1		BM-2		BM-3a		BM-3b		BM-3c		BM-4		BM-5
PROPIEDAD			Min	Máx	Min	Max	Min	Max	Min	Máx	Min	Max	Min	Max	Min	Max
<b>BETÚN ORIGINAL</b>																
Penetración	Mm	124	15	30	35	50	55	70	55	70	55	70	80	130	150	200
Punto reblandecimiento	°C	125	70		65		58		60		65		60		55	
Fragilidad Fraass	°C	182		-4		-8		-10		-12		-15		-15		-20
Ductilidad	Cm	126														
A 5°C					2		4		25		30		40		50	
A 25°C			10													
Estabilidad	S	183	3000		2000		700		1200		2000		1200		1200	
Estabilidad almacenaje		328														
Dif. Punto Rebland.	°C	125		5		5		5		5		5		5		5
Dif. Penetración	°C	124		5		8		10		10		10		12		20
Recuperación elástica	%	329														
A 25°C					10		15		40		70		60		60	
A 40°C			15													
Contenido en agua	%	123		0.2		0.2		0.2		0.2		0.2		0.2		0.2
Punto de inflamación	°C	127	235		235		235		235		235		220		200	
Densidad relativa		122	1.0		1.0		1.0		1.0		1.0		1.0		1.0	
<b>RESIDUO</b>																
Variación de masa	%	185		0.8		0.8		1.0		1.0		1.0		1.4		1.5
Penetración r / B.O.	%	124	70		70		65		65		65		60		55	
Var. Punto. Rebland.º	°C	125	-4	+8	-4	+8	-5	+10	-5	+10	-5	+10	-6	+10	-6	+10
Ductilidad	Cm	126														
A 5°C						1	2		12		15		20		25	
A 25°C				5												

## **4.- MATERIAS PRIMAS**

### **4.1.- APLICACIONES EN MATERIALES BITUMINOSOS**

La estrategia que se ha marcado en la Ley de Residuos, que responde consecuentemente con las necesidades de desarrollo sostenible, es la reducción de los residuos en origen, reutilizar y reciclar todo lo que sea factible y únicamente eliminar, por incineración o vertido, lo que no pueda ser tratado por otra vía.

En el caso concreto de los neumáticos fuera de uso, y en lo que se refiere a España, en el año 2003 se reciclaron 25.000 Tn. de neumáticos, lo que representa el 8% de las 300.000 Tn de residuo generadas, cifra que está lejos del 25% previsto en los objetivos del Plan de Neumáticos

Una solución medioambiental que se aplica en otros países y que en España está apenas desarrollada es la de la carretera, que supone un gran mercado potencial, capaz de consumir por sí solo todo el neumático que se recicle. La aplicación en carreteras tiene varias ventajas para el empleo del caucho reciclado: se están empleando ya productos elastoméricos a los que el caucho reciclado podría sustituir o complementar, puede utilizar grandes volúmenes en cada obra y la construcción de carreteras se da en todo el territorio nacional de manera que no precisa de grandes distancias de transporte.

Sumado a lo anterior, los técnicos de carreteras por su parte, han desarrollado procesos para el empleo de los neumáticos fuera de uso, en especial en productos bituminosos. Estas técnicas no se han generalizado todavía, puesto que los betunes modificados que hay en la actualidad en el mercado, responden razonablemente bien; la necesidad de consumir altas cantidades de neumáticos surge ahora y la disponibilidad de triturado de caucho novedosa; y sumado a todo lo anterior, no se debe olvidar que el proceso de comprobación técnica de productos para carreteras precisa de un cierto tiempo.

Por otro lado, la aparición de la normativa comunitaria sobre el vertido de neumáticos y la trasposición de plazos en el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso del Ministerio de Medio Ambiente ha llevado a que el reciclado de neumáticos sea ya una necesidad a la que hay que dar solución de forma urgente. Además, concretamente, en octubre de 2002 la Dirección General de Carreteras publicó la Orden Circular 5bis/2002 en la que se modificaban los apartados correspondientes de los artículos del PG-3 relativos a mezclas bituminosas y lechadas, de manera que se recogía el párrafo del Plan Nacional que decía “en las obras públicas en que su utilización sea técnica y económicamente viable se dará prioridad a los materiales procedentes del reciclaje de neumáticos”.

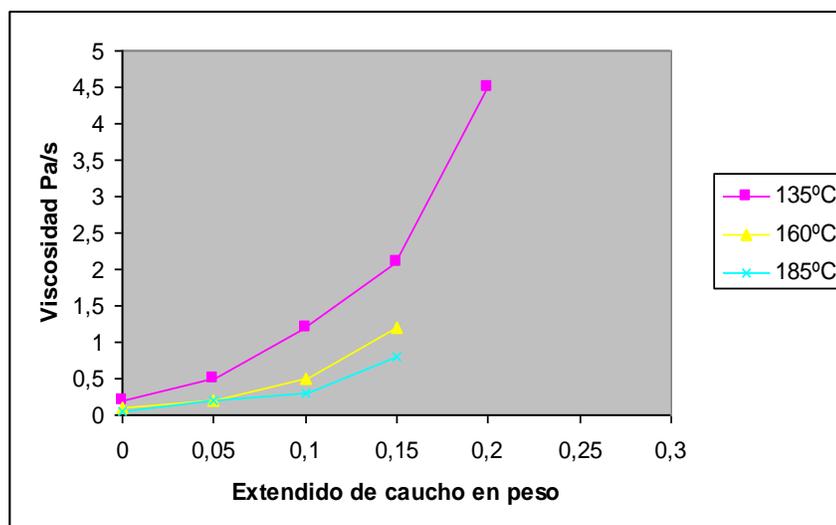
Existen por lo tanto, la necesidad de emplear neumáticos usados en las carreteras y la voluntad de hacerlo, lo que debe suponer un impulso para la aplicación. Se trata en este aspecto de contribuir a este impulso analizando y representando la situación actual del empleo de neumáticos fuera de uso en productos bituminosos, recogiendo tanto lo que se ha hecho en nuestro país como lo de otros países que poseen mayor experiencia, de forma que pueda servir de referencia para futuras aplicaciones.

Se estudia en definitiva, la utilización de polvo o árido fino procedente del triturado de neumáticos de desecho ( Caucho de Neumático Reciclado o CNR) en materiales para firmes de carretera, diferenciando entre dos técnicas(explicadas anteriormente): la llamada vía húmeda, en la que el neumático troceado se mezcla con el betún para obtener un ligante modificado, de aplicación en mezclas bituminosas, riegos o masillas de sellado, y la denominada vía seca en la que el CNR se aplica en mezclas bituminosas como un árido más.

#### 4.2.- APLICACIONES POR VÍA HÚMEDA

El método de introducir el caucho por vía húmeda se basa en la fabricación de un ligante modificado, generalmente denominado betún-caucho, por la adición de partículas de CNR a un betún convencional.

En el momento de añadir el CNR al betún caliente, las partículas de caucho se reblandecen pasando a absorber los componentes más ligeros del betún e hinchándose. Con este hinchamiento disminuye la distancia entre partículas y el ligante combinado se hace más viscoso, objetivo perseguido para algunas aplicaciones de los betunes. Este proceso de hinchamiento recibe el nombre de reacción o digestión tal y como hemos comentado. Se controla mediante la medida de la viscosidad del producto combinado. Un betún que ha sido modificado con el 15% de CNR puede aumentar su viscosidad en un factor de 10 ó más.



El producto resultante de la mezcla de betún y CNR depende del tiempo y temperatura de reacción. Las temperaturas altas provocan reacciones más rápidas y parece que mayores hinchamientos de las partículas. En cuanto a las temperaturas del betún en el momento de la mezcla varían entre 160 y 205°C.

Por otra parte, la mezcla de betún con CNR es inestable y para que el caucho no se segregue, la mezcla debe de estar en constante agitación; por todo ello un proceso usual de empleo del betún caucho ha sido fabricado *in situ* en el lugar de la obra con equipos especiales que se incorporan a la central de fabricación de mezclas bituminosas o que se trasladan al lugar de empleo del ligante para aplicaciones en tratamientos superficiales, de forma que el ligante se incorpora a la mezcla o se aplica en la carretera inmediatamente después de su fabricación sin dar tiempo para que se segregue.

Se ha trabajado no en vano, para estabilizar en cierto grado la mezcla y poderla almacenarla un período de tiempo o trasladarla desde una central de fabricación al lugar de empleo. Estos métodos y procesos, se basan en añadir estabilizantes (generalmente una cierta cantidad de SBS) y compatibilizantes (como son aceites entendedores en su mayoría). Estos betunes, se fabrican en instalaciones convencionales de betún modificado con equipos de alta cizalla. En España se han desarrollado ya varios de estos betunes que cumplen los requisitos exigidos en los pliegos de condiciones a los betunes modificados. Con el fin de lograr la estabilidad, el contenido de caucho debe ser menor que en los betunes fabricados *in situ*, de manera que si en estos se puede llegar a emplear hasta un 20% de caucho en el betún modificado, en los betunes estables es difícil superar el 10%. Debido a estos motivos, las prestaciones de ambos ligantes pueden ser distintas. No obstante, a favor del empleo de uno u otro se tienen las siguientes razones:

#### **Betunes estables:**

- No precisan del empleo de maquinaria adicional, que siempre perturba o afecta el desarrollo de las obras.
- Se facilita el control de calidad del producto.
- Tiene un campo de aplicación definido y normalizado (el de los betunes modificados convencionales).

#### **Betunes fabricados in situ:**

- Gracias a estos, se puede ampliar el campo de los ligantes modificados debido a su mayor viscosidad y resistencia al envejecimiento.
- Emplean mayores cantidades de residuo.
- Permiten visualizar que el caucho que se emplea es el que se quiere eliminar.
- Se pueden producir mayores economías que en los estables; debido a menores traslados de materias primas, y simplicidad de componentes.
- Una pega de relevancia, es que se precisa de obras de un determinado volumen para que sea rentable el traslado de la maquinaria.

### 4.3.- CARACTERÍSTICAS DE LOS BETUNES MODIFICADOS CON CNR

Los cambios más importantes que experimentan los betunes con la adición de CNR son:

- Se aumenta la viscosidad, con la consiguiente reducción de la penetración, y aumento de la temperatura de anillo y bola.
- Disminuye la susceptibilidad a la temperatura.
- Se mejoran las características a bajas temperaturas ( reducción de la temperatura Fraass).
- Mejora la resistencia al envejecimiento.
- Mejora también de las características elásticas (aumenta la recuperación elástica en relación con la de los ligantes convencionales).

En el cuadro que se muestra a continuación se ve un ejemplo de la adición de un 15% de caucho reciclado a un betún 60/70:

Características	Betún original	Betún-caucho
Penetración (25°C, 100g, 5s) (0,1 mm)	60	29
Punto de reblandecimiento Ay B (°C)	49	65
Ductilidad a 5°C(cm)	> 150 (a 25°C)	2.5
Recuperación elástica a 25°C (%)	0	23
Fragilidad Fraass (°C)	-10	-18

Se aprecian pues, mejoras que son parecidas a las que se consiguen con otros ligantes modificados, aunque hay que destacar estos factores:

A través de los betunes-caucho fabricados *in situ* se pueden lograr mayores viscosidades que con los betunes modificados convencionales, debido primordialmente a que la cantidad de adición al betún es mayor (3 a 10% en los modificados convencionales, 10 a 20% en el betún-caucho fabricado *in situ*). La mayor viscosidad ocasiona que, por ejemplo en mezclas bituminosas se pueda dosificar una mayor cantidad de ligante con betún-caucho que con otros ligantes modificados.

Estudios realizados señalan que la mejora de la resistencia al envejecimiento también es mayor, debido a los antioxidantes y al negro de carbón del caucho y posiblemente en su caso también por el contenido de azufre del vulcanizado de los neumáticos de camión.

El polvo de caucho, y en especial el caucho natural desvulcanizado, proporciona al betún-caucho una muy buena adhesividad. El betún aumenta su pegajosidad y tiene una adherencia muy buena a los áridos.

Por el contrario, los ligantes modificados convencionales poseen mejores propiedades de recuperación elástica, son almacenables y más homogéneos. Para la misma cantidad de adición el cambio de propiedades es mayor en los betunes modificados convencionales que en los betunes caucho. En la comparación de los ligantes-caucho almacenables con los ligantes modificados convencionales, aunque los primeros pueden cumplir las especificaciones de los ligantes modificados, no alcanzan los parámetros de los ligantes modificados convencionales.

#### **4.4.- FACTORES A CONSIDERAR EN LA DOSIFICACIÓN BETÚN-CAUCHO**

En función de la dosificación y propiedades de los componentes se puede obtener un amplio abanico de betunes-caucho con penetraciones entre 20 y 150, o temperaturas de Anillo y Bola entre 40 y 80°C.

En líneas generales, en la dosificación del betún-caucho se debe tener en cuenta la composición del betún y del caucho, la granulometría, textura y dotación de las partículas de caucho y la temperatura y tiempo de mezclado.

Primeramente, se debe elegir la penetración del betún a mezclar con el CNR según la aplicación que se quiera, teniendo presente que la adición de CNR reduce la penetración, de manera que si se pretende que la penetración final corresponda al rango de los betunes B 60/70 se debe partir de un B 80/100. El origen del ligante influye también, puesto que el caucho precisa de componentes ligeros para hincharse. Debido a todo esto, los betunes con menos componentes ligeros tienden a modificar en menor medida sus propiedades. No obstante, se puede ayudar al proceso con la incorporación de los llamados aceites extendedores, aromáticos o nafténicos, que proporcionan los componentes que se necesitan, compatibilizando la mezcla y haciendo el ligante más manejable, aunque se debe limitar su dotación porque también disminuye la viscosidad.

El tipo de neumático del que procede el caucho, tiene una cierta influencia, siendo preferible los de camión por el efecto ya comentado en el envejecimiento del ligante. Independientemente, estos neumáticos de camión son los que más se reciclan porque permiten un mayor rendimiento de la instalación de trituración.

Los factores del CNR que influyen a las propiedades del ligante betún-caucho son la granulometría y la textura. Cuanto más fina sea la granulometría del material, mayor superficie ofrece al betún y consecuentemente más rápidamente reacciona (el tiempo de reacción es proporcional al cuadrado del diámetro de las partículas) y se consiguen mayores aumentos de la viscosidad. No obstante, el polvo de caucho de granulometría más fina es también más caro. La textura afecta en el mismo modo que la granulometría, esto es, que cuanto mayor sea esta, mayor reacción habrá con el betún. Por lo tanto, se consiguen mayores modificaciones con caucho procedente de trituración mecánica que criogénica, ya que en este último caso la superficie de las partículas es más lisa.

Al depender las propiedades del betún-caucho del tiempo y temperatura de mezcla, es adecuado que en la dosificación se evalúen las propiedades para una gama completa de

estos parámetros o, por lo menos, si se parte de una temperatura fija de mezclado, la evaluación se debe hacer para tiempos de reacción y almacenamiento largos, medios y cortos, de forma que se pueda optimizar la mejora por la adición de caucho.

Visto que las características del betún-caucho dependen de las de sus materiales constituyentes; estos son: betún, CNR y en su caso aditivos. El diseño del betún se dirige a la obtención de la dosificación óptima de componentes que permita lograr las propiedades que se deseen. Estas propiedades buscadas, pueden ser las de un determinado tipo de betún modificado de los que se definen en el Pliego de Prescripciones Técnicas, pero también se puede buscar una mayor dosificación y se pretende llegar a una determinada viscosidad a las temperaturas de servicio, por encima a las de los betunes modificados convencionales.

#### 4.5.- BETUNES-CAUCHO EN ESPAÑA

En nuestro país existen cuatro empresas que han comercializado betunes-caucho, y se aproxima la formación de una cuarta. Cada una de ellas ofrece una gama de productos, de distinta penetración y con diferentes grados de modificación.

La primera empresa empezó en el año 1996 a ofrecer un betún-caucho del tipo betún estable (Betún 1). En el 2002 surgieron dos empresas ofreciendo betunes fabricados *in situ* (Betún 2 y 3) y una más con betún estable (Betún 4). Se muestran las características de algunos de estos betunes en esta tabla:

Características	Especificación BM-3a		Betún 1	Betún 2	Betún 3	Betún 4
	Mínimo	Máximo				
Penetración (25°C; 100g; 5 s.) (0.1 mm)	55	70	57	45	30	65
Punto de reblandecimiento (Ay B °C)	58		62	58	83	62
Ductilidad (5° C; cm)	4		21	20	-	14
Rec. Elástica a 25°C (%)	15		47	-20	21	70
Punto de fragilidad FRAASS (°C)		-10	-19		-	
Densidad relativa (25°C/25°C)			1.041			1.04
Residuo película fina						
Variación de masa (%)		1	-0.18			0.1
Penetración (25°C; 100g; 5 s.) (% p.o.)	65		0.8			90
Variación punto reblandecimiento (°C)	-5	+10	+7.7			3
Ductilidad (5°C; 5cm./min.)	2		7.7			10
Tamaño máx. polvo de caucho (mm)			1.25		1	
Dotación de CRN				13	20	

#### 4.6.- FABRICACIÓN DEL BETÚN-CAUCHO

El proceso de mezcla del CNR con el betún se realiza normalmente en unidades móviles equipadas con paletas que ejercen al ligante a una agitación lenta (medida en unidades de agitación). Se pueden utilizar también equipos convencionales de fabricación de betunes modificados con mayor velocidad de corte u otros molinos de corte más sencillos. Con las unidades de agitación el caucho absorbe lentamente el betún y se hincha. Con las unidades de fabricación del ligante modificado, las partículas de caucho se reblandecen y se parten con una mayor dispersión del material. No se han analizado por el momento, con detalle, las ventajas o inconvenientes de uno u otro sistema.

En el momento de la fabricación de mezclas bituminosas las unidades móviles de agitación para la fabricación *in situ* se colocan en tanques en el circuito del betún, entre el depósito de betún y el mezclador. La unidad móvil de mezclado puede conectarse fácilmente a las instalaciones existentes. El equipo suele ir provisto de bombas y tuberías de conexión para manejar betunes de gran viscosidad. La central debe tener suficiente espacio para los equipos y para el almacenamiento del caucho.

Las unidades móviles van provistas de una tolva para la alimentación del caucho y de dos cámaras, una de mezcla del betún con el caucho y otra de agitación desde donde se bombea al mezclador. El betún debe de llegar a la cámara de mezcla a temperaturas altas, usualmente entre 170 y 200 °C, lo que no es fácil de conseguir en algunas centrales. El betún pasa a mezclarse con el caucho en la primera cámara y el conjunto se bombea al tanque de agitación para que se produzca la reacción. Este tanque tiene un sistema mecánico de agitación que mantiene homogénea la mezcla en suspensión. La temperatura se mantiene aproximadamente entre 160 °C y 190°C (es más baja que la del betún por la adición del caucho) a lo largo de un tiempo mínimo que varía de unos procedimientos a otros. En caso de obtener temperaturas más bajas la reacción tarda mucho más tiempo en sucederse o puede no producirse plenamente. Este betún modificado se bombea después desde la unidad móvil a la cámara de mezclado de la central de mezcla bituminosa o en su caso se utiliza en la aplicación que corresponda.

El tiempo que se necesita para dispersar, mezclar y reaccionar el betún y el CNR se dobla cuando la temperatura del betún desciende diez grados centígrados. Hay que tener presente, no obstante, que para temperaturas altas, tamaño finos de partículas y tiempos de almacenamiento prolongados, puede reducirse la viscosidad por la despolimerización de las partículas de caucho que llegan a fundirse en el betún. Las propiedades de los betunes-caucho típicos se suelen mantener unas 24h para temperaturas de hasta 175°C. En el caso de temperaturas más elevadas se puede producir la despolimerización en unas 3 a 6h por lo que es recomendable emplear el betún rápidamente. En el caso de paradas, el betún caucho puede dejarse enfriar y luego recalentarse, pese a que la mayoría de las especificaciones limitan a 2 el número de recalentamientos para una colada particular.

El funcionamiento de la central de mezcla bituminosa es esencialmente el mismo que con mezclas convencionales salvo en que las temperaturas son superiores. No obstante, el rendimiento puede reducirse por las mayores dotaciones de betún o en algunos casos el rendimiento del equipo de mezclado puede retrasar el funcionamiento.

En España, hay por el momento, dos equipos móviles; uno de fabricación nacional y otro importado de EEUU.

#### **4.7.- APLICACIONES**

En otros países se han empleado los siguientes ligantes para fabricar:

- Masillas de sellado para juntas y grietas.
- Mástics para impermeabilización de tableros de puente.
- Membranas absorbedoras de tensiones (SAM o SAMI) o impermeabilizadoras de explanadas.
- Ligante para tratamientos superficiales con gravilla y riegos.
- Mezclas bituminosas en caliente, abiertas, densas o discontinuas.

El panorama en España se centra en el campo de aplicación de las mezclas bituminosas en caliente.

Dentro de este campo, se puede aplicar en capas de rodadura o intermedias:

- Como un ligante modificado más y con las dotaciones habituales en este tipo de aplicaciones, en aquellos casos en que se exige este tipo de ligante.
- Para lograr rodaduras con resistencia a las deformaciones plásticas aún mayor que la obtenida con los ligantes modificados convencionales, con dotaciones de betún convencionales o ligeramente superiores.
- Para proporcionar a la rodadura de un gran contenido en ligante, muy por encima del nivel convencional, con la idea de retrasar el envejecimiento, resistir al avance de las fisuras de la capa inferior, impermeabilizar el firme, conseguir un mayor contraste con las marcas viales o un color negro más duradero, etc.

Otro empleo del betún-caucho es en capas de base en las aplicaciones en que se utilizarían otros ligantes modificados, esto es, con el fin de aumentar la resistencia a la fatiga o para retrasar la aparición de grietas. En este último caso interesa ir a contenidos elevados de ligante.

En España, se han venido empleando en las experiencias realizadas hasta la fecha, en micros tipo F con dotaciones parecidas a las de los betunes modificados, en mezclas tipo S ó D con dotaciones algo superiores a las usuales y en mezclas discontinuas con contenidos de betún muy elevados (9%) como capa antifisuras.

Un aspecto adicional que se viene argumentando sobre las mezclas con betún-caucho es que cuando se emplean en mezclas drenantes, tienen la capacidad de reducir el nivel de ruido por encima de lo que lo hacen las mezclas drenantes con ligantes modificados convencionales. Por el momento, no hay información clara sobre este particular pero su interés hace que sea aconsejable seguir este aspecto en el futuro.

#### **4.8.- CRITERIOS DE DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS Y CARACTERÍSTICAS**

El método a emplear en la dosificación del betún-caucho en las mezclas bituminosas debe ser de la misma manera que los ligantes modificados. Pese a ello, se tiene en cuenta que, como parte del betún es caucho, el contenido de ligante debe ser algo superior ( un 20% aproximadamente cuando se utilizan ligantes fabricados *in situ*) al de una mezcla convencional con betún modificado. Interesa por otra parte aprovechar la alta viscosidad del betún caucho para introducir cantidades algo superiores de ligante.

En caso de emplear mezclas tipo hormigón asfáltico (mezclas densas o semidensas) el fin de la dosificación debe ser mantener el contenido mínimo de huecos que fijan las especificaciones. Si se van a dosificar elevadas cantidades de ligante, se debe ir a granulometrías del lado abierto del huso puesto que hay que hacer sitio en el esqueleto mineral para estas dotaciones de manera que al final el contenido de hueco sea el especificado. Esto puede obligar para altas dotaciones de betún a salirse del huso granulométrico correspondiente. En líneas generales, es difícil en mezclas densas o semidensas superar el 5.2-5.5% de betún, manteniendo los huecos especificados y las granulometrías dentro del huso, pero con las mezclas discontinuas o drenantes no suele haber problemas en mantenerse dentro de los correspondientes husos.

En las capas SAMI abiertas o discontinuas, empleadas para evitar la reflexión de fisuras, y que suelen dosificarse con contenidos muy elevados de ligante, el ensayo más significativo debería ser el de escurrimiento de ligante. En EEUU se han llegado a dosificar mezclas abiertas o discontinuas con contenidos de ligante del 10 al 11% sin problemas de escurrimiento debido a la mayor viscosidad del ligante.

A nivel de laboratorio se obtienen mezclas bituminosas con una elevada resistencia a las deformaciones plásticas, inclusive para contenidos altos de ligante, y muy buenas resistencias a fatiga.

#### 4.9.- FABRICACIÓN, PUESTA EN OBRA Y COMPACTACIÓN

El proceso de construcción de mezclas bituminosas con betún caucho es muy parecido al convencional, aunque deben tomarse las precauciones debidas al manejo de un material de elevada viscosidad, esto es, temperaturas de extendido ligeramente superiores a las normales, y compactación rápida con el material caliente debido a que la mezcla aumenta rápidamente de viscosidad.

El tiempo disponible para la compactación suele ser menor que en otras mezclas. Se aconseja la utilización de rodillos metálicos porque los de neumáticos pueden adherirse a la superficie, levantándola, aunque en España hay buenas experiencias con ambos tipos de compactadores.

#### 4.10.- TRAMOS CONSTRUIDOS EN ESPAÑA

Los tramos experimentales llevados a cabo de mayor relevancia son:

Tramo	Año	Longitud	Tráfico	Espesor de capa	% de caucho en el betún	% de betún
C-433 de Sevilla a Cazalla de la Sierra	1996	300 m	T2 (>200 camiones)	3 cm	-	5.7
SE-30	1996	300 m	T1	3 cm	-	5.7
M-300: Alcalá- Arganda del Rey	1996	330 m	T2 (>200 camiones)	5 cm	-	4.9
A-373 entre Ubrique y El Bosque	2002	16 km	T3	5 + 2.5	13	5.5
Valdaracete (Madrid)	2002	12 + 12 km	T3	5 + 5 cm	13 10	5.6
A-7	2002	1.2 km	T1	4 y 6 cm	20	9.6

#### 4.11.- PROCEDIMIENTO POR VÍA SECA

En los procedimientos por vía seca el neumático troceado se introduce directamente en el mezclador de la central de fabricación como si fuese un árido más. El neumático pasa a formar parte del árido mineral en la mezcla bituminosa. Los fenómenos básicos de esta técnica son los siguientes:

- El caucho sustituye una parte del árido.
- La parte fina reacciona con el betún, modificándolo.
- Es adecuado que se produzca una pre-reacción.

Sumado a todo esto, en algunos diseños de mezcla se busca que el árido actúe como árido elástico.

En EEUU se ha venido empleando un procedimiento patentado (llamado PlusRide), pero al mismo tiempo se han desarrollado otros genéricos similares al anterior que pueden

utilizarse libremente. Pese a esto, en este país la vía seca está en claro retroceso por la poca homogeneidad obtenida hasta el momento.

El primer sistema genérico de la tecnología seca (conocido como TAK) emplea un porcentaje de caucho similar o ligeramente por debajo que el PlusRide, pero con un tamaño más pequeño de las partículas. Se emplea un árido convencional de granulometría densa, pero la granulometría se ajusta para adecuarse a la del caucho. Se mantiene la idea del sistema PlusRide en cuanto que el caucho es un sistema de dos componentes en el que las partículas finas (pasa por el tamiz 1 mm) reaccionan con el betún y las partículas gruesas funcionan como un árido elástico en la mezcla. Se añade entre un 1y 3% de caucho en peso de mezcla, siendo el 2% un porcentaje típico. Parece que la combinación de la modificación del betún y la elasticidad del árido aumenta la vida de fatiga, reduce las tensiones térmicas y la reflexión de grietas y aumenta la adherencia del betún modificado al árido. El sistema fue desarrollado por Takallou en 1986 y se ensayó en obra por vez primera en 1989.

Veamos un ejemplo de este procedimiento:

Granulometría del caucho:

Tamices (mm)	Pasa (%)
6.4	100
5	75-85
2	45-65
1	30-40
0.4	0-10

Granulometría conjunta árido más caucho:

Tamices (mm)	Pasa (%)
25.4	100
12.7	95-100
6.4	65-85
2.5	36-65
1	15-39
0.42	8-27
0.1	4-16
0.08	2-6
Contenido de betún, % en peso de mezcla	6-7

Hay que tener presente el hecho de que el caucho se hincha en contacto con el betún durante el mezclado, transporte, colocación y compactación. El tamaño del caucho debe ser menor (en un tamaño de tamiz) que el tamaño granulométrico que se precise, es decir la discontinuidad que se le de al árido. Las diferencias en peso específico de árido y caucho exige que se aplique un factor de 2.3 con el objeto de determinar la composición granulométrica real en volumen.

La aplicación es parecida a la del PlusRide salvo que se emplean los compactadores de neumáticos sin problemas.

#### 4.12.- EXPERIENCIA EN ESPAÑA

En nuestro país, lugar donde se ha acumulado más experiencia en aprovechamiento por vía seca es en Cataluña, provocado por la Junta de Residuos de la Generalitat de Cataluña. La práctica inicial se basó en las experiencias norteamericanas de la tecnología genérica de Takellou, adaptadas a la práctica española por la UPC y el Centro de Investigación ESM.

En la práctica catalana se ha venido empleando un material que pasa todo por el tamiz 2.5 mm y más del 80% por el 0.63 mm, quedando una gran parte retenido en el 0.32 mm, con un 1% que pasa por el 0.08 mm. El árido natural se adapta en la zona del árido fino a la parte inferior del huso centrado D-12 o S-12 en el que el 2% en peso está compuesto por caucho. Las dosificaciones de betún son más elevadas que en las mezclas bituminosas convencionales.

Las modificaciones sobre la práctica habitual son:

- el caucho se introduce directamente en el mezclador en sacos.
- el tiempo de amasado es de unos 40 seg.
- la temperatura de fabricación es de 174°C.
- la compactación debe seguirse aplicando hasta que la temperatura llega a los 60°C.
- la compactación se lleva a cabo con compactador metálico sin vibración.

Se han construido varios tramos experimentales, en los que la mezcla con caucho se utilizó en capa de rodadura. Hay ejemplos en una avenida de Constanti, en caminos vecinales de Vacarisses, pero los más característicos son los que se muestran:

Tramo	Año	Longitud	Tráfico	Espesor de capa	% de neumático	% de betún
Vacarisses	1994	2.6 km	T3 (> 50 camiones/día)	4 cm	2%	5.5%
B-140 Sabadell-Mollet	1997	830 m	T0 (> 2000 camiones/día)	5.8 cm	2%	6.2%

Las pruebas realizadas sobre testigos de las mezclas extendidas y compactadas han sido muy satisfactorias, en especial en lo relativo al ensayo en pista, con velocidades de deformación muy bajas. La densidad es menor que en mezclas convencionales (del orden de 2.2-2.3). La resistencia al deslizamiento es más elevada que en los tramos de control con mezcla convencional. La adherencia a la capa inferior es muy alta.

Se puede afirmar que el comportamiento de todos los tramos ha sido bueno hasta la fecha, lo que supone una experiencia superior a 9 años con tráficos medios y 6 años con tráficos elevados. No se ha apreciado en ningún tramo desprendimientos de finos, deformaciones ni fisuras.

Fuera del ámbito de Cataluña, se realizaron en el año 1996 algunas pruebas con compartimiento dispar, todas ellas junto con tramos realizados por la vía húmeda. Los tramos son los que se señalan en la tabla. En el diseño de las mezclas intervinieron el centro de investigación CIESM y la Escuela de Caminos de Madrid. El caucho se introdujo esta vez en forma de polvo, con el 100% pasando por el tamiz 1.25 mm. el 4% por el de 0.08 mm. En el tramo de Sevilla se introdujo el polvo en una mezcla tipo F-10 y en el de Madrid en una mezcla D-20 y en un micro F-10.

Tramo	Año	Longitud	Tráfico	Espesor de capa	% de neumático	% de betún
C-433 de Sevilla a Cazalla de la Sierra	1996	300 m	T2 (> 200 camiones/día)	3	1%	5.7
M-300: Alcalá-Arganda del Rey	1996	330 m	T2 (> 200 camiones/día)	3 5	1% 1%	6.1 5.2

Mientras que los resultados de los tramos de Sevilla fue satisfactorio en líneas generales, con una ligera pérdida de textura producida en todo caso por el exceso de ligante, el de los tramos de Madrid fue malo, con abundantes pérdidas del material. Una de las posibles razones de este fallo fue que no hubo prácticamente tiempo de reacción al estar la planta muy cercana a los tramos de prueba.

## **5.- CONCLUSIONES**

Como se ha podido comprobar, hay varias técnicas para la incorporación de los neumáticos troceados en las mezclas bituminosas. Unas son de aplicación directa, como las que se basan en la fabricación de betunes modificados convencionales, y otras en cambio, necesitan de experimentación. Tiene interés que se desarrollen todas las posibilidades, porque cada técnica tiene sus ventajas y su campo de aplicación y, además, las otras técnicas permiten eliminar mayores cantidades de neumáticos que es nuestro primordial deseo.

No obstante, a pesar de la urgencia en la búsqueda de aplicaciones para los neumáticos fuera de uso, hay que tener en cuenta que el empleo de residuos en carreteras debe de pasar por una definición clara de las características mecánicas y de durabilidad de cada uno de ellos. En otro orden de cosas, dado el tiempo necesario para sacar conclusiones en las pruebas experimentales en carreteras, sería conveniente que las Administraciones de carreteras diseñasen una política de tramos de ensayo para estos materiales que permitiese en un futuro a corto plazo contar con datos suficientes para su aplicación.

## **Anejo 2.**

### **Orden Circular 5bis/2002 sobre las condiciones para la adición de polvo de neumático usados en las mezclas bituminosas**

#### ***Orden Circular 5bis/2002 sobre las condiciones para la adición de polvo de neumático usados en las mezclas bituminosas***

El 5 de octubre de 2001 el Gobierno aprobó por Acuerdo de Consejo de Ministros el Plan nacional para la gestión de neumáticos fuera de uso. En lo referente a su incidencia en carreteras, se puede extraer lo siguiente:

*“En las obras públicas en que su utilización sea técnica y económicamente viable se dará prioridad a los materiales procedentes del reciclaje de neumáticos fuera de uso. En estos casos se exigirá la inclusión de este requisito en los correspondientes Pliegos de Prescripciones Técnicas”.*

Los artículos 29, 40 y 51 del Reglamento General de Carreteras, aprobado por Real Decreto 1812/1994, de 2 de septiembre, y modificado por los Reales Decretos 1911/1997, de 19 de diciembre, 597/1999, de 16 de abril, y 114/2001, de 9 de febrero, facultan al Ministro de Fomento, a propuesta de la Dirección General de Carreteras, para aprobar las normas e instrucciones a las que deban sujetarse los estudios, los trabajos y obras de construcción y los trabajos y obras de explotación de las carreteras estatales.

Pese a todo esto, resulta inexcusable el cumplimiento del procedimiento de información en materia de normas y reglamentaciones técnicas establecido en la Directiva 98/34/CEE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de junio, y en el Real Decreto 1337/1999, de 31 de julio, proceso que, aunque se encuentra iniciado, consumirá algún tiempo.

Mientras que la O.C. 5/2001 y ésta superan los trámites para su aprobación, urge dar cumplimiento al mencionado Acuerdo de Consejo de Ministros. Por ello, esta Dirección General ha dispuesto lo que se cita a continuación:

**Primero;** Modificar el apartado 540.2.1 del artículo 540 (Lechadas bituminosas, del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales Para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), incluido en la OC5/2001, en el sentido de añadir al final del mismo el siguiente párrafo:

*Según lo dispuesto en el apartado referente a su incidencia en carreteras del Plan de neumáticos fuera de uso, aprobado por Acuerdo de Consejo de Ministro, de 5 de octubre de 2001, “en las obras en las que la utilización del producto resultante de la trituración de los neumáticos usados sea técnica y económicamente viable se dará prioridad a estos materiales. Para tal fin, las emulsiones bituminosas a emplear podrán ser fabricadas con ligantes modificados por adición de polvo de neumáticos usados”.*

**Segundo;** *Cambiar los apartados 542.2.1 del artículo 542 (Mezclas bituminosas en caliente y 543.2.1 del artículo 543) Mezclas bituminosas discontinuas en caliente para capas de rodadura, del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales Para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), incluidos ambos en la OC5/2001, añadiendo el siguiente párrafo:*

Según lo dispuesto en el apartado concerniente en carreteras del Plan de neumáticos fuera de uso, aprobado por Acuerdo de Consejo de Ministro, de 5 de octubre de 2001, “en las obras en las que la utilización del producto resultante de la trituración de los neumáticos usados sea técnica y económicamente viable se dará prioridad a estos materiales”.

**Tercero;** *Esta Orden Circular se aplicará a los siguientes tipos de proyectos, obras y actuaciones en general:*

- Proyectos de carreteras de nueva construcción, de acondicionamiento, y de reconstrucción total de las existentes en las carreteras cuya Orden de Estudio se autorice, o el proyecto se encuentre en fase de redacción, con posterioridad a la fecha de entrada en vigor de esta Orden Circular.
- Otros tipos de proyectos y obras (incluidos los de rehabilitación estructural) cuya orden de Estudio se autorice con posterioridad a la fecha de entrada en vigor de esta Orden Circular.
- En caso de tratarse de obras en fase de licitación o adjudicadas, se elevará consulta a la Subdirección General de Construcción o a la 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 esta Orden Circular.

**Cuarto;** *Esta Orden Circular entrará en vigor a partir del día 15 de noviembre de dos mil dos.*

## 6.- AFIRMADOS

### 6.1.- FIRMES

Comúnmente se define el **firme** de cualquier tipo de infraestructura viaria (caminos, carreteras, aeropuertos...) como un conjunto de capas superpuestas horizontalmente, constituidas por diversos materiales sueltos o tratados con una sustancia aglomerante, cuya función es transmitir adecuadamente las cargas generadas por el tráfico, de forma que las capas subyacentes no se deformen de forma inadmisibile, al menos durante cierto período de tiempo( llamado período de proyecto) y bajo cualquier condición meteorológica.

Además de poseer unas altas características resistentes, el firme debe ser capaz de aportar otra serie de propiedades que garanticen la seguridad y comodidad de los usuarios de forma duradera.

En este sentido, el acabado superficial del firme (comprende la capa de rodadura) juega un papel determinante. La actual concepción del firme como estructura multicapa unida al desarrollo de novedosos materiales, lleva a la generación de multitud de secciones diseñadas especialmente para determinadas situaciones de carga. No obstante, puede hacerse una síntesis de todas ellas en dos grandes grupos atendiendo a la forma de resistir los esfuerzos, así como por los materiales y capas que las componen; estos son los **firmes flexibles**, formados por capas bituminosas y granulares, y por otra parte los **firmes rígidos**, compuestos por pavimentos de hormigón.

Existen otros grupos también importantes, son los firmes semirrígidos, los drenantes y los mixtos.

### 6.2.- FUNCIONES DEL FIRME

La aparición del firme como elemento fundamental de una carretera se justifica totalmente con la evolución que el transporte terrestre ha tenido a lo largo de la historia, especialmente en este último siglo, donde el automóvil ha sufrido grandes cambios que han repercutido un considerable aumento en sus prestaciones.

El incremento en la velocidad de circulación, añadido a la cada vez mayor proliferación de vehículos pesados deja obsoletas a las explanadas, incapaces de resistir la acción directa de fuertes cargas verticales y tangenciales y muy susceptibles a la acción de los agentes meteorológicos. Este motivo ha forzado a idear nuevos materiales acordes con la situación, dispuestos de forma que soporten y repartan las exigencias generadas por el tráfico sin deteriorarse en exceso.

Todo ello lleva a concluir que las principales **funciones** de los firmes que actualmente se utilizan en la construcción de carreteras son las siguientes:

Resistir las solicitaciones del tráfico previsto durante el período de proyecto del firme, así como servir de colchón de amortiguamiento de las cargas verticales sobre las capas inferiores, de manera que a la explanada llegue una pequeña parte de aquellas, compatible con su capacidad portante.

Proporcionar una superficie de rodadura segura y cómoda, cuyas características se mantengan constantes durante el período de funcionamiento de la vía, produciéndose a lo largo de esta deformaciones admisibles y deterioros que puedan ser solucionados mediante actuaciones eventuales de mantenimiento y conservación; ya que son lógicas en cualquier tipo de infraestructura.

Proteger la explanada de los fenómenos meteorológicos, especialmente de las precipitaciones y del agua en cualquiera de sus formas, ya que en determinados suelos provoca una disminución considerable en sus características resistentes, pudiendo además provocar lavados de parte del material e incluso fenómenos de deslizamiento.

A modo de idea principal, puede decirse que el objetivo final de un firme es la de **soportar la acción de los vehículos** que circulan sobre él, proporcionando en todo momento una **superficie de rodadura cómoda, segura y duradera**.

La calidad del firme es parte importante aunque no la única para que estas funciones se realicen correctamente; además su infraestructura (obras de tierra y drenaje) también debe ser la apropiada.

### **6.3.- CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES**

Las anteriores funciones exigidas al firme hacen que éste tenga que responder a una serie de requisitos para realizar adecuadamente su labor.

Las características funcionales de un firme se dividen en dos grandes grupos; estas son **superficiales** y **estructurales**.

#### **6.3.1.-Características superficiales**

Hacen mención a varias propiedades que debe tener la superficie del firme (llamada también capa de rodadura) y que guardan relación con la **seguridad** y la **comodidad** experimentada por el usuario.

Destacamos las principales:

Resistencia al deslizamiento. Es importante para asegurar el contacto permanentemente entre vehículo y carretera, sobre todo en los tramos difíciles. Esta propiedad está relacionada con la textura superficial del firme y el tipo de árido empleado en construcción.

Regularidad superficial, ya que influye sobre todo a la comodidad del usuario, y viene determinada por el grado de alabeo tanto longitudinal como transversal del pavimento.

Es por ello que las deformaciones con pequeñas longitudes de onda son las que producen mayor sensación de incomodidad, pudiendo acarrear en determinados momentos cierto peligro.

Drenaje superficial; esto es, la rápida evacuación de las aguas pluviales caídas directamente sobre el firme hacia los laterales determinando también la seguridad de los usuarios, ya que un correcto drenaje superficial evita salpicaduras, pérdidas de agarre y el conocido fenómeno de aquaplaning.

Sobre todo esto tienen poder tanto la disposición de una pendiente transversal suficiente, como un correcto acabado superficial que proporcione una textura adecuada para el buen drenaje.

Reflexión lumínica: El brillo del firme, producido por la reflexión de fuentes luminosas (el sol a lo largo del día y los faros y luminarias por la noche) es otro factor a tener en cuenta porque se busca evitar peligrosos y molestos fenómenos de reducción de visibilidad y deslumbramiento, con mayor índice por la noche.

Ruido de rodadura, puesto que al ser ocasionado por el contacto entre neumático y pavimento es una importante fuente de contaminación acústica principalmente en grandes núcleos de población; es más los ocupantes de los vehículos también sufren de manera continuada sus perjudiciales efectos.

### 6.3.2.- Características estructurales

Estas se hallan unidas de una manera directa con las **propiedades resistentes** (tanto físicas como mecánicas) de los materiales que forman el firme y con el espesor de las capas que lo conforman.

Los materiales pétreos integrantes de cada capa deben ser cuidadosamente seleccionados, de manera que se garantice una calidad suficiente para conseguir que el firme sea **resistente y durable**.

En este aspecto, es importante que los áridos presenten una adecuada composición granulométrica, una forma regular con bordes angulosos y un bajo contenido en finos.

La normativa española, en concreto el PG-3, especifica con mayor profundidad los requisitos que debe cumplir cada material en función de la capa donde se utilice.

El grosor de las capas informa de la forma de **transmitir** y del grado de **amortiguamiento** de las tensiones transmitidas por los vehículos; claro está que un mayor espesor ayudará a mejorar las propiedades resistentes de una determinada capa.

## 6.4.- TIPOS DE FIRMES

Se tienen en la actualidad, una gran diversidad de firmes, que se adaptan a la multitud de exigencias del entorno. Haremos, en función de la composición de las capas y, por tanto, a la manera que tienen de resistir y transmitir los esfuerzos soportados, una división en dos tipos de firmes; por una parte los **flexibles** o bituminosos, y por la otra, los **rígidos** o de hormigón. Señalaremos también la existencia de los firmes semirrígidos, los drenantes y los mixtos, englobando los dos primeros en el grupo de los flexibles, y el tercero en uno aparte.

### 6.4.1.- Firmes flexibles

Se caracterizan por tener el siguiente comportamiento; la serie de capas por las que están formados, presentan una resistencia a la deformación decreciente con la profundidad. Esto se debe a que obedece al mantenimiento de la proporcionalidad entre tensión y deformación en cada punto del firme, buscando el conseguir un trabajo conjunto de la totalidad de las capas formantes.

Las capas más superficiales están formadas por mezclas bituminosas compuestas por áridos y ligantes hidrocarbonados correctamente dosificados, obteniendo este tipo de firme su carácter flexible. Estas capas se apoyan sobre otras capas de carácter granular constituidas por zahorras de origen natural o artificial, de menor capacidad portante, encargadas de un reparto adecuado de las tensiones verticales.

#### ☐ *Firmes semirrígidos*

Vinieron provocados por el aumento de las intensidades y las cargas de tráfico; se caracterizan por tener las capas inferiores estabilizadas con cemento o bien mayores espesores de las capas bituminosas, ello conlleva una mayor rigidez al firme y le proporciona un comportamiento estructural muy distinto, ya que la capacidad portante de las capas aumenta con la profundidad.

No obstante, los firmes semirrígidos normalmente se incluyen dentro de este grupo de los firmes flexibles debido a la análoga composición de sus capas superiores, formadas por mezclas bituminosas.

#### ☐ *Firmes drenantes*

Deben su aparición a la consecución de los nuevos betunes modificados con polímeros (BMP). Las destacadas diferencias que presentan con respecto a los firmes tradicionales es la doble función **drenante** y **resistente** de la capa de rodadura, con lo que el agua caída sobre el firme se filtra directamente, evacuándose por gravedad a través de la pared porosa.

Se producen también una mejora de una serie de características secundarias, como son la producción de ruido o la generación de charcos y salpicaduras; además de por supuesto, del aumento de las condiciones de resistencia al deslizamiento en firme mojado.

Una pega que puede producirse es en zonas secas, donde la red porosa puede llegar a obturarse por falta de precipitaciones que vayan lavando las partículas en suspensión.

#### **6.4.2.- Firmes rígidos**

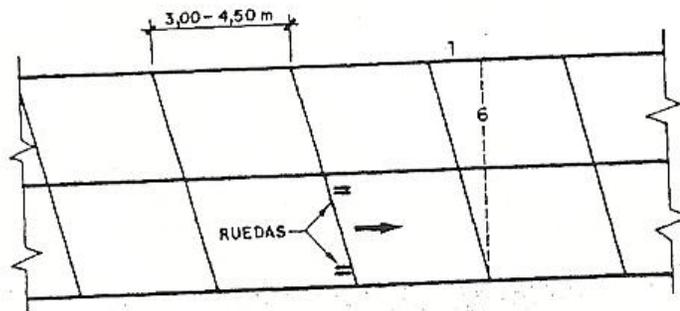
Se pueden dividir en dos, las partes integrantes de este tipo de firmes; por un lado, una losa de hormigón; y por otro, está el apoyo de la misma que son diversas capas, algunas de ellas estabilizadas.

Podemos hacer una segunda división, en función de la clase de pavimento utilizado:

Pavimento de hormigón en masa vibrado: Se trata de los más usados, debido a su alta versatilidad. Está dividido en losas mediante juntas para evitar la aparición de fisuras provocadas por la retracción del hormigón. Las juntas transversales se colocan a distancias aleatorias comprendidas dentro de un rango de valores (4-7 m), evitando los fenómenos de resonancia.

Para optimizar la transmisión de las cargas entre las losas pueden emplearse pasadores de acero, o bien, deberán de inclinarse las juntas.

#### **Pavimento de hormigón en masa con juntas transversales inclinadas**



Pavimento continuo de hormigón armado: Se caracteriza por ser muy resistente, pero caro, con lo que su campo de trabajo se da para tráfico pesado. Emplea una cuantía geométrica longitudinal del 0.6%, suprimiéndose las juntas transversales e incluyendo según los casos, fibras de acero distribuidas aleatoriamente, con el fin de reforzar su estructura.

La ventaja se da pues en su buena conservación y mantenimiento. Se utiliza sobre todo en Estados Unidos, y en menor medida en España.

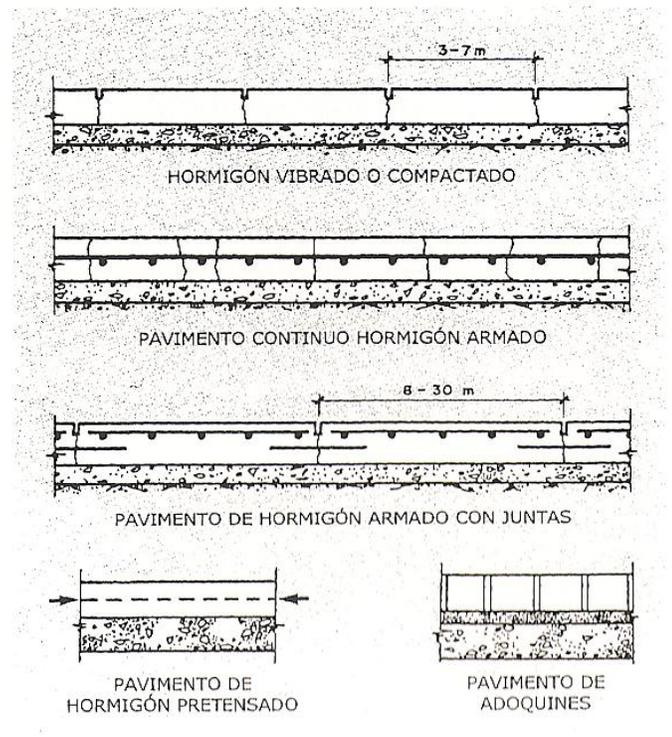
Pavimento de hormigón pretensado: Presentan la característica de tener tendones de acero que someten a compresión a la losa, con lo que conseguimos reducir de manera notoria su espesor y aumentar su longitud.

La ventaja radica por lo tanto en que son capaces de soportar grandes exigencias, aunque por el contrario, el pero está en que su empleo se restringe a situaciones muy específicas, como son pistas de aeropuerto casi únicamente.

Pavimento de hormigón compactado: Tiene una relación muy baja en agua/cemento suele estar entre 0.35 y 0.40, por lo que el cemento viene a contener un alto porcentaje de cenizas volantes, con lo que se facilita su trabajabilidad. Todo ello, conduce a que su puesta en obra se haga mediante extendedoras y compactadoras.

El acabado consiste en una capa de rodadura bituminosa, con lo que se les considera firmes mixtos; presentan la posibilidad de abrirse al tráfico en poco tiempo.

Pavimentos prefabricados de hormigón: Es un tipo de pavimento que incluye distintos tipos de configuraciones de hormigón; vienen a ser, placas de hormigón armado, de 1.50 a 3 m. de lado y de 12 a 16 cm. de espesor, usadas en pavimentos industriales. También, los adoquines de hormigón, utilizados en su mayoría en zonas urbanas, portuarias e industriales, motivado esto por su facilidad de puesta en obra y su elevada resistencia al tráfico pesado. Los adoquines descansan sobre una capa de nivelación de arena, que tiene una labor drenante, asentada sobre una capa base de hormigón magro o zahorra en consonancia con el tipo de tráfico que se dé en el lugar de destino.



La **nomenclatura** de los hormigones empleados en la elaboración del pavimento hace mención a su resistencia a flexotracción a los 28 días. Por esto, en firmes para tráfico pesado se usan hormigones HP- 45 ó HP- 40, en cambio, para tráfico ligero se utilizará los HP- 40 ó HP- 35.

En cuanto al espesor de la losa está comprendida en el rango que va desde los 20 a los 28 cm. en los pavimentos de hormigón en masa.

#### **6.4.3.- Firmes mixtos**

Este tipo de firmes es como una mezcla entre los dos grupos de firmes, vistos anteriormente. Se caracterizan porque su pavimento está formado por una capa de hormigón de una calidad baja recubierta por un pavimento bituminoso, siendo este el encargado de las características de rodadura.

El principal campo de acción de este tipo de firmes se localiza en zonas urbanas, puesto que al existir bajo la calzada redes de servicios que se protegen de los vehículos pero que asiduamente deben ser mantenidas y reparadas en caso necesario, justifica su presencia.

## 7.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los ensayos llevados a cabo en el laboratorio se centrarán en el comportamiento mecánico, destacando que resulta muy complejo y que depende de distintos factores, siendo tales, la sollicitación aplicada, el tiempo durante el que ésta actúa o la temperatura ambiente. Se recoge la explicación de este comportamiento bajo el punto de vista global de la **reología**.

Teniendo los valores de penetración a 25°C y el punto de reblandecimiento (anillo y bola) podemos calcular el **índice de penetración** de un betún, con lo que sacamos ya una idea del tipo y las características reológicas del mismo.

Emplearemos la técnica de la vía húmeda con el objetivo de obtener un betún del tipo BM-3, que son los que más se utilizan, principalmente en firmes drenantes y capas resistentes a la fatiga. Estos firmes deben su aparición a la consecución de los nuevos betunes modificados con polímeros (BMP). Las destacadas diferencias que presentan con respecto a los firmes tradicionales es la doble función **drenante** y **resistente** de la capa de rodadura, con lo que el agua caída sobre el firme se filtra directamente, evacuándose por gravedad a través de la pared porosa.

Se producen también una mejora de una serie de características secundarias, como son la producción de ruido o la generación de charcos y salpicaduras; además de por supuesto, del aumento de las condiciones de resistencia al deslizamiento en firme mojado.

Si, además, consideramos que el porcentaje que se viene empleando sobre betún varía entre 10-20% s/betún, estamos hablando de reutilizar entre 5-10 mil Tn. a través de esta técnica.

Realizaremos una introducción inicial de la metodología y justificación de los ensayos realizados. Los dividiremos además en tres fases, concluyentes y derivadas de los diferentes estudios llevados a cabo.

### **Introducción: Normalización y Caracterización de los betunes empleados**

#### **Fase 1: Estudio con caucho americano TEM 0.8**

- Adición de distintos porcentajes de caucho americano TEM, sobre diferentes mezclas de betún 60/70 y 150/200.
- Determinación de la mezcla con mejores características reológicas.

## **Fase 2: Estudio comparativo con caucho americano TEM 0.8 y caucho NECALFLEX 0.8 y 0.4**

- Adición del mismo porcentaje de los dos tipos de caucho, distinguiendo entre caucho NECALFLEX 0.8 y caucho NECALFLEX 0.4
- Determinación de la mezcla con mejores características reológicas.

## **Fase 3: Estudio comparativo con mezclas de betún 60/70 y 150/200 en diferentes proporciones más la adición de los dos tipos de caucho.**

- Análisis de los diferentes porcentajes de betunes y sus características modificadas.
- Determinación de la mezcla con mejores características reológicas.

### **Introducción: Normalización y Caracterización de los betunes empleados**

Con el objetivo de salvaguardar la privacidad de los diferentes productos llevados a ensayo en el laboratorio de la empresa en la que se realizó el estudio, denominaremos las muestras con la numeración del 1 al 23. Indicaremos el tipo de betún llevado a estudio y los porcentajes examinados con el objetivo de determinar la mezcla de condiciones más óptimas para su ejecución y puesta en obra. Para la realización del ensayo de estabilidad al almacenamiento en estufa de desecación, se solicitó la fabricación y posterior compra al equipo de soldadores de la empresa de la gradilla de hierro, indicándoles la capacidad y formas necesarias para el correcto almacenaje en la estufa y su posterior análisis.

## Tipologías de betunes

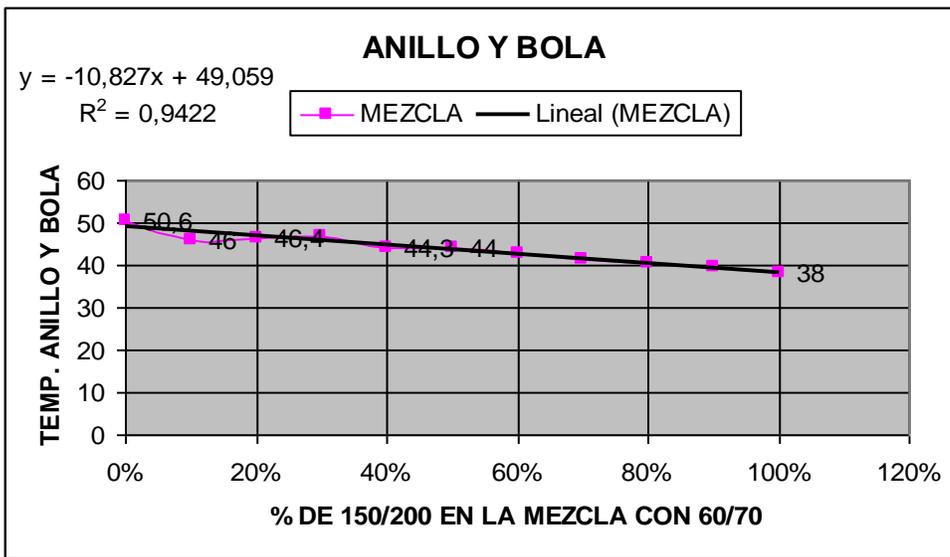
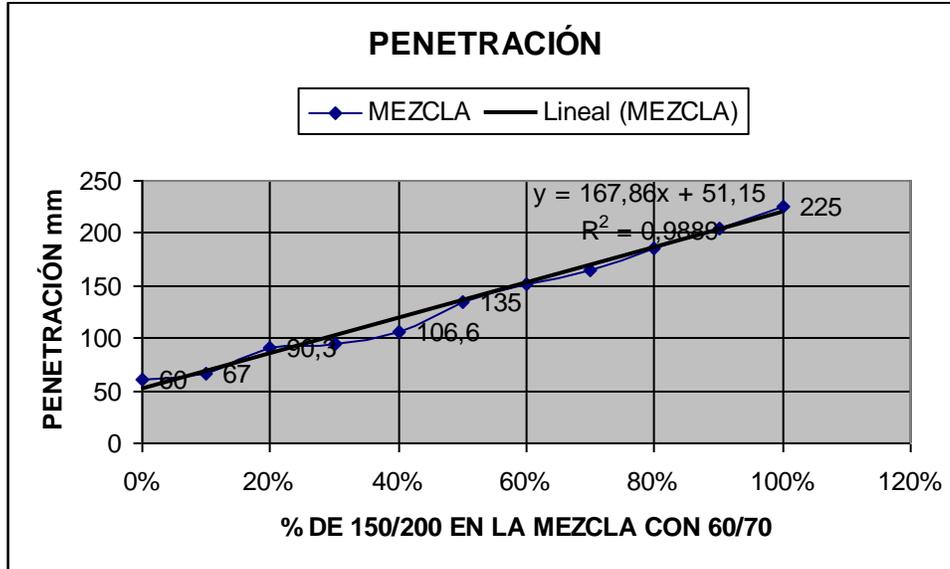
Veamos seguidamente un cuadro que recoge los distintos tipos de betunes de interés así como su caracterización en cada caso:

Característica	Unidad	BM-1		BM-2		BM-3a		BM-3b		BM-3c		BM-4		BM-5	
		Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
<b>Betún original</b>															
Penetración (25 °C; 100g; 5s)	0.1 mm	15	30	35	50	55	70	55	70	55	70	80	130	150	200
Punto reblandecimiento anillo y bola	°C	70	-	65	-	58	-	60	-	65	-	60	-	55	-
Punto de fragilidad Fraass	°C	-	-4	-	-8	-	-10	-	-12	-	-15	-	-15	-	-20
Ductilidad (5 cm a 5°C)	cm	-	-	2	-	4	-	25	-	30	-	40	-	50	-
	a 25°C	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Consistencia (flotador a 60°C)	s	3000	-	2000	-	700	-	1200	-	2000	-	1200	-	1200	-
Estabilidad al almacenamiento	°C	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5
Diferencia Punto Reblandecimiento	°C	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5
Diferencia Penetración (25°C)	0.1 mm	-	5	-	8	-	10	-	10	-	10	-	12	-	20
Recuperación elástica a 25°C	%	-	-	10	-	15	-	40	-	70	-	60	-	60	-
	40°C	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Contenido en agua (en volumen)	%	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2
Punto de Inflamación	°C	235	-	235	-	235	-	235	-	235	-	###	-	200	-
Densidad relativa (25°C/25°C)		01/01/00	-	01/01/00	-	01/01/00	-	01/01/00	-	01/01/00	-	###	-	###	-
<b>Residuo después de película fina</b>															
Variación de masa	%	-	0.8	-	0.8	-	01/01/00	-	01/01/00	-	01/01/00	-	01/04/15	-	###
Penetración (25°C; 100g; 5s)	% p.o.	70	-	70	-	65	-	65	-	65	-	60	-	55	-
Variación del punto de reblandecimiento	°C	-4	8	-4	8	-5	10	-5	10	-5	10	-6	10	-6	10
Ductilidad (5 cm a 5°C)	cm	-	-	1	-	2	-	12	-	15	-	20	-	25	-
	a 25°C	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## Características de las mezclas de betún

En esta primera tabla y como mostramos en los dos gráficos siguientes, el incremento progresivo de betún 150/200 provoca un reblandecimiento en el índice de penetración aumentando este valor, y un decremento del punto de reblandecimiento anillo-bola. El porcentaje de recuperación elástica, apenas se ve afectado.

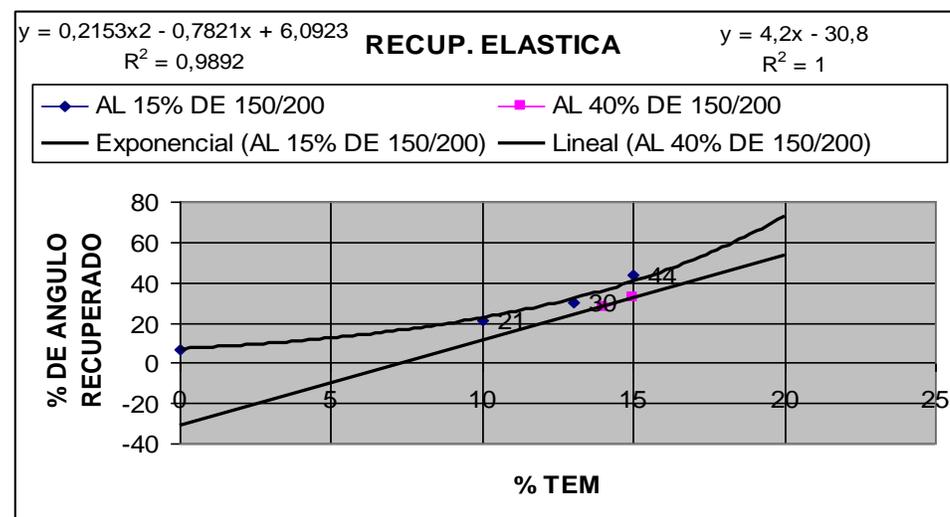
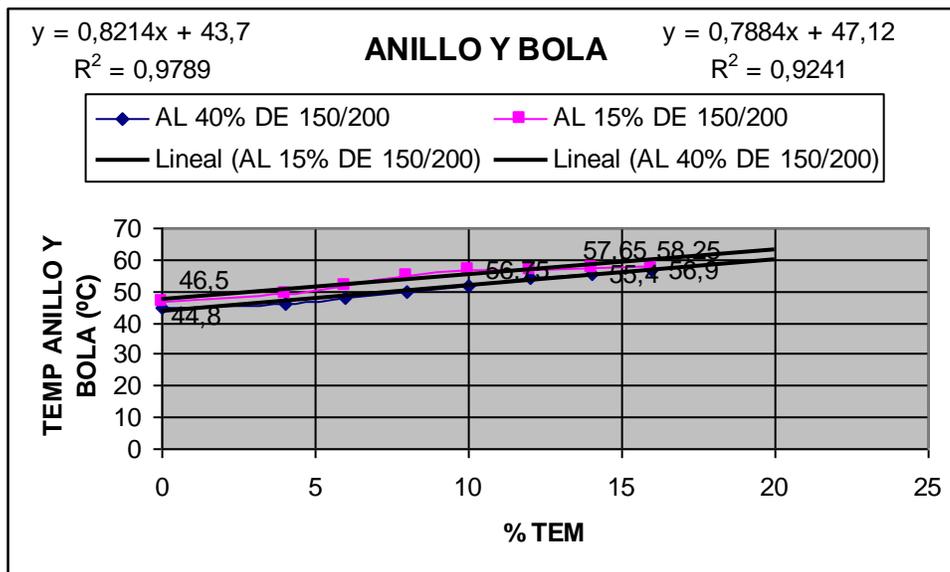
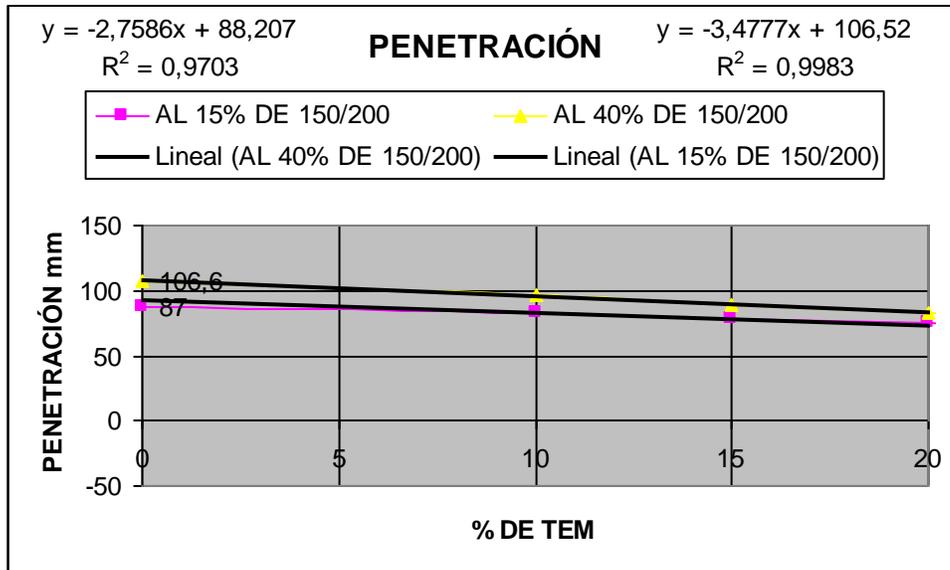
BETÚN	MEZCLA DE BETUNES DE 60/70 CON 150/200						
% RELATIVOS	0,00%	15,00%	20,00%	30,00%	40,00%	50,00%	100,00%
VALORES	60/70	60/70 + 150/200	60/70 + 150/200	60/70 + 150/200	60/70 + 150/200	60/70 + 150/200	150/200
PENETRACIÓN	60	87	90.3	82.5	106.6	135	225
ANILLO BOLA	50.6	46.5	46.4	49.2	44.8	44	38
REC. ELASTIC.	5.0%					5.5%	---



### Características de las mezclas de betún + caucho

BETÚN	MEZCLA DE BETUNES DE 60/70 AL 15% DE 150/200				MEZCLA DE BETUNES 40% DE 150/200 + TEM			
	% TEM	0	10	13	15	0	14	15
PENETRACIÓN		87	65.3	49.7	46	106.6	56.6	55.5
ANILLO BOLA		46.5	56.75	57.65	58.25	44.8	55.4	56.9
REC. ELASTIC.		6	21	30	44		28	32.2

Vemos en esta tabla anterior, así como en los tres gráficos inferiores, que la adición de caucho, cambia los valores, dándole al betún-caucho una mayor consistencia debido al incremento del punto de reblandecimiento anillo-bola y un menor índice de penetración, así como el porcentaje de ángulo recuperado, que también desciende.



### **Mezcla de betunes de caucho**

Avanzando en la línea de los ensayos, si eliminamos la proporción del caucho 60/70 y consideramos solo los del caucho 150/200, los valores obtenidos no cumplen las especificaciones necesarias para la puesta en obra; no mejorando las características con la adición de caucho TEM 0.8 o NECA 0.4

	<b>TEM AL 14%</b>				<b>NECA 0.4 AL 14%</b>			
<b>150/200</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>PENETRACIÓN</b>	53.3	46.6	56.6	62.6	44	43.3	51.6	58
<b>ANILLO Y BOLA</b>	53.3	64.1	55.4	47.3	63	65.4	64.8	58
<b>REC. ELASTIC.</b>	16	45	28	30	42	50	50	50

Hemos descartados estos valores marcados en rojo (20% de betún 150/200) por considerar que a ese tiempo, faltaba digestión en el caucho TEM al 14%.

Sucediendo exactamente lo mismo en el caucho NECA 0.4 al 14% con el 20% de betún 150/200.

De todo ello, deducimos que betunes más consistentes de base, esto es, rígidos y viscosos a altas temperaturas, que se aplicarán en zonas cálidas. Por el contrario, en climas fríos tendrán un peor comportamiento.

Pertenecen a este grupo los betunes de los tipos B 20/30, B 30/50 y B60/70.

## FASE 1: ESTUDIO CON CAUCHO AMERICANO (TEM 0.8)

Analizamos en primer lugar este tipo de caucho ampliamente extendido en el mercado internacional como proveedor de polvo de NFUs y que por lo tanto, es probable que una empresa realice la compra de este material para su implementación y posterior puesta en obra. Se suma el hecho además que el polvo de caucho de granulometría más fina es también más caro por lo que tiene sentido comenzar el estudio por el caucho más económico.

Este estudio comprenderá los siguientes ensayos:

- Penetración (NLT-124): Con él, se calcula la penetración de un betún asfáltico, estableciendo la tipología. Para esto, empleamos el **penetrómetro**, que consiste en un aparato formado por una aguja de dimensiones normalizadas tarada con una masa de 100g. El procedimiento es: Dejamos caer la aguja libremente (sin ejercer fuerza alguna sobre ella) durante 5 segundos sobre la muestra a ensayar, indicando en una regla graduada la penetración de dicha aguja en décimas de milímetro.

Según la penetración que se obtiene de diversos betunes, se clasifican en dos grandes grupos: blandos y duros; vistos ambos con anterioridad.

- Punto de reblandecimiento (NLT-125): Conocido por el sobrenombre de “**anillo y bola**”, debido a los utensilios empleados en su desarrollo, este ensayo se realiza del siguiente modo: llenamos dos probetas de material bituminoso en forma de disco para ser colocadas horizontalmente dentro de un anillo metálico. Colocamos el conjunto en un baño de agua y glicerina y calentamos mediante mechero bunsen u otro tipo de fuente de calor a velocidad controlada hasta que se alcance una temperatura que obligue a deformarse a la muestra por el peso de una pequeña bola de acero colocada en el centro hasta tocar la superficie de una placa referencia colocada a 25.4 mm. (1”) por debajo del anillo, todo esto dentro del mencionado baño.

Cabe destacar que el resultado obtenido se considera a modo de valor orientativo, puesto que la consistencia del betún es susceptible a los factores como pueden ser temperatura o estado tensional al que se halle sometido el producto bituminoso.

- Recuperación elástica (NLT-329): Calentamos muestra con agitación constante que permita su vertido, ajustamos el cilindro del aparato de torsión de manera que su base inferior quede a una distancia de 20mm del fondo del recipiente para ensayo, situado en posición centrada y ajustado en el resalte que para tal fin se dispone en el fondo del baño. Vertimos la muestra en cantidad suficiente para enrasamiento con la marca grabada de que dispone el cilindro a 10 mm de su base inferior. Dejamos enfriar a temperatura ambiente durante una hora e introducimos el pasador del cilindro, girando 180° en el sentido de las agujas del reloj. Retiramos el pasador y trascurridos 30min procedemos a la lectura de la varilla sobre la semicorona graduada.

- Estabilidad al almacenamiento (NLT- 328): Calentamos muestra con agitación constante que permita su vertido, transfiriendo 180g al recipiente de ensayo al que previamente se le han cerrado las dos salidas. Cerramos herméticamente la parte superior del recipiente y lo llevamos a estufa a 165°C de forma contante durante 5días. Sacamos el recipiente y procedemos al vaciado en primer lugar de 60g de la parte superior y en segundo lugar, recogemos otros 60g de la parte inferior. A estas dos submuestras se le realizan los ensayos de penetración, anillo-bola y recuperación elástica para determinar posibles diferencias.

En primer lugar, establecemos las características de Penetración, Punto de reblandecimiento anillo-bola y recuperación elástica del betún 60/70 convencional, denominado duro, puesto que son más consistentes, esto es, rígidos y viscosos a altas temperaturas, aplicándose en zonas cálidas. Por el contrario, en climas fríos tendrán un peor comportamiento. Dada la climatología de nuestro país elegimos el de mayor índice de penetración de los tres betunes tipo B 20/30, B 30/50 y B60/70.

Adicionamos un 10% de caucho americano TEM 0.8, pudiendo así comparar las diferencias con el betún convencional y estableciendo un baremo sobre el que comprobar si la optimización es posible.

Tras esta adición hemos realizado los siguientes ensayos:

Penetración (NLT-124):

Comprobamos que el índice de penetración se ve reducido.

Punto de reblandecimiento (NLT-125):

Determinamos que el punto de reblandecimiento anillo-bola se ve ligeramente incrementado. Como el ensayo se realiza con dos muestras anilladas, calculamos la media de ambas para obtener un valor más representativo.

Recuperación elástica (NLT-329):

El porcentaje de ángulo recuperado se ha visto notablemente incrementado respecto al betún convencional 60/70.

Realizamos los mismos ensayos con las muestras M2, M3, M4 y M5. Para estas muestras se ha realizado en primer lugar la adición del betún 150/200 sobre el de 60/70 a fin de determinar unos valores baremo sobre los que adicionar distintos porcentajes de caucho y poder comprobar las posibles mejoras en las mezclas resultantes.

	<b>BETUN 60/70</b>	<b>M1 (60/70 + 10% CAUCHO)</b>	<b>M2 (60/70 + 15% 150/200)</b>	<b>M3 (60/70 + 150/200 + 15% CAUCHO)</b>	<b>M4 (60/70 + 150/200 + 13% CAUCHO)</b>	<b>M5 (60/70 + 150/200 + 10% CAUCHO)</b>
<b>P</b>	59	45.7	87	46	49.7	65.3
<b>T1</b>	50.6	54.5	46.3	58.2	57.6	56.7
<b>T2</b>	50.8	54.9	46.8	58.3	57.7	56.8
<b>T</b>	50.7	54.7	46.5	58.25	57.65	56.75
<b>REC ELAS</b>	8%	17%	6%	44%	30%	21,00%

<b>Betún</b>	<b>60/70</b>		<b>60/70 + 150/200</b>			
<b>% Caucho</b>	<b>0%</b>	<b>10%</b>	<b>0%</b>	<b>15%</b>	<b>13%</b>	<b>10%</b>
<b>Penetración</b>	59	45.7	87	46	49.7	65.3
<b>Anillo y Bola</b>	50.7	54.7	46.5	58.25	57.65	56.75
<b>Recup. Elast.</b>	8%	17%	6%	44%	30%	21%

Comprobamos que la mezcla de mejores datos globales acorde a las especificaciones de los betunes modificados recogidos en el PG-4 en los tres ensayos realizados, es la de betún 60/70 + 10% de caucho.

Citamos los defectos del resto de muestras; viendo que la muestra M2 tiene un índice de penetración elevado y un punto de reblandecimiento algo bajo, por lo que conllevaría posibles segregaciones de materiales y poca durabilidad al tráfico sin tener tampoco una buena recuperación elástica. Las muestras M3 y M4 tienen unos índices de penetración bajos y unos puntos de reblandecimientos altos, por lo que pese a tener altas recuperación elásticas son materiales muy susceptibles a presentar grietas por excesiva dureza y mal envejecimiento, y no drenar suficientemente la carretera sobre la que se apliquen. La muestra M5 presenta buenos valores de reblandecimiento y de recuperación, pero excesivo índice de penetración, tienen por lo tanto, altas probabilidades de segregaciones tal y como hemos citado anteriormente.

Realizamos consecuentemente sobre la M1, el ensayo de estabilidad al almacenamiento; obteniendo:

Estabilidad al almacenamiento (NLT- 328):

	<b>Antes de la estufa</b>		<b>Parte superior</b>		<b>Parte inferior</b>		<b>Diferencia Infer - Super</b>
	<b>Datos</b>	<b>Medias</b>	<b>Datos</b>	<b>Medias</b>	<b>Datos</b>	<b>Medias</b>	
<b>P1</b>	45	<b>45.7</b>	36	<b>36.3</b>	36	<b>36.3</b>	<b>0.0</b>
<b>P2</b>	46		36		37		
<b>P3</b>	46		37		36		
<b>T1</b>	54.5	<b>54.7</b>	58.9	<b>59.05</b>	61	<b>61.1</b>	<b>2.05</b>
<b>T2</b>	54.9		59.2		61.2		
<b>REC ELAS</b>	30/ 180 =	<b>16.7</b>	22/180 =	<b>12.2</b>	26/180 =	<b>14.4</b>	<b>2.2</b>

Realizamos tres ensayos de penetración y las dos muestras del punto de reblandecimiento de anillo y bola, tomando la media de los valores. La penetración no se ve alterada en ninguna de las partes con el tiempo, mientras que el punto de reblandecimiento y la recuperación elástica si ven modificadas ligeramente sus características pero en ambos casos cumplen con las especificaciones requeridas.

Por lo que esta mezcla M1 es apta y cumple con los requisitos para su puesta en obra, asegurándonos además que tendrá una vida útil larga tal y como nos demuestra el ensayo anterior, obteniendo una rentabilidad a medio y largo plazo.

## Fase 2: ESTUDIO COMPARATIVO CON CAUCHO AMERICANO TEM Y CAUCHO NECALFLEX

En esta segunda fase, es de obligado cumplimiento el establecer la comparación con otro polvo de caucho proveniente del triturado de neumáticos para poder establecer posibles diferencias entre ambos y centrar el análisis en la muestra que mejores datos reúne en los ensayos precedentes.

Pasamos por lo tanto, a determinar que tipo de caucho es el más adecuado para optimizar la mezcla, distinguiendo entre el caucho NECAFLEX 0.4 Y NECAFLEX 0.8, que tienen variación en el espesor de las partículas a mezclar, por lo que resulta interesante determinar las posibles diferencias y/o mejoras con ambos tipos de caucho. En estos ensayos las muestras se denominarán con los números del 6 al 8; esto es M6, M7 y M8.

Realizamos, al igual que en la fase anterior del estudio, el baremo sobre el que mejorar las propiedades reológicas de la mezcla, partiendo del mismo betún 60/70 denominado duro.

Adicionamos el mismo porcentaje de caucho NECA 0.4, NECA 0.8 y TEM 0.8; esto es, un 10% debido a que ya hemos comprobado en la fase anterior, que mayores adiciones no mejoran de forma global el producto resultante.

### Resultados de caucho + 60/70

Valores	Betún 60/70	M6 60/70 + 10% NECA 0.4		M7 60/70 + 10% NECA 0.8		M8 60/70 + 10% TEM	
Penetración	60 - 60 - 60	42 - 39 - 41	38	42 - 39 - 41	39	42 - 40 - 40	52 - 50 - 52
Anillo y Bola	50.5 - 50.7	53.6 - 53.6	53.8 - 53.7	55.4 - 55.4	54.3 - 54.6	55.4 - 55.5	54.3 - 54.7
Rec. Elastic.	8,00%	36.1%	38.8%	31.1%	30.5%	13.8%	13.8%

Tras el proceso de mezclado y posteriores ensayos llevados a cabo; estos son:

Penetración (NLT-124)

Punto de reblandecimiento (NLT-125)

Recuperación elástica (NLT-329)

Queda patente una notable mejora en la recuperación elástica de las mezclas M6 y M7 con el caucho NECALFLEX que sobre el TEM (mezcla M8), por lo que determinamos que la mezcla sobre la que realizaremos el ensayo de Estabilidad al almacenamiento será la M6 60/70 + 10% NECA 0.4

Estabilidad al almacenamiento (NLT- 328)

	<b>ORIGINALES</b>	<b>PARTE SUPERIOR</b>	<b>PARTE INFERIOR</b>	<b>DIFERENCIA</b>
<b>PENETRACIÓN</b>	40	33 – 35 – 32 <b>33.3</b>	45 – 48 – 40 <b>44.3</b>	<b>11</b>
<b>ANILLO Y BOLA</b>	53.7	53.4 – 53.7 <b>53.5</b>	48.4 -48.8 <b>48.6</b>	<b>-4.9</b>
<b>REC. ELASTIC.</b>	37.5	11% <b>11%</b>	36% <b>36%</b>	<b>0.25</b>

Tras este ensayo se aprecian diferencias significativas en el índice de penetración, con un valor de 11 puntos, los de reblandecimiento anillo-bola de -4,9 y la recuperación elástica una mínima diferencia de 0.25 puntos; determinando una mezcla de no llega a cumplir en sus características reológicas con ningún betún modificado.

**Fase 3: ESTUDIO COMPARATIVO CON MEZCLAS DE BETÓN 60/70 Y 150/200 EN DIFERENTES PROPORCIONES MÁS LA ADICIÓN DE LOS DOS TIPOS DE CAUCHO EN PROPORCIONES DEL 10% Y DEL 14%.**

Esta tercera fase del estudio pretende demostrar que la optimización de un betón convencional al que añadimos caucho procedente de NFUs, puede variar en diferentes requerimientos, por lo que dependiendo de las necesidades del tipo de betón modificado, necesitaremos adecuar las proporciones de betunes y caucho, con el objetivo de obtener un producto mejorado y adecuado a las especificaciones requeridas, quedando en todo momento patente la salida ecológica del neumático fuera de uso. Las muestras serán nombradas con la numeración del 9 al 11; esto es, M9, M10 y M11.

De lo expuesto anteriormente y teniendo como referencia el cuadro que reflejo y que muestra las especificaciones de los betunes modificados:

Característica	Unidad	BM-1		BM-2		BM-3a		BM-3b		BM-3c		BM-4		BM-5	
		Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
<b>Betún original</b>															
Penetración (25 °C; 100g; 5s)	0.1 mm	15	30	35	50	55	70	55	70	55	70	80	130	150	200
Punto reblandecimiento anillo	°C	70	-	65	-	58	-	60	-	65	-	60	-	55	-
Punto de fragilidad Fraass	°C	-	-4	-	-8	-	-10	-	-12	-	-15	-	-15	-	-20
Ductilidad (5 cm a 5°C)	cm	-	-	2	-	4	-	25	-	30	-	40	-	50	-
	a 25°C	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Consistencia (flotador a 60°C)	s	3000	-	2000	-	700	-	1200	-	2000	-	1200	-	1200	-
Estabilidad al almacenamiento	°C	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5
Diferencia Punto Reblandecimiento	0.1 mm	-	5	-	8	-	10	-	10	-	10	-	12	-	20
Diferencia Penetración (25°C)															
Recuperación a 25°C	%	-	-	10	-	15	-	40	-	70	-	60	-	60	-
	40°C	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Contenido en agua (en volumen)	%	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2
Punto de Inflamación	°C	235	-	235	-	235	-	235	-	235	-	###	-	200	-
Densidad relativa (25°C/25°C)		01/01/00	-	01/01/00	-	01/01/00	-	01/01/00	-	01/01/00	-	###	-	###	-
<b>Residuo después de película fina</b>															
Variación de masa	%	-	0.8	-	0.8	-	01/01/00	-	01/01/00	-	01/01/00	-	01/04/15	-	###
Penetración (25°C; 100g; 5s)	% p.o.	70	-	70	-	65	-	65	-	65	-	60	-	55	-
Variación del punto de reblandecimiento	°C	-4	8	-4	8	-5	10	-5	10	-5	10	-6	10	-6	10
Ductilidad (5 cm a 5°C)	cm	-	-	1	-	2	-	12	-	15	-	20	-	25	-
	a 25°C	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

En un primer paso añadimos sobre el betún duro 60/70 (80% en peso) un 20% de betún blando 150/200 con el fin de obtener una mezcla con mayor índice de penetración, lo cual logramos pero consecuentemente tenemos un significativo descenso del punto de reblandecimiento anillo-bola y principalmente el ángulo de porcentaje recuperado no tiene un valor siquiera medible, por tratarse de un betún demasiado blando y deformable.

En un segundo paso, sobre estos porcentajes de betún, añadimos un 14% de caucho necalflex y americano tem, e inmediatamente nos percatamos de que los índices de penetración bajan, sube el punto de reblandecimiento y la recuperación elástica, principalmente en el producto M10

BETÚN	M9 MEZCLA DE BETUNES DE 80% DE 60/70 CON 20% DE 150/200							
VALORES	60/70	150/200	M9 MEZCLA		M 10 MEZCLA+14%NECA0.4	M11 MEZCLA + 14% TEM		
PENETRACIÓN	60	225	90 – 90 – 92	90.3	44 – 45 – 43	44	51 – 52 – 51	53.3
ANILLO Y BOLA	50.6	38	46.1 – 46.6	46.4	63 - 63	63	53.2 – 53.3	53.3
REC. ELASTIC.	5,00%	-	-	-	42,00%	42,00%	16,00%	16,00%

Pero ninguna de las mezclas obtenidas, llega a cumplir con todas las especificaciones requeridas para un betún modificado.

De los resultados obtenidos podemos derivar el estudio hacia la mayor proporción de adición de betún blando 150/200 con el objetivo de “ablandar” más el producto resultante ya que podemos continuar con la adición de mayor porcentaje de caucho, puesto que el PG-4 nos indica que la proporción máxima debe ser del 20% sobre el total de la mezcla.

BETÚN	M12 MEZCLA DE BETUNES 70% DE 60/70 CON 30% DE 150/200							
VALORES	60/70	150/200	M12 MEZCLA		M13 MEZCLA + 14% NECA 0.4	M14 MEZCLA + 14% TEM		
PENETRACIÓN	60	225	90 – 90 – 92	91.3	43-43-44	43.3	45-50-45	46.6
ANILLO Y BOLA	50.6	38	46.1 – 46.6	46.8	65.4-65.4	65.4	64.1-64.2	64.1
REC. ELASTIC.	5,00%	-	-	-	50,00%	50,00%	45,00%	45,00%

Tras las dosificaciones y los ensayos, no se aprecia ninguna mejora global como producto que cumpla las especificaciones, si bien es cierto que la M14 ha aumentado considerablemente su ángulo de recuperación respecto a la M11.

Así pues nos trazamos una línea mixta de ensayo en la que mantendremos las proporciones del 70% de 60/70 más el 30% de 150/200 pero reducimos el porcentaje de caucho al 10% que como ya vimos en fases anteriores, nos aportó buenos productos resultantes. Las muestras se denominarán M15, M16 y M17.

BETUN	M15 MEZCLA DE BETUNES DE 70% DE 60/70 CON 30 DE 150/200					
VALORES	M15 MEZCLA		M16 + MEZCLA 10% NECA 0.4		M17 MEZCLA + 10% TEM 0.8	
PENETRACIÓN	82-81-86-81	82.5	57-61-62-57	59.3	55-50-55	53.3
ANILLO Y BOLA	49-49.4	49.2	55.4- 55.6	55.5	62.4-62.5	62.4
REC. ELASTIC.	8,3%	8.3%	22%	22%	38%	38%

Realizadas las mezclas y los referenciados ensayos, destacamos la M17 por encima del resto, puesto que en los tres valores de referencia se sitúa en un comportamiento muy cercano a un betún modificado BM3a.

Comprobemos ahora que sucede si aumentamos la proporción del betún 150/200 hasta un 40% por lo que el betún 60/70 formará parte en un 60% restante y aumentaremos el porcentaje de caucho neca 0.4 hasta un 14% al igual que el tem 0.8 y de este último aumentaremos hasta un 15% de tem.

Por una parte estamos reblandeciendo el betún resultante, pero por otra, al aumentar las cantidades de caucho la viscosidad se ve aumentada.

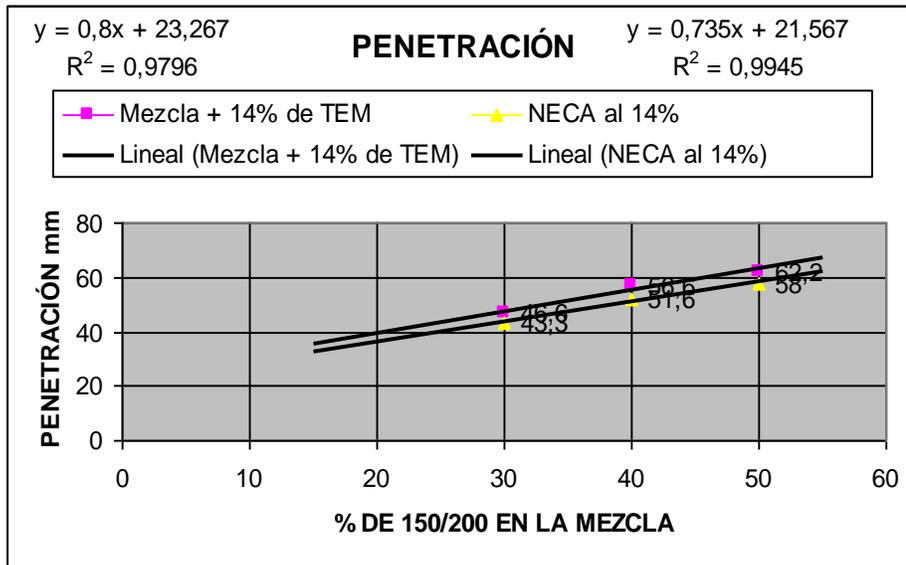
BETUN	M18 MEZCLA DE BETUNES DE 60% DE 60/70 CON 40% DE 150/200							
VALORES	M18 MEZCLA		M19 + MEZCLA 14% NECA 0.4		M20 MEZCLA + 14% TEM 0.8		M21 MEZCLA + 15% TEM 0.8	
PENETRACIÓN	105-105-110	106.6	50-55-50	51.6	59-55-56	56.6	55-57-55-54	55.2
ANILLO Y BOLA	44.6-45	44.8	64.5-65.2	64.8	55.6-55.3	55.4	56.9-56.9	56.9
REC. ELASTIC.	N/A	N/A	50%	50%	28%	28%	32%	32%

En los tres productos obtenidos, hemos logrado acercarnos a las características de un betún modificado BM 3a, al igual que sucedía con la M17.

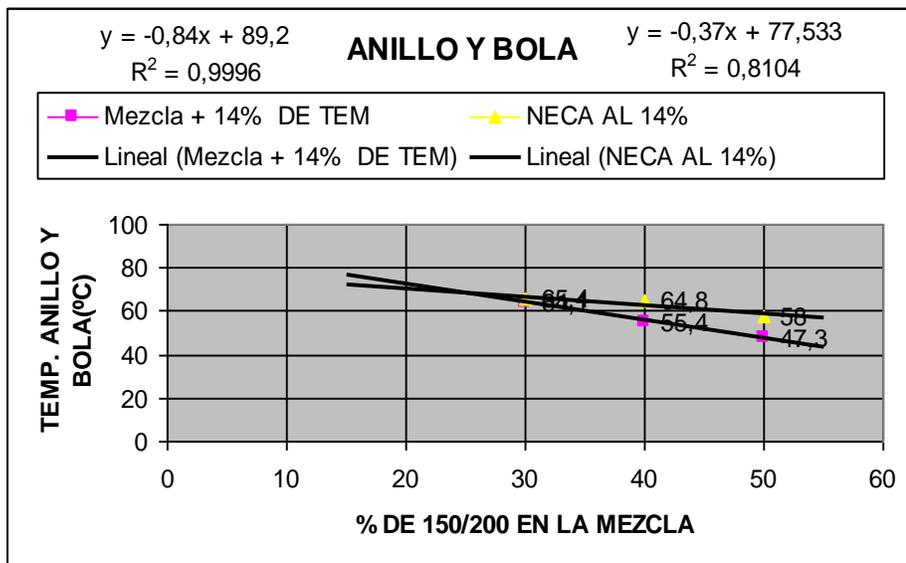
Por último igualamos las proporciones de betún 60/70 y betún 150/200 en un 50%, manteniendo el 14% de neca 0.4 y de tem; en principio, debería resultar un producto más blando que los anteriores, pero realmente mantenemos el porcentaje de ángulo recuperado y aumentamos el punto de reblandecimiento anillo-bola y reducimos el de penetración, con lo que conseguimos un betun-caucho que cumple con las especificaciones de un betún modificado BM 3a.

BETUN	M22 MEZCLA DE BETUNES DE 50% DE 60/70 CON 5 0% DE 150/200					
VALORES	M22 MEZCLA		M23 + MEZCLA 14% NECA 0.4		M24 MEZCLA + 14% TEM 0.8	
PENETRACIÓN	137-132-136	135	57-57-60	58.0	65-62-61	62.6
ANILLO Y BOLA	43.9-44.2	44	58-58.2	58.4	47.2- 47.5	47.3
REC. ELASTIC.	5.5%	5.5%	50%	50%	30%	30%

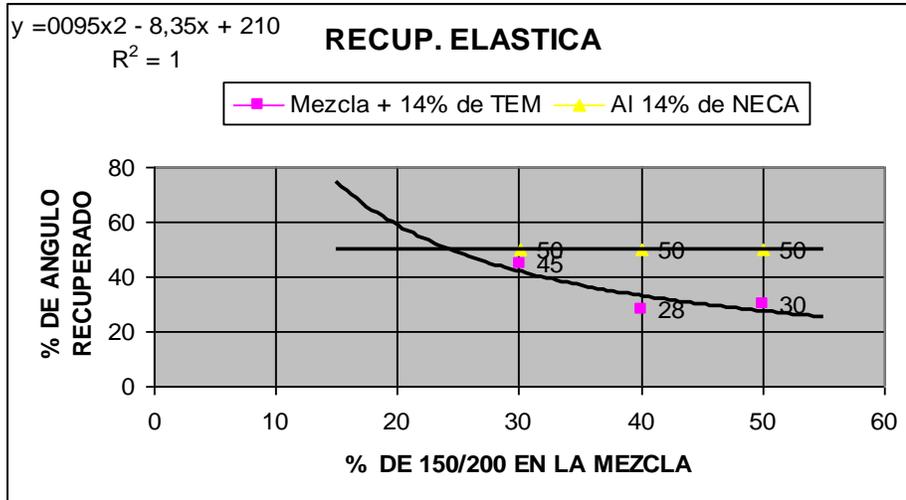
A continuación mostramos unos gráficos en los que se aprecia la evolución de la penetración, el punto de reblandecimiento anillo-bola y la recuperación elástica de las mezclas anteriormente estudiadas M10,M11,M3,M14,M19 y M20, mediante la progresiva adición de betún 150/200.



Como muestra el gráfico, a medida que añadimos % de betún 150/200, tanto en las mezclas con caucho NECA al 14% como en la de TEM al 14% también, aumenta el índice de penetración de manera directamente proporcional al crear un betún-caucho de características más blandas.



Sufriendo el mismo efecto pero en sentido contrario, ya que en este caso, al adicionar mayor porcentaje de 150/200 provocamos un descenso en el punto de reblandecimiento anillo-bola al ser un betún-caucho más blando.



A diferencia de los dos gráficos anteriores, en este caso, nos encontramos con una evolución diferente debido a que en el caso de la mezcla al 14% de caucho NECA, se obtiene una estabilización del porcentaje de ángulo recuperado pese al añadido continuo de betún 150/200.

En la mezcla con 14% de caucho TEM, si que tiene un efecto de reblandecimiento en los primeros porcentajes, pero al llegar al 50% de la proporción sobre betún 60/70, se tiende hacia una estabilización de este ángulo recuperado, lo que nos indica que hemos llegado a un punto de mezcla óptima.

## 8.- PRESUPUESTO ECONÓMICO

En el presupuesto económico diferenciaremos el coste total del equipamiento empleado en la elaboración de los ensayos y el coste costal de ingeniería necesaria para completar todo el estudio. Por último tendremos un coste total resultado de la suma del importe de equipamiento y el de ingeniería. En todos los casos, los precios indicados incluyen el IVA .

Diferenciamos en si los equipos fueron comprados, en cuyo caso los indicaremos por unidad, o por el contrario, si ya formaban parte del material de laboratorio, indicaremos el precio de lo que nos costó en base al tiempo de utilización.

Referencia	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio/Ud.	Total (€)
<b>Eq. 1</b>	h	Tester Anillo-bola	36	140	0.11
<b>Eq. 2</b>	h	Penetrómetro para betunes	7.2	180	0.03
<b>Eq. 3</b>	h	Torsiómetro de betunes	36	220	0.16
<b>Eq. 4</b>	h	Estufa de desecación	240	1250	1.95
<b>Eq. 5</b>	Ud	Gradilla de hierro	1	210	210
<b>Eq. 6</b>	Ud	Probetas de aluminio	1x21	16	336
<b>Total Equipamiento (€)</b>					<b>548,25</b>

Sumatorio de todo el tiempo de elaboración del PFC desglosado en los conceptos indicados en la siguiente tabla.

Referencia	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio/Ud.	Total (€)
<b>Ing. 1</b>	h	Búsqueda bibliográfica	40	15	600
<b>Ing. 2</b>	h	Realización de ensayos	150	15	2250
<b>Ing. 3</b>	h	Análisis de los resultados	60	15	900
<b>Ing. 4</b>	h	Redacción del PFC	80	15	1200
<b>Total Ingeniería (€)</b>					<b>4.950</b>

Referencia	Descripción	Total (€)
<b>Eq.</b>	Equipamiento	<b>548.25</b>
<b>Ing.</b>	Ingeniería	<b>4.950</b>
<b>Presupuesto final PFC (€)</b>		<b>5.498,25</b>

El presupuesto de elaboración del presente Proyecto Final De Carrera es de 10.448.25 € (**CINCO MIL CUATROCIENTOS MOVENTA Y OCHO EUROS CON VEINTICINCO CENTIMOS DE EURO**).

## 9.- CONCLUSIONES

En función de la dosificación y propiedades de los componentes se puede obtener un amplio abanico de betunes-caucho con penetraciones entre 20 y 150, o temperaturas de Anillo y Bola entre 40 y 80°C.

En líneas generales, en la dosificación del betún-caucho se debe tener en cuenta la composición del betún y del caucho, la granulometría, textura y dotación de las partículas de caucho y la temperatura y tiempo de mezclado.

El tipo de neumático del que procede el caucho, tiene una cierta influencia, siendo preferible los de camión por el efecto ya comentado en el envejecimiento del ligante. Independientemente, estos neumáticos de camión son los que más se reciclan porque permiten un mayor rendimiento de la instalación de trituración.

Los factores del CNR que influyen a las propiedades del ligante betún-caucho son la granulometría y la textura. Cuanto más fina sea la granulometría del material, mayor superficie ofrece al betún y consecuentemente más rápidamente reacciona (el tiempo de reacción es proporcional al cuadrado del diámetro de las partículas) y se consigue mayores aumentos de la viscosidad. No obstante, el polvo de caucho de granulometría más fina es también más caro.

A modo de resumen recuperamos las muestras que mejores resultados han obtenido, para que podamos apreciar que no solo tenemos un producto resultante optimizado; estos son:

M1: Betún 60/70 + 10% caucho TEM.

M6: Betún 60/70 + 10% caucho NECAFLEX 0.4

M17: (70% Betún 60/70 + 30% Betún 150/200) + 10% caucho TEM.

M19: (60% Betún 60/70 + 40 Betún 150/200) + 14% caucho NECAFLEX 0.4

M20: (60% Betún 60/70 + 40 Betún 150/200) + 14% caucho TEM.

M21: (60% Betún 60/70 + 40 Betún 150/200) + 15% caucho TEM.

Si bien es cierto que en nuestros ensayos hemos tendido a la creación de un betún caucho de especificaciones tipo BM 3a (por necesidades de servicio operativo), obteniendo varios productos que se adaptan al mismo, podemos deducir, que el caucho procedente de la molienda de los neumáticos fuera de uso es una fuente de recursos interminable, por la constante generación de estos neumáticos, y de carácter diversificado, puesto que el abanico de betunes-caucho que podemos generar es ajustable al tipo de firme sobre el que se necesite trabajar.

Este punto es de vital importancia debido a no tiene el uso limitado a determinadas situaciones geográficas, tal y como vimos anteriormente, si no que, es viable la generación de estos tipos de caucho en cualquier ámbito de red de carreteras, ya que el producto resultante de la adicción, no solo iguala, si no que mejora en muchas características al producto origen.

Este punto cobra mayor relevancia al dar una salida medioambientalmente limpia a un desecho muy contaminante y que en su quema produce muchos gases tóxicos de efecto invernadero.

## **10.- BIBLIOGRAFIA**

*El medio ambiente en España*  
*Escrito por Rosa M. Arce Ruiz*

*Análisis de la Eficiencia Medioambiental del Recauchutado de Neumáticos*  
*Escrito por Miguel Sánchez Lozano & amp,amp,Marta Guzmán García*

*Contaminación ambiental: una visión desde la química*  
*Escrito por María nieves González Delgado, Carmen Orozco Barrenetxea, Antonio Pérez Serrano, Jose Marcos Alfayate Blanco, Francisco J. Rodriguez Vidal*

### **MONOGRAFÍAS CEDEX**

*CX0276 Influencia de los betunes en las deformaciones plásticas de las mezclas bituminosas. M72 aurelio Ruiz Rubio, ignacio Pérez Barreno isBN: 84-7790-378-6. 192 págs. 17x24 cm (2002)*

*CX0295 Manual de empleo de caucho NFU en mezclas bituminosas. M92 autores varios isBN: 978-84-7790-450-2. 96 págs. 17x24 cm (2007)*

### **NORMAS REFERENCIADAS**

*NLT-124 Penetración de los materiales bituminosos.*

*NLT-125 Punto de reblandecimiento anillo y bola de los materiales bituminosos.*

*NLT-329 Recuperación elástica.*

*NLT-328 Estabilidad al almacenamiento*

