

Capítulo

3

RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EN CALIENTE EN PLANTA

3.1. Introducción

Durante los últimos años, las diferentes administraciones de carreteras han tomado conciencia sobre la importancia de alargar el ciclo de vida de los materiales que forman parte de los firmes, pero en España, como en muchos otros países, la construcción de una nueva carretera o el refuerzo y acondicionamiento de las existentes está siendo llevado a cabo, en la mayoría de los casos, utilizando nuevos áridos y ligantes para la fabricación de las nuevas capas.

Esta práctica requiere la explotación de nuevas canteras o la sobreexplotación de las existentes, así como el consumo de grandes cantidades de betún nuevo, lo que supone un enorme y negativo impacto ambiental.

Por otra parte, cada día es más común en las obras de refuerzo o rehabilitación de firmes el empleo del procedimiento de fresado de las capas asfálticas envejecidas y reposición con nuevas mezclas, esta técnica da lugar a la generación de materiales con un alto potencial de reutilización de los áridos y ligante contenidos en ellos, pero que en muchos casos son llevados a vertederos con el problema de impacto ambiental que esto supone.

Parece claro pues, que desde el punto de vista ambiental y de aprovechamiento de materiales, las técnicas de reciclado son altamente interesantes y beneficiosas, sin embargo, en España, el reciclado de mezclas bituminosas en caliente en planta no ha sido un procedimiento comúnmente empleado hasta este momento.

Se entiende por “*Reciclado de Pavimentos Asfálticos en Caliente en Planta*” al proceso mediante el cual los materiales recuperados de capas bituminosas de firmes deteriorados o de mezclas nuevas que no han sido utilizadas por ser un excedente o por no haber cumplido con las especificaciones de proyecto, son mezclados con árido virgen, betún nuevo y/o agentes rejuvenecedores, en las proporciones adecuadas, para producir nuevas mezclas en caliente que cumplan con los requerimientos de calidad, resistencia y durabilidad exigidos para el tipo de capa en que serán utilizados.

El proceso de reciclado de pavimentos asfálticos en planta en caliente consiste básicamente, en retirar las capas bituminosas de los firmes envejecidos mediante el fresado o demolición, para transportar dicho material a una central de fabricación en la que es acopiado, caracterizado y eventualmente procesado, hasta cumplir con ciertas condiciones de tamaño, humedad etc.

Posteriormente es mezclado en caliente con áridos vírgenes, betún nuevo y/o agentes rejuvenecedores, para obtener una mezcla bituminosa compuesta en parte por material reciclado que es colocada y compactada en obra como si se tratara de una mezcla convencional.

Aunque también pueden utilizarse materiales recuperados de capas de firmes rígidos (no bituminosos) o desechos de construcción o demolición para fabricar mezclas asfálticas recicladas en caliente, en este caso nos referiremos específicamente a la reutilización de materiales provenientes de capas bituminosas de firmes para la fabricación de nuevas mezclas.

El material recuperado de pavimentos asfálticos envejecidos se denominará en adelante **MBR** por las iniciales de “*Mezcla Bituminosa a Reciclar*”, aunque también es conocido por las iniciales **RAP** de su nombre en inglés “*Reclaimed Asphalt Pavement*”, y es uno de los elementos más importantes a tener en cuenta durante el proceso de reciclado de pavimentos ya que tiene gran influencia sobre las características del producto final.

De acuerdo con la “*Asphalt Recycling Guide*” de Austroads, se puede decir que, en general, el 100% de los materiales recuperados de pavimentos deteriorados son susceptibles de ser reciclados, ya sea en la misma obra en la que son generados, en otro pavimento (práctica más habitual) o con propósitos diferentes a la fabricación de firmes.

Generalmente, la utilización de mezclas recicladas está enfocada a la rehabilitación de firmes existentes, sin embargo, pueden formar parte de firmes de nueva construcción, sin que esto signifique un problema de calidad, resistencia o durabilidad.

El éxito de las políticas de reciclado de cualquier país, depende de tres aspectos fundamentales:

Económico

Como en casi todos los campos, la relación costo–beneficio, es la base de gran parte de las iniciativas para el reciclado de pavimentos. Por esto, es muy importante hacer un cuidadoso análisis para asegurar la factibilidad económica de la utilización del reciclado en los diferentes proyectos de construcción y rehabilitación de firmes.

Generalmente, el libre mercado se encarga de regular y de impulsar la reutilización de materiales en la construcción de carreteras, debido al ahorro que suelen generar las diferentes técnicas de reciclaje, sin embargo, en algunos casos, los gobiernos deben promover el reciclado, mediante la restricción de la utilización de vertederos, o con la aplicación de tasas elevadas por concepto de vertido o explotación de canteras, o dando apoyos económicos o tecnológicos a las empresas que realicen esfuerzos por reciclar.

Aún no existe un criterio generalizado de los muchos ahorros que significa la utilización del material recuperado de los pavimentos asfálticos. De acuerdo con ASTEC (1998), el MBR tiene básicamente el mismo valor que el material que reemplaza ya que pasa a formar una parte del árido virgen y del asfalto en una mezcla nueva.

Los ahorros económicos que puede generar la utilización de MBR en la fabricación de mezclas nuevas es diferente en cada caso y para calcularlo es necesario tomar también en cuenta los costes suplementarios que ocasionan, entre los que se encuentran los siguientes:

- Coste del fresado de las capas bituminosas y su acarreo a la planta (en muchos casos no hay que tomar en cuenta este valor en el precio de la mezcla reciclada, ya que muchos proyectos de rehabilitación incluyen el fresado de las capas deterioradas y su acarreo).
- Coste del tratamiento del MBR en la planta para su correcta utilización.
- Coste de la adaptación de las plantas asfálticas para recibir el MBR.

Cabe mencionar que los ahorros reales de una planta no dependen en muchos casos del porcentaje de MBR que utilicen en la fabricación de las mezclas sino de la posibilidad de utilización de todo el MBR que tengan disponible.

Es muy importante analizar detalladamente cada caso, para comprobar si las mezclas recicladas en caliente en planta cumplen con las especificaciones de proyecto y decidir si es económicamente viable su utilización.

Medioambiental

Este aspecto cada día toma mayor importancia, debido al deterioro que presentan los recursos naturales de todo el mundo. La construcción de carreteras requiere de grandes volúmenes de materiales, tales como, áridos, ligantes, etc. y se pretende reducir al máximo su consumo.

El reciclado de materiales en la construcción y rehabilitación de carreteras, es un buen camino para disminuir el consumo de materiales nuevos y al mismo tiempo reducir la explotación de canteras. Al reciclar las capas bituminosas y aprovechar el ligante que contienen, se logra disminuir el consumo de betún.

Al reciclar, se reducen también los volúmenes de vertido, que en algunos países es una práctica casi imposible, debido a la falta de espacio y a las fuertes regulaciones que cada vez más administraciones adoptan.

También es muy importante analizar las diferentes técnicas de reciclaje que se apliquen en la construcción y rehabilitación de carreteras, para evitar que durante su ejecución se afecte al medioambiente.

Tecnológico

Actualmente, las técnicas de reciclado están bastante adelantadas en muchos países, aunque en España se cuenta con poca experiencia en algunas de ellas, tal es el caso del reciclado de pavimentos asfálticos en planta en caliente.

La maquinaria y equipo para el reciclado de pavimentos es cada día más eficiente y especializada, lo que motiva a muchas administraciones y empresas a apostar por este tipo de tecnología que cada vez cuenta con mayor aceptación.

Algunos países cuentan con una legislación que les permite exigir el reciclado de ciertos porcentajes en la rehabilitación y construcción de carreteras, además de contar con especificaciones para estos casos particulares.

La mayoría de las administraciones que utilizan técnicas de reciclado exigen que los materiales reciclados cumplan con las mismas especificaciones que los materiales nuevos y que presenten un comportamiento similar en campo, lo cierto es que en muchos casos, los ensayos convencionales no predicen con exactitud el comportamiento de los materiales reciclados, y por esto, es necesario desarrollar métodos específicos para el diseño y control de calidad de los firmes que contengan materiales reciclados.

3.2. Experiencia en la utilización de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta

El reciclado de pavimentos asfálticos en caliente no es una idea nueva ya que en Estados Unidos se comenzó a utilizar desde 1915, aunque las obras con esta técnica fueron muy escasas durante varias décadas debido al bajo precio del betún y a que los equipos no estaban adaptados para utilizar esta técnica.

Fue a principios de los años 70's cuando el reciclado de pavimentos comenzó a tener gran importancia debido principalmente a la crisis del petróleo, al aumento de los precios del betún y al creciente interés por la conservación de la energía y del medio ambiente.

Algunos países dieron gran impulso a estas técnicas, principalmente Estados Unidos que pasó de 50,000 toneladas de mezcla bituminosa reciclada en el año 1975 a 25 millones de toneladas en 1980.

De acuerdo con Anderson (1996), en el estado de Washington se han utilizado mezclas bituminosas con MBR para la construcción y rehabilitación de firmes desde el año 1977, lográndose reutilizar entre 1977 y 1981 mas de 23,000 toneladas de MBR.

En 1991 el WSDOT (*Washington State Department of Transportation*) comenzó a estudiar el material recuperado de las carreteras que rehabilitaban para su reutilización y cinco años mas tarde publicó una serie de recomendaciones para el uso de material reciclado en las mezclas bituminosas, entre las más relevantes tenemos las siguientes:

- Se permite la utilización de hasta un 20% de MBR en la fabricación de mezclas nuevas sin necesidad de un diseño específico.
- Se permite la utilización de hasta un 80% de MBR en la fabricación de mezclas nuevas siempre que se cumplan con los mismos criterios de diseño empleados para las mezclas convencionales.

Después de haberse realizado dichos estudios y del impulso que significaron para el reciclado de mezclas, se logró alcanzar, en el estado Washington, unos volúmenes de reutilización de entre 100,000 y 200,000 toneladas de MBR cada año.

Tabla 3.2.1 Porcentajes de MBR permitidos en cada estado de los Estados Unidos (Fuente: User guidelines for waste and byproducts materials in pavement construction <www.tfhr.gov>)

Estado	% máx. de MBR-Plantas discontinuas			% máx. de MBR-Plantas continuas			Tamaño máx. MBR
	Base	Intermedia	Rodadura	Base	Intermedia	Rodadura	
Alabama	40	40	15	50	50	15	2 in
Alaska	-	-	-	-	-	-	-
Arizona	30	30	30	30	30	30	1.5 in
Arkansas	70	70	70	70	70	70	3 in
California	50	50	50	50	50	50	2 in
Colorado	15	15	15	15	15	15	1.5 in
Connecticut	40	40	40	40	40	40	2 in
Delaware	35	35	25	50	50	30	2 in
Florida	60	50	0	60	50	0	-
Georgia	25	25	25	40	40	40	2 in
Hawái	30	0	0	40	0	0	1.5 in
Idaho	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	2 in
Illinois	50	25	15	50	25	15	-
Indiana	50	50	20	50	50	20	2 in
Iowa	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	1.5 in
Kansas	50	50	50	50	50	50	2 in
Kentucky	30	30	30	30	30	30	-
Louisiana	30	30	0	30	30	0	2 in
Maine	40	40	0	40	40	0	1 in
Maryland	Abierto	Abierto	Limitado	Abierto	Abierto	Limitado	-
Massachusetts	20	20	10	40	40	10	0.75 in
Michigan	50	50	50	50	50	50	-
Minnesota	59	50	30	50	50	30	3 in
Mississippi	30	30	15	30	30	15	2 in
Missouri	50	50	50	50	50	50	1.5 in
Montana	50	50	10	50	50	10	2 in
Nebraska	No se utiliza	No se utiliza	No se utiliza	Abierto	Abierto	Abierto	2 in
Nevada	50	50	15	50	50	15	1.5 in
New Hampshire	35	35	15	50	50	15	-
New Jersey	25	25	10	25	25	10	2 in
New Mexico	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	1.5 in
New York	50	50	0	70	70	0	2 in
North Carolina	60	60	60	60	60	60	2 in
North Dakota	50	50	50	50	50	50	1 in
Ohio	50	35	20	50	35	20	2 in
Oklahoma	25	25	0	25	25	0	2 in
Oregon	30	20	20	30	20	20	1 in
Pennsylvania	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	2 in
Rhode Island	30	30	0	30	30	0	1.25 in
South Carolina	30	25	20	30	25	20	2 in
South Dakota	No se utiliza	No se utiliza	No se utiliza	50	50	50	1.5 in
Tennessee	15	Abierto	0	Abierto	Abierto	0	Abierto
Texas	15	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	2 in
Utah	No se utiliza	No se utiliza	No se utiliza	25	25	25	2 in
Vermont	-	-	-	-	-	-	-
Virginia	25	25	25	25	25	25	2 in
Washington	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto
West Virginia	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto
Wisconsin	Abierto	35	20	Abierto	35	20	Abierto
Wyoming	50	50	50	50	50	50	2 in

Casi todas las administraciones de los Estados Unidos presentan una situación similar en cuanto a la utilización de MBR para la fabricación de mezclas recicladas en caliente en planta, sin embargo, cada estado cuenta con sus especificaciones en cuanto al porcentaje de MBR permitido dependiendo del tipo de planta que se utilice para su fabricación tal como se muestra en la tabla 3.2.1.

Queda claro entonces, que la mayoría de las administraciones de los Estados Unidos consideran el reciclado de pavimentos asfálticos en caliente en planta como una práctica habitual para la rehabilitación de firmes. Además han logrado obtener resultados tan satisfactorios como los que se consiguen con las mezclas convencionales gracias a un adecuado control de todo el proceso de fabricación y puesta en obra de las mezclas recicladas y al gran apoyo de las administraciones, de la *Federal Highway Administration* y de la *National Asphalt Pavement Association* entre otros organismos.

Al igual que los Estados Unidos, Canadá empezó a trabajar con el reciclado de pavimentos asfálticos hace varias décadas y por tanto es uno de los países punteros en la utilización de estas técnicas.

Con todos estos años de experiencia, las administraciones canadienses han llegado a establecer una serie de especificaciones para el uso del MBR en la fabricación de mezclas nuevas, y el Ministerio de Transportes de Ontario ha definido parámetros que deben cumplir el MBR y la mezcla final mediante el empleo del ensayo Marshall.

En 1990 los canadienses reciclaron 530,000 toneladas de MBR y 788,000 fueron acumuladas para su posterior reutilización, y al año siguiente, solamente en la provincia de Ontario se reutilizaron 1.3 millones de toneladas de MBR de los cuatro millones de toneladas obtenidas.

En la tabla 3.2.2 se muestra la experiencia que se tenía en las diferentes técnicas de reciclado de mezclas asfálticas y los porcentajes de MBR utilizados en los distintos territorios de Canadá a principio de los 90's.

Tabla 3.2.2 Experiencia en el reciclado de pavimentos asfálticos en Canadá (Fuente: Emery 1993)

Provincia o Territorio	Experiencia de reciclado in situ	Experiencia de reciclado en planta	Años de experiencia	Porcentajes de MBR
British Columbia	Si	Si	11	20-40
Alberta	Si	Si	9	>40
Saskatchewan	Si	Si	10	30-70
Manitoba	No	Si	3	30-50
Ontario	Si	Si	13	15-50
Quebec	Si	Si	13	15-30
PEI	No	No	No aplicable	No aplicable
New Brunswick	No	Si	10	>45
Nova Scotia	No	Si	6	>35
Newfoundland	No	No	No aplicable	No aplicable
Yukon	No	Si	Se desconoce	Se desconoce
NWT	No	No	No aplicable	No aplicable

De acuerdo con Emery (1993), Los técnicos Canadienses han dejado de considerar el MBR como un residuo, ya que trabajado correctamente puede sustituir grandes porcentajes de material nuevo.

El reciclado en planta en caliente ha presentado un significativo crecimiento en Canadá y muchas agencias y empresas se están especializando en esta industria para lograr mejores rendimientos, y no se descarta que en un futuro las mezclas recicladas sustituyan a las convencionales.

Las técnicas de reciclado de mezclas en caliente desarrolladas en Estados Unidos a comienzos de los años 70's llegaron a Europa a finales de esa década, y hay numerosos países europeos, especialmente Alemania, Austria, Holanda y Dinamarca, que las han utilizado con regularidad logrando mezclas recicladas con un comportamiento equivalente al de las mezclas convencionales fabricadas en caliente.

Desde hace años, algunos países europeos como Bélgica, están investigando y trabajando en la reutilización de los materiales provenientes del fresado o escarificado de pavimentos.

De acuerdo con Van Heystraeten et. al. (1991 y 1993), el reciclado en planta se inició en este país en 1980, pero fue entre 1983 y 1985 cuando presentó un mayor desarrollo. Ya para 1986 se contaba en Bélgica con 65 centrales preparadas para el reciclado, de las cuales, 5 eran continuas y el resto discontinuas, sin embargo en ese año el precio del betún cayó, y se perdió en gran medida el interés por reciclar, pero en 1989 las tasas por concepto de vertido de residuos aumentaron drásticamente y desde entonces el reciclado de pavimentos no ha dejado de ser una práctica habitual en la construcción y rehabilitación de carreteras en este país.

En la tabla 3.2.3 se puede observar la cantidad de material fresado de pavimentos que generaron algunos países europeos en el año 2001, los porcentajes que reciclaban en caliente y el porcentaje de mezclas recicladas generadas sobre el total que fabricaron.

Tabla 3.2.3 Generación de MBR y utilización en la fabricación de mezclas recicladas de diferentes países de Europa (Fuente: EAPA, 2002)

País	Material fresado generado (x 1000 t)	Utilización del material fresado en mezclas recicladas en caliente (%)	Mezclas recicladas sobre el total fabricado (%)
Alemania	15000	15-80	60-65
Austria	-	-	3
Bélgica	1500	20-45	25
Croacia	20000	0	10
Dinamarca	220	57	31
Eslovenia	50	60	15
Finlandia	200	40	5-10
Francia	<5000	10-45	<10
Holanda	30000	70	60
Hungría	1200	0.3	-
Italia	13000	15	5
Noruega	520	6	4
Polonia	750	15-30	0.3
Reino Unido	5000	-	-
República Checa	710	10-40	16
Rumania	80	20-40	40
Suecia	1000	15	19
Suiza	1750	15	-

Como se observa en la tabla anterior, Dinamarca ya contaba a mediados de los 90's con una amplia experiencia en el reciclado de pavimentos y lo consideraban como una práctica habitual.

En la actualidad, los daneses cuentan con una amplia red de plantas asfálticas que se encargan de recibir y reciclar el material bituminoso de pavimentos envejecidos y utilizan las mismas especificaciones para las mezclas recicladas que para las convencionales, basando el diseño de los firmes fabricados con mezclas recicladas en el método Marshall.

Durante los últimos años, el uso de materiales reciclados para la construcción de carreteras se ha venido incrementando en todo el mundo. Esto se debe, a que cada día más gobiernos adoptan políticas para minimizar el empleo de materiales nuevos, y promover el empleo de materiales reciclados, además de los grandes avances tecnológicos que en este campo se han logrado en los últimos años y que facilitan cada vez más su empleo.

Por otra parte, el almacenamiento de los residuos es cada vez más costoso, debido al espacio necesario y a las limitaciones ambientales que se incrementan cada día. Este problema, ha llegado a puntos insostenibles en algunos países con gran densidad de población, y aunque España cuenta aún con suelo abundante para vertederos, la preocupación por el medio ambiente y las regulaciones de la Comunidad Europea, restringen cada vez más su utilización.

De acuerdo con la Federal Highway Administration (2000), Holanda, Dinamarca, Alemania, Suecia y Estados Unidos son algunos de los países que tienen actualmente los mayores porcentajes de mezclas fabricadas con materiales reciclados y cuentan con la tecnología y experiencia suficiente para considerar una práctica normal el reciclado de pavimentos.

En la tabla 3.2.4 y en la figura 3.2.1, se muestran los volúmenes anuales estimados actualmente, de producción y utilización de MBR en algunos de los países con mayor experiencia en el reciclado de pavimentos en el mundo.

Tabla 3.2.4 Generación y reutilización anual de MBR en diferentes países (Fuente: *Recycled Materials in European Highway Environments, 2000*)

País	Reutilización del MBR producido (%)	MBR producido (10 ⁶ t)	MBR reutilizado (10 ⁶ t)
Estados Unidos	80	41	33
Suecia	95	0.88	0.84
Alemania	55	13.2	7.3
Dinamarca	100	0.53	0.53
Holanda	100	0.12	0.12

La estrategia comunitaria se dirige a reducir la cantidad de residuos en origen, reutilizando y reciclando todo lo que sea factible para eliminar únicamente lo que no sea posible tratar de otra manera, y es por esto que se está presionando a las diferentes administraciones europeas para que fomenten el reciclado del material fresado de los pavimentos envejecidos y lo reutilicen en la fabricación de nuevas mezclas.

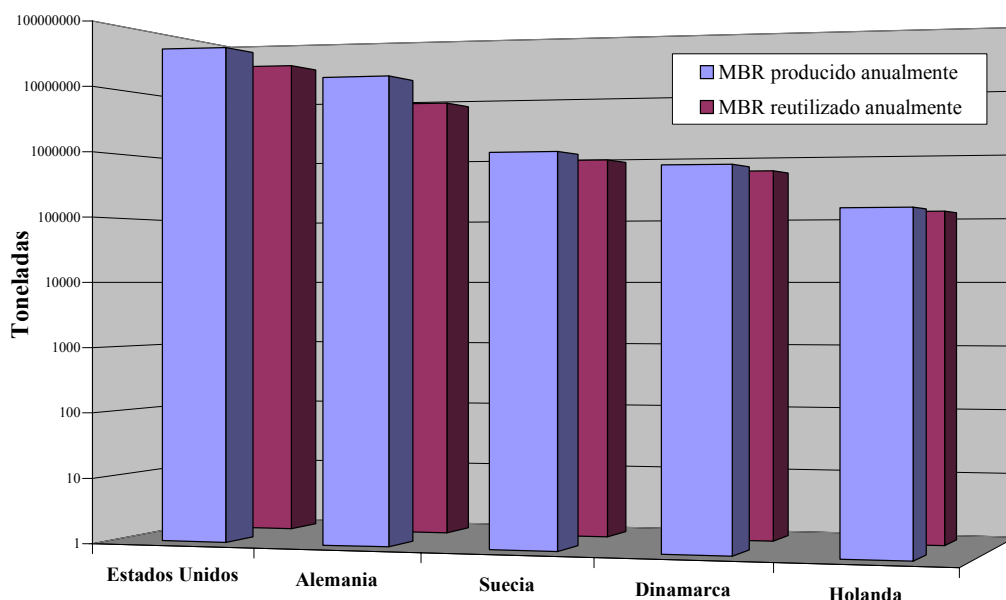


Fig. 3.2.1 Volúmenes de MBR producido y reutilizado por algunos de los países con mayor experiencia en el reciclado de pavimentos asfálticos (Fuente: *Recycled Materials in European Highway Environments, 2000*)

En España se presentó a principios de los 80's un interés inicial por el reciclado en central y parte del impulso de estos años en las centrales de tambor-secador-mezclador fue debido a las posibilidades que ofrecían para el reciclado de mezclas.

De acuerdo con Ruiz (2001), las principales experiencias se dieron en Cataluña, impulsadas por ACESA, pero la bajada de precios del betún que se produjo en la primera mitad de los 80 llevó a que el reciclado perdiese interés al poco tiempo de que se empezasen a hacer los primeros tramos.

Según Del Pozo (2001), la concesionaria ACESA ha venido utilizando tímidamente el reciclado de mezclas asfálticas en caliente desde 1983, utilizando porcentajes menores al 20% de MBR para capas de base e intermedias en obras de rehabilitación de firmes en las autopistas A-2 y A-7.

En 1986 ACESA llevó a cabo un proyecto de investigación en colaboración con REPSOL para poner a punto un rejuvenecedor que compensara las alteraciones en la composición química y estructura coloidal del betún envejecido contenido en el MBR. A estos efectos se construyó un tramo de ensayo de aproximadamente 1.5 km en la autopista A-2 para estudiar el proceso de envejecimiento del ligante y la degradación de la mezcla sometida a condiciones reales, obteniéndose resultados satisfactorios.

Posteriormente aunque hubo un nuevo impulso en el reciclado en los años 90, se ha referido principalmente al reciclado in situ en frío, por las ventajas económicas que ofrece, de cualquier forma hay indicios de que en los próximos años se puede ver un importante desarrollo del reciclado en caliente en central con la aparición de la normativa específica para la fabricación de mezclas recicladas en caliente en planta, además de que se cuenta con experiencias muy recientes de la aplicación de esta técnica en Cataluña y Andalucía.

En 1999 se inició en Andalucía la rehabilitación estructural de la autovía A-92 por parte de GIASA (Gestión de infraestructuras de Andalucía, S.A.). En la provincia de Granada

se rehabilitó un tramo de 15 km de firme utilizando una capa de base tipo G-25 que contenía un 25% de MBR (Belmonte et.al., 2001).

La mezcla reciclada se llevó a cabo en una planta de tambor-secador-mezclador con añillo central para incorporación de MBR, utilizándose un total de 160,000 toneladas de mezcla reciclada con unos resultados satisfactorios.

En Cataluña, la empresa RUBAU S.A. después de realizar numerosos ensayos y consultas y tras el informe favorable que emitió el Centro de Estudios de Carreteras, decidió iniciar a principios de 1998 el montaje de la primera planta discontinua de España adaptada expresamente para el reciclado de mezclas asfálticas en caliente.

Según Pellicé (2001), a mediados de 1998 ya estaba preparada la planta para fabricar mezclas recicladas, y se extendieron experimentalmente este tipo de mezclas en 500 metros de la variante de Palamós, desde entonces, RUBAU está fabricando mezclas recicladas en caliente en planta con buenos resultados.

En la tabla 3.2.5 se muestran las principales obras en las que se han colocado las mezclas recicladas por la empresa RUBAU entre los años 1998 y 2001, así como los volúmenes de mezcla reciclada utilizados en cada caso.

Tabla 3.2.5 Obras en las que la empresa RUBAU ha utilizado mezclas recicladas en caliente en planta
(Fuente: Pellicé, 2001)

Obra	Volumen de mezcla reciclada colocado
Variante de Cassà de la Selva	10,000 ton.
Refuerzo de firme GI-512 tramo Tordera-Maçanet	4,000 ton.
Refuerzo de firme de vial exterior del Polígono Industrial de Celrà	2,000 ton.
Refuerzo de firme C-25 tramo Gurb-Riudellots de la Selva (Eje transversal)	38,000 ton.

A principios de 1999 otra empresa catalana, PABASA, adaptó su planta discontinua para el reciclado de mezclas asfálticas en caliente en planta, convirtiéndose de esta forma en la segunda empresa de Cataluña y de España con la infraestructura suficiente para realizar grandes volúmenes de mezclas de este tipo.

De acuerdo con Moreno (2001), después de algunos ajustes, PABASA consiguió, en diciembre de 1999, fabricar 3,000 toneladas de mezcla reciclada tipo G-25 con un 10% de MBR, extenderlas y compactarlas en un polígono industrial próximo a Barcelona. El resultado inicial fue satisfactorio y se dará seguimiento a la evolución de la mezcla en función del tráfico y del tiempo.

En el año 2000 PABASA realizó dos tramos de prueba, el primero en varios polígonos del Maresme, donde se extendieron casi 12,000 toneladas de mezcla G-25 con un 30% de MBR en capas de base. El segundo tramo se ejecutó en la obra "Conexión de la A-18 con la N-150 en Sabadell", donde se extendieron unas 3,000 toneladas en capa de base de mezcla tipo G-20 con un 30% de MBR e intermedia con mezcla S-20 y también 30% de MBR.

Analizando todo lo anterior, se puede decir con certeza, que el reciclado de mezclas asfálticas en planta en caliente es una técnica adecuada y con un gran potencial de futuro a nivel mundial, para la reutilización de los materiales recuperados de pavimentos envejecidos en la fabricación de mezclas nuevas.

3.3. Materiales empleados en la fabricación de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta

Al igual que ocurre en la fabricación de mezclas bituminosas convencionales, cuando se elaboran mezclas recicladas, es muy importante conocer las características de los materiales que serán empleados en su fabricación, para de esta manera lograr una fórmula de trabajo adecuada y garantizar que el comportamiento final de la mezcla cumplirá con todas las especificaciones requeridas en cada caso.

A continuación se describirán cada uno de los materiales que forman parte de una mezcla bituminosa reciclada en planta en caliente y las características y especificaciones que deberán cumplir:

Material fresado de pavimentos asfálticos (MBR)

Como se ha mencionado anteriormente, MBR es el término dado a los materiales recuperados de pavimentos asfálticos y está compuesto básicamente de betún envejecido y áridos. Estos materiales se generan cuando un pavimento asfáltico es retirado para su rehabilitación o reconstrucción, generalmente se utiliza el fresado en frío para obtenerlo, aunque también se pueden emplear la escarificación en caliente o la demolición y machaqueo de los firmes. En la figura 3.3.1 se observa una fresadora obteniendo MBR de un firme envejecido.



Fig. 3.3.1 Obtención de MBR mediante el fresado de pavimentos

Las propiedades del MBR dependen en gran medida de las características de los materiales que lo componen y del tipo de mezcla asfáltica del que proviene (rodadura, intermedia, base, etc.). Esto significa un problema, debido a que los acopios de MBR no siempre provienen de una misma obra y podemos encontrar variaciones significativas en cuanto a calidad de áridos y contenido y tipo de ligante.

Si se presentan problemas de heterogeneidad del MBR, será necesario hacer mezclados sucesivos hasta lograr contar con acopios lo más homogéneos posible para evitar tener grandes variaciones en las características de las mezclas fabricadas con dicho material.

En algunas administraciones se regula la variación de la granulometría del árido contenido en el MBR que no debe superar las tolerancias establecidas. En la tabla 3.3.1 se muestran las tolerancias en las variaciones de la granulometría, permitidas por el North Carolina Department for Transportation para la utilización de MBR en mezclas bituminosas recicladas.

Tabla 3.3.1 Tolerancia en la variación de cada fracción de la granulometría del árido del MBR con respecto a la granulometría de diseño (Fuente: QMS Manual NCDOT, 2002)

Tipo de mezcla	Base	Intermedia	Rodadura	Base	Intermedia	Rodadura	Base	Intermedia	Rodadura
	(0 - 15% MBR)			(15 - 25% MBR)			(más del 25% MBR)		
Contenido de ligante %	+/- 0.7%			+/- 0.4%			+/- 0.3%		
37.50mm	+/- 10	-	-	+/- 7	-	-	+/- 5	-	-
19.00mm	+/- 10	+/- 10	-	+/- 7	+/- 7	-	+/- 5	+/- 5	-
12.50mm	-	+/- 10	+/- 6	-	+/- 7	+/- 3	-	+/- 5	+/- 2
9.50mm	-	-	+/- 8	-	-	+/- 5	-	-	+/- 4
4.75mm	+/- 10	-	+/- 10	+/- 7	-	+/- 7	+/- 5	-	+/- 5
2.36mm	+/- 8	+/- 8	+/- 8	+/- 5	+/- 5	+/- 5	+/- 4	+/- 4	+/- 4
1.18mm	+/- 8	+/- 8	+/- 8	+/- 5	+/- 5	+/- 5	+/- 4	+/- 4	+/- 4
0.60mm	+/- 8	+/- 8	+/- 8	+/- 5	+/- 5	+/- 5	+/- 4	+/- 4	+/- 4
0.30mm	-	-	+/- 8	-	-	+/- 5	-	-	+/- 4
0.075mm	+/- 4	+/- 4	+/- 4	+/- 2	+/- 2	+/- 2	+/- 1.5	+/- 1.5	+/- 1.5

Tanto el proceso de fresado como el de machaqueo pueden causar cierta degradación en los áridos del firme, por esto la granulometría del árido del MBR suele ser más fina y densa que la del árido virgen que se utilizó para elaborar la mezcla de la que proviene.

El tamaño de las partículas de MBR y su distribución pueden variar dependiendo del tipo de equipo y de la velocidad utilizados para obtenerlo, del tipo de árido contenido en

el pavimento y de la posible contaminación con materiales de capas inferiores producida al remover el pavimento.

Durante la obtención del MBR se procura fresar y/o machacar el material hasta lograr un tamaño máximo de partículas de 38 mm, sin embargo, en la mayoría de los países donde se practica el reciclado en planta con regularidad, se procura que el tamaño máximo de las partículas de MBR sea de 20 mm para lograr mezclas más homogéneas.

Si no se cumple con los tamaños de partículas especificados, se deberá hacer un machaqueo secundario en planta hasta lograr los tamaños requeridos.

El análisis granulométrico de los áridos recuperados del material fresado es un dato muy importante para la dosificación de la mezcla reciclada y se lleva a cabo mediante el ensayo “*Análisis de los áridos recuperados de las mezclas bituminosas, NLT-165/90*”.

Para obtener una granulometría representativa del árido extraído, es necesario que el muestreo se realice con sumo cuidado y que el número de ensayos sea adecuado. Es muy importante que cada acopio sea caracterizado individualmente y si es necesario, se realizarán fórmulas de trabajo diferentes para cada uno.

Debido a que ha formado parte de una capa de un firme, se entiende que el árido que proviene del MBR cumplía en el momento de la ejecución del pavimento original con las especificaciones requeridas para este tipo de mezclas, pero no está de más comprobarlo, sobre todo si se utilizará para fabricar mezclas que formarán parte de capas de rodadura.

La variabilidad en la granulometría del árido aportado por el MBR puede significar un problema para el diseño de las mezclas, principalmente la cantidad de finos (partículas menores a 0.8 mm) y su efecto en la dispersión del nuevo ligante, por ello es conveniente poner especial cuidado en esta fracción.

En la tabla 3.3.2 se presentan los rangos típicos de distribución de los diferentes tamaños de las partículas del árido contenido en el MBR después del proceso de fresado o machaqueo, de acuerdo con estudios realizados en Estados Unidos por la *Federal Highway Administration* y contrastados con resultados medidos en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Tabla 3.3.2 Rango típico de distribución del tamaño de las partículas del MBR obtenido por fresado (Fuente: *User Guidelines for waste and byproducts materials in pavement construction* <www.tfhrc.gov>)

Tamiz	Porcentaje de pasa después del fresado y machaqueo del MBR
37.5 mm (1.5 in)	100
25 mm (1.0 in)	95 – 100
19 mm (3/4 in)	84 – 100
12.5 mm (1/2 in)	70 – 100
9.5 mm (3/8 in)	58 – 95
7.5 mm (No. 4)	38 – 75
2.36 mm (No. 8)	25 – 60
1.18 mm (No.16)	17 – 40
0.6 mm (No.30)	10 – 35 ^a
0.3 mm (No.50)	5 – 25 ^b
0.15 mm (No. 100)	3 – 20 ^c
0.075 mm (No. 200)	2 – 15 ^d
a. Normalmente menos del 30% b. Normalmente menos del 20% c. Normalmente menos del 15% d. Normalmente menos del 10%	

De acuerdo con la FHWA, la densidad del MBR fresado o procesado, depende del tipo de árido que lo compone y de su contenido de humedad, pero en general los valores se encuentran entre 1.940 y 2.300 g/cm³, valor ligeramente más bajo que el de los áridos naturales.

Los datos sobre el contenido de humedad del MBR almacenado son escasos, pero se ha observado que aumenta a lo largo del tiempo de almacenamiento y que es más difícil de secar que el árido virgen.

El material fresado absorbe gran cantidad de agua si se expone a la lluvia, llegando en algunos casos, durante tiempos de lluvia excesiva, a valores de 7 u 8% de humedad, por

lo que se recomienda reducir al mínimo los periodos de almacenamiento del MBR si no se cuenta con instalaciones cubiertas para colocarlo.

El contenido de ligante en el MBR es un dato fundamental, ya que será uno de los factores que definirá la proporción de ligante de aportación y/o rejuvenecedores necesarios para que la mezcla reciclada se comporte adecuadamente. Este valor lo obtendremos con el ensayo “*Contenido de ligante en mezclas bituminosas, NLT-164/90*”, utilizando como disolvente diclorometano, y como método de extracción cualquiera que implique la utilización de centrifugas de filler.

La solución de ligante en disolvente se someterá al ensayo “*Recuperación del ligante de mezclas bituminosas para su caracterización, NLT-353/85*”, preferentemente utilizando el método del destilador rotatorio. Una vez extraído el ligante, se procederá a los ensayos convencionales “*Penetración de los materiales bituminosos, NLT-124/84, Punto de reblandecimiento anillo y bola, NLT-125/84, Índice de penetración, NLT-181/88*” y cualquier otro ensayo adicional que pueda aportar información relevante, como el de fragilidad en zonas muy frías.

El contenido de betún en el MBR suele oscilar entre el 3 y el 7% sobre mezcla y, en general, es más duro que los ligantes nuevos. Esto se debe en primer lugar a la exposición del pavimento al oxígeno atmosférico (oxidación) y en segundo lugar a los cambios climáticos.

El grado de endurecimiento del ligante depende de varios factores, entre los que se encuentran las propiedades intrínsecas del betún, la temperatura y tiempo de mezclado, el grado de compactación de la mezcla, el contenido de huecos en mezcla y el tiempo en servicio del pavimento. Las penetraciones obtenidas para el ligante recuperado del MBR suelen ser bajas, del orden de 10 a 40 dmm a 25°C, los puntos de reblandecimiento altos, mayores de 65-70°C, e índices de penetración cercanos a cero o ligeramente positivos. En la tabla 3.3.3 se resumen algunas de las características físicas más importantes que el MBR suele presentar.

Tabla 3.3.3 Propiedades más usuales del MBR (*Elaboración propia basada en User Guidelines for waste and byproducts materials in pavement construction, FHWA y en REPSOL YPF, 2001*)

Propiedades del MBR	Rango de valores típico
Densidad	1.940 - 2.300 g/cm ³
Contenido de humedad	Normal: hasta un 5% Máximo: 7 - 8 %
Contenido de Betún	Normal: 4.5 - 6 % Máximo: 3 - 7 %
Penetración del betún	10 - 80 dmm a 25°C
Índice de penetración	Cercano a cero
Punto de reblandecimiento	>65 a 70°C
Viscosidad absoluta del betún	4000 - 25000 poises a 60°C

En la tabla 3.3.4 se presenta un resumen de los diferentes ensayos que se deben aplicar para la caracterización del material fresado de pavimentos asfálticos.

Aunque en general todo el MBR es susceptible de ser reciclado, existen casos en que el MBR no es adecuado para el reciclaje o para todas sus aplicaciones, por ejemplo los pavimentos que contienen caucho no son adecuados para el reciclado a altas temperaturas. También la calidad original de los áridos (por ejemplo partículas redondeadas), o su calidad después de estar en servicio (partículas pulimentadas), pueden limitar su uso en capas de rodadura, pero podrían ser empleadas para capas inferiores.

Tabla 3.3.4 Ensayos para la caracterización del material fresado (MBR) y sus componentes

Ensayos para caracterizar el material fresado	Ensayos para caracterizar los áridos del material fresado	Ensayos para caracterizar el ligante del material fresado
Análisis granulométrico aparente del material disgregado (NLT-150/84)	Índice de lajas (NLT-354/91)	Recuperación del ligante de las mezclas bituminosas para su caracterización (NLT-353/85)
Contenido de humedad (NLT-359/98)	Caras de fractura (NLT-358/90)	Penetración del material bituminoso recuperado (NLT-124/84)
Contenido de ligante en las mezclas bituminosas (NLT-164/90)	Resistencia al desgaste por medio de la máquina de Los Ángeles (NLT-149/91)	Punto de reblandecimiento del material bituminoso (NLT-125/84)
Análisis granulométrico de los áridos recuperados de las mezclas bituminosas (NLT-165/90)	Equivalente de arena (NLT-113/72)	Índice de penetración (NLT-181/88)
		Fraccionamiento del betún recuperado (NLT-373/94)

Áridos de aportación

Actualmente la posibilidad de realizar reciclados en caliente con el 100% de áridos aportados por el MBR es muy limitada, principalmente por cuestiones técnicas, aunque de acuerdo con Howard y Reed (1999), algunas plantas especiales que utilizan microondas para calentar el MBR y disminuir las emisiones de gases a la atmósfera, consiguen reciclados del 100%, pero el costo tan elevado de operación es un obstáculo para su uso generalizado.

Por lo tanto, en la gran mayoría de los casos, el reciclado de mezclas asfálticas en caliente en planta se realiza con una cierta tasa de material fresado de pavimentos y la parte restante para llegar al 100% se compone de áridos vírgenes de aportación.

Los nuevos áridos usados en la elaboración de las mezclas recicladas, deberán cumplir con los mismos requerimientos exigidos a las mezclas convencionales, debiéndose realizar como mínimo los ensayos mencionados en la tabla 3.3.5 para garantizar una calidad adecuada.

Tabla 3.3.5 Ensayos para la caracterización de los áridos de aportación (*Fuente: Páez et al., 2000*)

Norma	Ensayo
NLT-150/84	Análisis granulométrico de áridos gruesos y finos
NLT-152/89	Material de los áridos que pasan el tamiz UNE 80µm por lavado
NLT-113/72	Equivalente de arena
NLT-149/91	Resistencia al desgaste por medio de la maquina de los Ángeles
NLT-174/93	Pulimento acelerado de los áridos (Solo para capas de rodadura)
NLT-172/86	Determinación de la limpieza superficial
NLT-358/90	Caras de fractura
NLT-354/91	Índice de lajas y agujas
NLT-180/93	Coefficiente de emulsibilidad del filler

Los áridos de aportación en las mezclas recicladas deben, en primer lugar, corregir la granulometría del MBR hasta lograr encajar en el huso especificado para mezclas convencionales del mismo tipo, y en segundo lugar deben incrementar la estabilidad de la mezcla.

Ligantes de aportación

En la fabricación de las mezclas recicladas en caliente en planta, es necesario agregar un porcentaje de ligante nuevo que nos ayude a recuperar las características perdidas por el betún envejecido contenido en el material fresado, y a cumplir con los contenidos de ligante total en mezcla exigidos para el tipo de capa del que se trate.

La idea de la incorporación de un porcentaje de betún de aportación es que, junto con el ligante envejecido, constituyan un ligante final de características similares a las que ofrece un betún nuevo en una mezcla en caliente convencional. Esta posibilidad, cuestionada en otras técnicas como el reciclado en frío, es aquí, según Bardesi y Echevarria (2001), perfectamente viable gracias a que en el proceso productivo, en diversas formas según la técnica de reciclado en caliente empleada, la mezcla antigua se debe calentar hasta que el ligante antiguo adquiera una consistencia suficientemente baja para poder disgregar totalmente la mezcla antigua. En estas condiciones, y asumiendo un sistema y un tiempo de mezclado de los diversos componentes

suficientemente eficaz, debe ser posible obtener una mezcla íntima entre el ligante antiguo y el de aportación de forma que se obtenga un ligante final homogéneo.

La cantidad y tipo de ligante nuevo a utilizar se determinará a partir del análisis del contenido y características del betún aportado por el MBR. Los betunes de penetración convencionales son los más usados en la fabricación de mezclas recicladas en planta en caliente y deberán cumplir con los mismos requerimientos de calidad que se exigen para las mezclas convencionales.

El ligante final será la suma del ligante envejecido y el ligante de aportación y deberá tener unas características lo más próximas a un betún nuevo en cuanto a su composición, y con una penetración que se ajuste a los valores especificados para el tipo de mezcla, climatología y tráfico del proyecto del que se trate.

Puede decirse entonces, que el ligante ideal para una operación de reciclado en caliente de una mezcla envejecida en la que se desee reconstituir las propiedades físicas y químicas del ligante, debería reunir las siguientes características:

- Viscosidad adecuada para que junto al ligante envejecido resulte un ligante similar al del ligante objetivo, tras el proceso de producción y puesta en obra.
- Una composición química que restaure las relaciones de componentes típicas del ligante objetivo.
- Compatibilidad química con el ligante envejecido.

Agentes rejuvenecedores

Si el contenido de MBR en la nueva mezcla es muy elevado (generalmente por encima del 20%), o si el ligante contenido en el MBR tiene una penetración muy baja, se suele aplicar un agente rejuvenecedor que nos ayude a lograr la penetración adecuada y restaure las características químicas óptimas de durabilidad del betún del MBR.

Los agentes rejuvenecedores son divididos por la *Federal Highway Administration* en tres grupos principales: cementos asfálticos muy blandos, aceites aromáticos y aceites parafinados, todos ellos derivados del proceso de destilación del petróleo.

De acuerdo con Bardesi y Echevarría (2001), los agentes rejuvenecedores deberían reunir las siguientes propiedades:

- Viscosidad adaptable a las necesidades.
- Punto de inflamación compatible con las temperaturas del proceso.
- Contenido elevado en aromáticos de alto peso molecular para facilitar la compatibilidad y restituir la composición inicial.
- Contenido bajo o nulo en asfaltenos y en saturados.
- Coste asumible.

Con estas condiciones uno de los productos disponibles actualmente son los aceites extendedores y plastificantes que en algunas refinerías pueden obtenerse de los procesos de producción de bases lubricantes minerales. Dentro de ellos, los más pesados son los más adecuados ya que permiten su empleo a las temperaturas de fabricación sin necesidad de tomar precauciones especiales que serían precisas en los más ligeros.

Por el contrario, algunos productos en los que podría pensarse para actuar como rejuvenecedores que deberían descartarse son los siguientes:

- Aceites industriales, tanto en forma de bases vírgenes como en forma de aceites reciclados, ya que su composición es básicamente de hidrocarburos saturados que no se necesita aportar por encima de lo que contiene normalmente un betún.
- Los distintos tipos de disolventes y algunos combustibles, por ejemplo querosenos, empleados en otros tipos de ligantes como betunes fluidificados y en las emulsiones, que por su bajo punto de inflamación y por sus temperaturas de destilación se evaporarían mayoritariamente en el proceso de fabricación de la mezcla reciclada y constituirían un foco de problemas de seguridad.

3.4. Procedimiento para el reciclado de mezclas bituminosas en caliente en planta y equipo necesario para realizarlo

El reciclado de pavimentos asfálticos en planta en caliente es un método de fabricación de mezclas cada vez más usado por diferentes administraciones en todo el mundo y, en general, la metodología utilizada es muy parecida en todos los países.

Gracias al gran desarrollo tecnológico que se ha presentado en los últimos años en los equipos y maquinaria para la construcción se ha podido dar un impulso muy grande al reciclado de pavimentos asfálticos en caliente en planta.

A continuación se describe el procedimiento general y la normativa y metodología de diseño empleados para el reciclado de pavimentos en caliente en planta, así como los equipos y maquinaria necesarios en cada uno de los diferentes pasos del proceso.

3.4.1. Recuperación de materiales de los pavimentos asfálticos deteriorados para su reciclado

Una vez que se conocen las características del firme que se va a rehabilitar y si este puede ser reciclado, se procede a la recuperación de los materiales de las capas bituminosas envejecidas, que se lleva a cabo mediante la demolición mecánica o el fresado de las capas bituminosas.



Fig. 3.4.1 Demolición mecánica de un firme

De acuerdo con García (2001), la demolición mecánica de las capas de firme mediante ripado con bulldozer o levantamiento con pala o retroexcavadora (fig. 3.4.1), es una de las alternativas más comúnmente usadas en las demoliciones de firmes, en especial cuando no hay requisitos precisos de reutilización posterior del material en procesos de reciclado o

necesidad de un saneo por fresado para sustitución de un determinado espesor del firme.

Se genera así un material troceado, en bloques, con una cierta heterogeneidad de tamaños que necesita un tratamiento posterior por machaqueo, para obtener una granulometría adecuada para poder ser utilizado en las mezclas recicladas.

Por otra parte, el fresado en frío es la técnica necesaria cuando hay que remover un cierto espesor del firme, obteniendo una superficie plana y regular para apoyo de nuevas capas de mezcla.

Alrededor de 1970 (ASTECH, 1998) hicieron su aparición, por primera vez, las máquinas fresadoras de pavimentos asfálticos. Se trataba de modelos pequeños y con ancho de corte muy reducido. Con todo, hicieron ver las posibilidades que ofrecían en las tareas de rehabilitación de capas de firme necesitadas de ser sustituidas, de ahí que a lo largo de los años 70 estas máquinas conocieran un desarrollo cada vez más pronunciado. Lógicamente aquellas primeras máquinas requerían de mucho mantenimiento y eran poco fiables, pero con el tiempo, han crecido no solo en tamaño y potencia sino que se ha mejorado sensiblemente en control, en el grado de eficacia y capacidad de producción, y además son mucho más sencillas de operar.

Actualmente, con una fresadora de carga frontal se puede cortar un carril completo, además de recoger automáticamente el material fresado sobre un camión para su retirada como se puede observar en la figura 3.4.2.

Otra ventaja del fresado es que deja una superficie rugosa que sirve para unir con la capa nueva, además de que el material fino que permanece en la carretera, se derretirá casi instantáneamente al aplicar una nueva capa de mezcla caliente, y de este modo, las partículas finas se convierten en una capa ligante.



Fig. 3.4.2 Fresado de capas bituminosas envejecidas

Las características de granulometría y tamaño máximo del producto obtenido por fresado son función de las características y estado de integridad de la capa a fresar, de la velocidad de avance de la fresadora, del espesor de fresado y de las características de la fresadora y del rotor (potencia, espaciamiento y tipo de picas, velocidad de giro, etc.).

Así, puede llegar a conseguirse que el producto obtenido del fresado cumpla los requisitos de granulometría y tamaño máximo para ser utilizado directamente en procesos de reciclado. En caso contrario precisará también un postproceso de machaqueo o clasificación previo al de reciclado.

Una vez que se recuperan los materiales de los pavimentos asfálticos envejecidos, es necesario acarrearlo en camiones hasta la planta en donde será almacenado, y en su caso, procesado para su reciclado.

3.4.2. Proceso y acopio del MBR en planta

Si el material fresado es lo suficientemente homogéneo cuando llega a la planta, y el tamaño máximo de las partículas del mismo no superan las especificaciones para su utilización en mezclas bituminosas, puede ser acopiado directamente sin pasar por ningún proceso de machaqueo, ya que la tolva de alimentación del MBR de las plantas de mezcla tienen una precriba que limita el tamaño máximo a reciclar y no permite que entren partículas de mayor tamaño que el especificado.

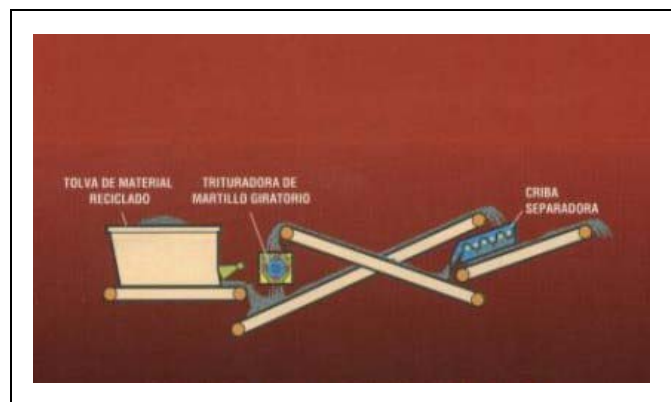


Fig. 3.4.3 Alimentación de planta con proceso de Machaqueo (*Fuente: ASTEC, 1998*)

Cuando el MBR no precisa una gran reducción de tamaño, por que su dimensión máxima no es excesiva (50-100mm), García (2001) recomienda una variante, en la que en el sistema de alimentación se incorpora una trituradora secundaria para reducir el

material procedente de fresado a una granulometría uniforme 0/20 ó 0/30 como se observa en la figura 3.4.3.

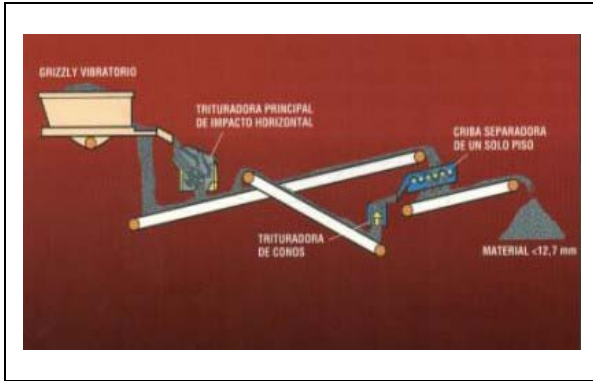


Fig. 3.4.4 Trituradora de MBR de una sola criba
(Fuente: ASTEC, 1998)

Si el MBR es procedente de la demolición de firmes ó tiene tamaños máximos de partículas superiores a los especificados para la fabricación de mezclas, será necesario realizar un machaqueo en planta que puede hacerse mediante una trituradora que cuente con una primera etapa de machaqueo por impacto y una segunda etapa con una criba y una

trituradora de conos, como se muestra en la figura 3.4.4, de esta manera se reducirá el MBR a un todo uno con tamaño máximo de entre los 20-30mm, antes de ser acopiado para su almacenamiento.

Si se pretende utilizar porcentajes muy elevados de MBR (más del 30%) en la fabricación de mezclas, es recomendable separarlo en dos fracciones para asegurar que el producto final será suficientemente homogéneo, en este caso se debe utilizar una machacadora de dos etapas que cuente con una criba de dos pisos

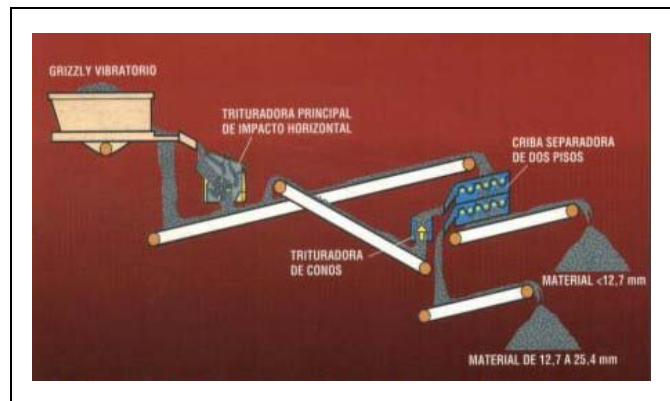


Fig. 3.4.5 Trituradora de MBR para obtener dos fracciones distintas
(Fuente: ASTEC, 1998)

que nos permita obtener las dos fracciones requeridas (fig. 3.4.5), que serán acopiadas separadamente para evitar que se mezclen entre ellas.

En la figura 3.4.6 se presenta una procesadora de MBR capaz de separar el material fresado de pavimentos en diferentes fracciones.



Fig. 3.4.6 Trituradora de MBR para obtener diferentes fracciones
(Fuente: ASTEC <www.astecinc.com>)

Una vez procesado, el MBR debe ser manipulado y almacenado como un árido convencional. De cualquier forma, algunas administraciones no permiten que se mezclen los fresados de diferentes obras en los mismos acopios.

El *Asphalt Institute* recomienda que la altura de los acopios se limite a un máximo de 3 metros para prevenir la aglomeración de las partículas de MBR. El tiempo de almacenamiento debe minimizarse para evitar que el contenido de humedad de los acopios se vuelva excesivo.

La experiencia ha probado que los acopios cónicos se comportan de una mejor manera que los acopios horizontales y ayudan a que el fresado no se reaglomere. El MBR tiene la tendencia de formar una costra de unos 20 cm, debido a los efectos del calor y de la radiación solar tanto en los acopios cónicos como en los horizontales. Esta corteza ayuda a evitar que el resto del MBR se aglomere y además se rompe fácilmente con un cargador frontal.

El material fresado de pavimentos tiene la tendencia de almacenar agua y no drenarla con el tiempo como los áridos normales. Los acopios bajos y horizontales acumulan

más humedad que los cónicos y de mayor altura. Otra medida que puede servir para evitar la excesiva humedad del MBR es utilizar acopios techados pero sin paredes, para evitar la condensación de la humedad.

Cuando el MBR llega de muy distintas procedencias en pequeñas cantidades, será necesario hacer una serie de mezclados sucesivos para conseguir un acopio homogéneo aunque la procedencia no sea la misma.

3.4.3. Caracterización de los materiales que formarán parte de las mezclas recicladas

Una vez que se logran acopios de MBR homogéneos, es necesario caracterizar todos los materiales que formarán parte de las mezclas recicladas, es decir:

- MBR
- Áridos de aportación
- Ligante de aportación
- Rejuvenecedores (en caso de ser necesarios)

Los ensayos que deben realizarse a cada uno de los componentes de la mezcla reciclada para su correcta caracterización antes de que se proceda a su fabricación, son los que se han indicado y detallado en el apartado 3.3 de este capítulo.

3.4.4. Diseño de las mezclas recicladas en caliente en planta y normativa para su utilización

La mayoría de las administraciones en el mundo utilizan para las mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta una metodología de diseño y unos requerimientos de calidad prácticamente iguales a los que exigen a las mezclas convencionales, añadiendo algunas variaciones que ayuden a asegurar el buen comportamiento de éstas.

En general, el diseño de las mezclas recicladas debe incluir, la determinación de las propiedades del MBR y de los nuevos materiales que formarán parte de la mezcla, la selección de una apropiada proporción de MBR y árido virgen para cumplir con la granulometría especificada, la selección del tipo y contenido de ligante de aportación para satisfacer los requerimientos de viscosidad y/o penetración, estudiar la posible necesidad de agregar un agente rejuvenecedor para mejorar las características del betún contenido en el material fresado y verificar que se cumpla con los requerimientos especificados para el tipo de capa en donde se colocará la mezcla.

A continuación se describirán, de forma resumida, la normativa Española para la fabricación de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta y algunos de los métodos de diseño y normativas utilizados en otros países para los mismos fines.

Normativa española para el reciclado en central en caliente de capas bituminosas

Apoyados en los trabajos de investigación de esta Tesis Doctoral llevados a cabo en el Laboratorio de Caminos de la UPC, la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento redactó en el año 2001 el Artículo 22 del *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales Para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4)*, en el que se describe el procedimiento y la normativa que se debe cumplir para el *Reciclado en Central en Caliente de Capas Bituminosas*.

La aparición de este Artículo dentro de la normativa es un gran avance para el desarrollo de esta técnica en las obras de rehabilitación de firmes bituminosos en España y se espera que se incrementen en los próximos años de forma considerable las empresas que apuesten por su utilización.

Este Artículo se aplica a las mezclas recicladas en caliente en planta que contengan una proporción en masa del material bituminoso a reciclar comprendida entre el 10 y el 50% de la masa total de la mezcla.

Algunos de los puntos más importantes que se mencionan en la Artículo son los siguientes:

- El tipo y proporción de ligante de aportación necesario se definirá en función de la penetración del ligante final.
- Para obras de más de 70,000 m² ó cuando las mezclas bituminosas recicladas contengan más del 25% de MBR respecto de la masa total de la mezcla se realizará un estudio completo del ligante procedente del MBR y del ligante final.
- El material bituminoso a reciclar tratado, una vez disgregado, deberá pasar en todo caso por el tamiz 25mm de la *UNE 933-2*.
- La granulometría de los áridos del MBR tras la extracción del ligante y el contenido de éste deberán cumplir, respecto a los valores especificados en la fórmula de trabajo, las tolerancias indicadas en la tabla 3.4.1.

Tabla 3.4.1 Tolerancias sobre la fórmula de trabajo del material bituminoso a reciclar (*Fuente: Artículo 22 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de conservación de carreteras, 2001*)

Características		Unidad	Tolerancia
Cernido Tamices	> 2 mm	% en masa del material a reciclar seco	± 5
	> 0.063 mm y ≤ 2 mm		± 3
	0.063 mm		± 1.5
Contenido de ligante			± 0.4
Penetración del ligante recuperado		0.1 mm	± 4

- La resistencia conservada en el ensayo de inmersión-compresión, según la *NLT-162*, deberá ser como mínimo del 75%.
- No se emplearán mezclas bituminosas recicladas en caliente para la fabricación de mezclas de alto módulo (MAM).

- La dotación total de ligante hidrocarbonado no será inferior al 4% en capas intermedias y al 3.5% en capas de base, incluidas las tolerancias. Además, la dotación de ligante de aportación deberá ser como mínimo del 60% de la dotación total del ligante hidrocarbonado de la mezcla reciclada.
- La razón entre la estabilidad Marshall y la deformación Marshall será inferior a 8 kN/mm.
- La resistencia media a tracción indirecta, según la NLT-346, a 5°C, empleando los dispositivos de carga recogidos en el apartado 2.2 de la norma NLT-360 para la determinación del módulo resiliente, deberá cumplir los valores indicados en la tabla 3.4.2. Además la resistencia media de los testigos en húmedo deberá ser siempre superior al 75% de la resistencia en seco.

Tabla 3.4.2 Resistencia mínima a tracción indirecta de los testigos (*Fuente: Artículo 22 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de conservación de carreteras, 2001*)

Timo de mezcla	Aceptación		Penalización	
	Seco (MPa)	Húmedo (MPa)	Seco (MPa)	Húmedo (MPa)
Densa y Semidensa	2.5	1.9	2.1	1.6
Gruesa	2.0	1.5	1.6	1.2

Para el resto de aspectos que no se puntualizan en este Artículo, se deberán cumplir las especificaciones del Artículo 542 del *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3).

De acuerdo con Bartolomé (2001), también la revisión de la Norma 6.3-IC “*Rehabilitación de firmes*” recogerá la utilización del material procedente del fresado de capas bituminosas para la fabricación de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta.

Metodología de diseño y normativa utilizada en Estados Unidos para el reciclado de pavimentos asfálticos en caliente en planta

El uso de MBR procesado en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente es el método de reciclado de pavimentos más utilizado en los Estados Unidos y se considera una forma habitual de fabricación de mezclas asfálticas.

Tanto el procedimiento de diseño de mezclas Marshall como el Hveem son usados en un gran número de estados para determinar el contenido de betún y el porcentaje de MBR adecuados para las mezclas recicladas.

Los procedimientos para seleccionar la calidad del ligante o de los agentes rejuvenecedores necesarios se resumen en “*Standard Test Method for Preparation of Viscosity Blends for Hot-Recycled Bituminous Materials, ASTM D4887*”. Ésta especificación incluye un gráfico para obtener la viscosidad final de la mezcla de ligante envejecido con ligante nuevo y, en su caso, con un agente rejuvenecedor, la cual ayuda al diseñador a determinar los porcentajes necesarios de cada uno de ellos para llegar al valor solicitado por las especificaciones. El manual del Instituto del Asfalto para el reciclado de mezclas bituminosas en caliente indica como usar este tipo de gráficos en el diseño de una mezcla reciclada en caliente.

El Instituto del Asfalto sugiere que para mezclas en caliente que contengan menos del 20% de MBR, no es necesario variar la calidad del ligante usado para mezclas convencionales equivalentes. Para contenidos mayores del 20% recomienda utilizar un betún más blando para compensar la alta viscosidad del ligante oxidado. Sin embargo, en algunos estados, utilizan el mismo tipo de ligante que para las mezclas convencionales sin importar el porcentaje de MBR contenido en las mezclas.

En el “*Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types*” del Instituto del Asfalto, se incluye un método para determinar las características de diseño necesarias (estabilidad, deformación, huecos, etc.) tanto para el método Marshall como para el Hveem. El diseño final de la mezcla reciclada lo completan con los procedimientos y criterios para mezclas convencionales.

Para el diseño estructural de pavimentos que contienen material fresado en mezcla utilizan los criterios AASHTO convencionales.

De acuerdo con McDaniel et.al (2002), cuando se implementó el sistema Superpave, el uso del MBR disminuyó en Estados Unidos debido a que a pesar de no excluir su uso, no se contaba con pautas claras de cómo utilizar el MBR en las mezclas Superpave.

Por esta razón, en 1997 un subgrupo del *FHWA Superpave Mixtures Expert Task Group*, desarrolló unas recomendaciones para el uso de MBR basados en la experiencia del pasado. Estos lineamientos establecen una utilización gradual del MBR. De acuerdo con estos lineamientos, puede utilizarse hasta un 15% de MBR sin necesidad de cambiar las características empleadas para una mezcla convencional. Entre un 15 y un 25% de MBR, el ligante de aportación debe disminuir 6° en ambos grados de temperatura, baja y alta. Para utilizar más del 25% de MBR es necesario usar unas tablas para determinar cuanto MBR puede ser utilizado.

Por otra parte, siete estados de la región central iniciaron un proyecto de investigación en 1996 en el *North Central Superpave Center* para investigar el uso de MBR en las mezclas Superpave con materiales típicos de la región. Tres materiales fresados distintos fueron evaluados. Las mezclas fueron diseñadas y ensayadas en laboratorio con cada tipo de MBR, de ligante nuevo y árido de aportación hasta contenidos de un 50% de MBR. Las mezclas de laboratorio fueron comparadas con mezclas fabricadas en planta con los mismos materiales y contenidos de MBR de entre el 15 y 25%. Finalmente se realizaron ensayos tanto del ligante como de las mezclas.

En resumen, los resultados obtenidos mostraron que las mezclas que contienen hasta un 50% de MBR pueden ser diseñadas de acuerdo a Superpave. En algunos casos, la granulometría del árido del MBR limitaba la cantidad de fresado que se podía incluir en una mezcla y que cumpliera con los requerimientos volumétricos y de compactación de Superpave.

En general, el incremento de MBR en las mezclas aumentó su rigidez y disminuyó el esfuerzo cortante, lo que aumenta la resistencia a la aparición de deformaciones plásticas, si no se modifica el grado del ligante de aportación. Es muy importante considerar la granulometría del árido del MBR y su calidad en el diseño de la mezcla, ya que una pobre estructura mineral puede reducir la rigidez de la mezcla y afectar su comportamiento.

De acuerdo a lo anterior, puede decirse que las mezclas Superpave que contengan un porcentaje de MBR en su composición logran un comportamiento adecuado.

Metodología de diseño empleado en Australia para el reciclado de mezclas bituminosas en caliente en planta

De acuerdo con Austroads (1992), los principios de diseño y los requerimientos de calidad para las mezclas recicladas en Australia son, como en otros países, generalmente las mismas que para las mezclas convencionales tal y como se menciona en el *APRG Report No. 18*.

Las principales diferencias de diseño con respecto a las mezclas convencionales son:

- Se suelen utilizar agentes rejuvenecedores para restaurar la viscosidad adecuada del ligante, así como su penetración y durabilidad.
- Se deben añadir nuevos áridos, betún o mezcla asfáltica para modificar las propiedades finales del asfalto.

Generalmente, al igual que en muchos otros países, las mezclas con menos de un 20% de MBR se consideran como mezclas convencionales y se sigue la misma metodología de diseño. Cuando se fabrican mezclas con contenidos mayores al 20% de MBR deben seguir los pasos señalados en la figura 3.4.7.

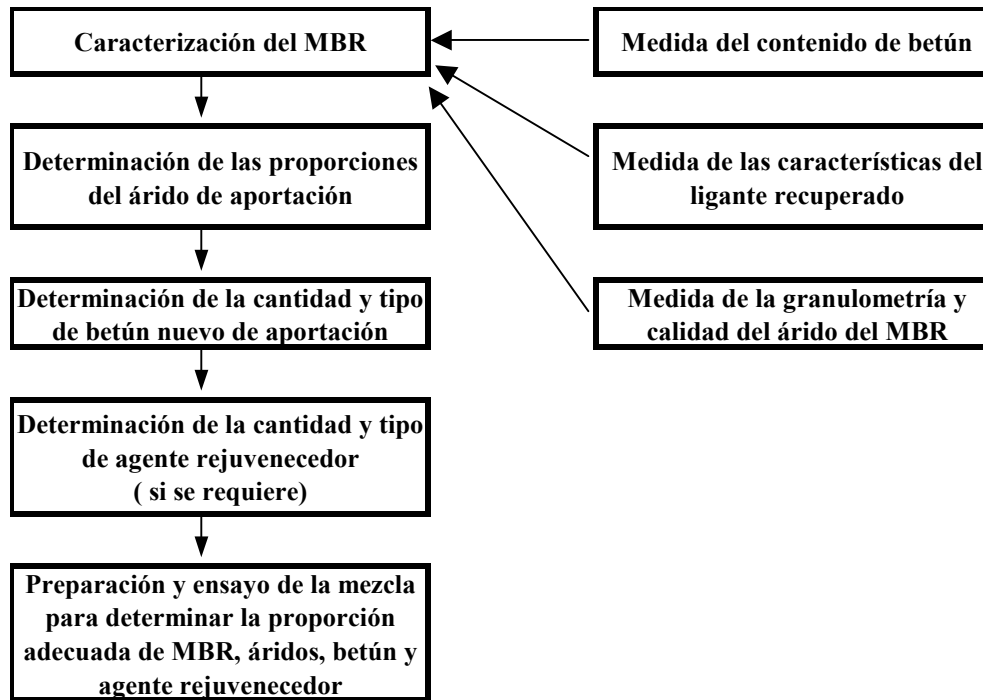


Fig. 3.4.7 Procedimiento para el diseño de mezclas recicladas en Australia (Fuente: Austroads, 1997)

El agente rejuvenecedor se utiliza en el reciclado de mezclas asfálticas para restaurar las propiedades del ligante envejecido, y aumentar su durabilidad. Para lograr buenos resultados al diseñar la mezcla reciclada, se requiere:

- Seleccionar un agente rejuvenecedor adecuado.
- Calcular la cantidad adecuada de rejuvenecedor.

El proceso para determinar el tipo y cantidad adecuados de rejuvenecedor es iterativo. Las propiedades aglutinantes del betún pueden ser medidas por el índice de penetración, punto de reblandecimiento o viscosidad.

El betún rejuvenecido debe cumplir con los requerimientos señalados en la tabla 3.4.3 para propósitos de diseño. Estos son los mismos requerimientos que se hacen para un betún nuevo.

Tabla 3.4.3 Requerimientos para el ligante rejuvenecido (*Fuente: Austroads, 1997*)

Requerimientos para el ligante rejuvenecido		
Propiedades	Requerimientos	
	Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C	35 dmm	---
Viscosidad	350 Pa.s	900 Pa.s
Punto de reblandecimiento	52°C	56°C

La penetración del ligante es el principal indicador del endurecimiento y va disminuyendo, primeramente durante el proceso de fabricación de las mezclas y después por el efecto del envejecimiento. En ocasiones, el betún del MBR presenta penetraciones a 25°C de 10 o 20 dmm y se requieren penetraciones mínimas de 35 dmm para cumplir con la normativa de mezclas recicladas. Es importante lograr este valor sin afectar el contenido de huecos en mezcla con un exceso de ligante.

En Australia, para mezclas con menos de un 20% de MBR, se suele omitir el uso de agentes rejuvenecedores, lo que suele significar un incremento en el contenido de betún. Para mezclas con más del 20% de MBR se calcula la cantidad de rejuvenecedor necesario, basándose en la viscosidad, utilizando la fórmula 3.1:

$$r = \frac{\log(V + 3) - \log(T + 3)}{\log(V + 3) - \log(R + 3)} \quad \text{Fórmula (3.4.1)}$$

Donde: r = La fracción del ligante total en la mezcla rejuvenecida por peso, R = Viscosidad del agente rejuvenecedor, T = Viscosidad requerida en el producto final, V = Viscosidad del betún extraído del MBR, todas las viscosidades deberán ser a la misma temperatura (45°C ó 60°C)

Para la evaluación, análisis y diseño estructural de los pavimentos reciclados utilizan la *Guide to the Structural Design of Road Pavements (Austroads, 1992)*. La rigidez de la

mezcla reciclada se determinará haciendo los ensayos que se marcan en *AS 2150* o siguiendo los procedimientos descritos en *Austroroads Pavements Design Guide*, que son los mismos que para las mezclas convencionales.

Si la mezcla reciclada muestra un incremento en la rigidez como resultado de la incorporación de MBR, su vida a fatiga puede reducirse y esto debe ser considerado en el diseño estructural.

Metodología de diseño empleada en Bélgica para el reciclado de mezclas bituminosas en caliente en planta

En Bélgica, el reciclado de mezclas asfálticas se ha convertido en una necesidad, considerando la creciente dificultad para el vertido de desechos.

Las autoridades están tratando de promover a los contratistas para reciclar todo lo posible, mediante diferentes políticas como el encarecimiento de los vertederos, el desarrollo de especificaciones que permitan la utilización de materiales reciclados, el apoyo a la investigación, etc. Lo mismo ocurre en otros países como Dinamarca y Holanda y se ha logrado reutilizar hasta el 100% del MBR generado en la rehabilitación de pavimentos.

Desde 1986, para el reciclado de mezclas en planta, existe una carta circular de la administración de carreteras de Bélgica en donde se enumeran una serie de especificaciones para el diseño de mezclas recicladas que no difieren en gran medida de las utilizadas para mezclas convencionales. Las principales diferencias son:

- El reciclado de pavimentos envejecidos debe ser anunciado por el contratista.
- Los mismos criterios de aceptación serán utilizados tanto para mezclas recicladas como para mezclas nuevas.

- El reciclado se permite solo en las capas de base y con un contenido máximo del 25% de MBR si es homogéneo y bien conocido, o un 10% de MBR si es heterogéneo y con características desconocidas. Aunque en algunos casos se ha permitido subir los porcentajes antes mencionados a un 40% y 20% respectivamente.
- Si el porcentaje de MBR supera el 10%, se deben estudiar todas sus características (contenido de ligante, áridos y filler, penetración y punto de reblandecimiento del ligante recuperado).

De acuerdo con Van Heystraeten (1993), el *Belgium Road Research Centre* utiliza una serie de gráficos similares a los que se presentan en la especificación *ASTM D4887* para calcular la viscosidad final del ligante mezclado y su penetración, parámetros importantes dentro del diseño de las mezclas recicladas.

Metodología de diseño utilizado en Finlandia para el reciclado de mezclas bituminosas en caliente en planta

De acuerdo con el *PANK* (1995), la metodología de diseño utilizada para contenidos de MBR inferiores al 20% es exactamente la misma que para una mezcla convencional, sin embargo el tamaño máximo de las partículas de MBR no debe sobrepasar los 20 mm en ningún caso.

Las mezclas recicladas deben cumplir los requerimientos generales para las mezclas convencionales del mismo tipo, sin embargo, la calidad puede variar dependiendo de la proporción de material fresado en la mezcla o por la utilización de ligantes de diferente calidad y/o cantidad.

Para lograr mantener las características de penetración del ligante final utilizan la fórmula 3.2, o el gráfico mostrado en la figura 3.4.8 con los cuales se calcula la penetración de la mezcla del betún envejecido con el nuevo dependiendo de las proporciones utilizadas de cada uno.

$$P_s = 10 \frac{L \times \lg(Pl) + V \times \lg(Pv)}{100} \quad \text{Fórmula (3.4.2)}$$

Donde: P_s = Penetración de la mezcla de ligantes (dmm), L = Proporción de ligante nuevo en la mezcla (% en peso), Pl = Penetración del ligante nuevo (dmm), V = Proporción de ligante envejecido en mezcla (% en peso), Pv = Penetración del ligante envejecido (dmm).

La fórmula 3.3 es utilizada para calcular el porcentaje en peso de ligante nuevo necesario en la nueva mezcla.

$$BC_L = (BC_o - BC_R \times \frac{RAP}{100}) \times \frac{100}{100 - BC_o} \quad \text{Fórmula (3.4.3)}$$

Donde: BC_L = Cantidad necesaria de ligante nuevo (% en peso) calculado de la combinación del peso del MBR y del árido de aportación, BC_o = Contenido de ligante total requerido en la mezcla (% en peso), BC_R = Contenido de ligante en el MBR (% en peso), MBR = Proporción de material fresado en la mezcla (% en peso).

En la figura 3.4.8 se muestra un ejemplo del cálculo de la penetración final de la mezcla del 35% de un betún envejecido con una penetración de 36 dmm a 25°C, y un 65% de betún nuevo con una penetración de 200 dmm a 25°C.

Se observa que al seguir con una línea horizontal desde la intersección de las dos rectas obtenemos una penetración final de 110 dmm. Este nomograma es utilizado también por el *Belgium Road Research Centre* y algunas otras administraciones.

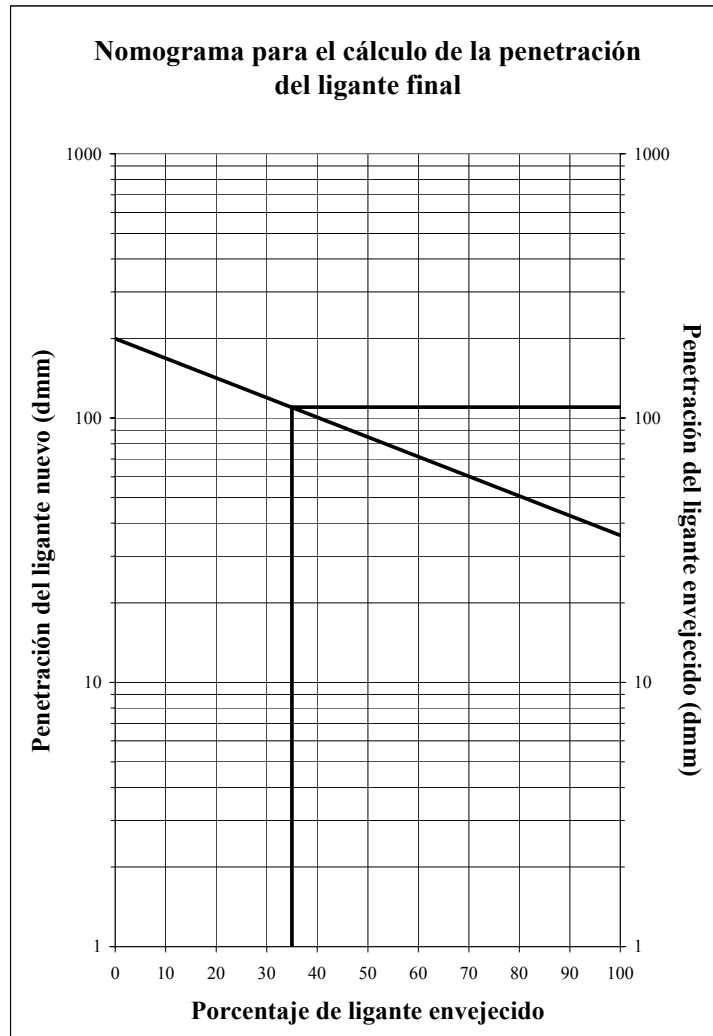


Fig. 3.4.8 Nomograma para el cálculo de la penetración final de la mezcla de dos ligantes de diferente penetración (Fuente: *Finnish asphalt specifications, 1995*)

Metodología de dosificación propuesta por REPSOL YPF

De acuerdo con Páez et. al. (2000), el primer paso es definir la granulometría del árido de aporte y del árido contenido en el MBR, para realizar una dosificación que encaje en el tipo de huso granulométrico para mezclas convencionales especificado para el trabajo del que se trate. Es muy importante tener cuidado con el contenido de filler, ya que el MBR suele tener un alto contenido y las plantas no pueden recuperarlo por estar mezclado con betún.

El siguiente paso es caracterizar el ligante contenido en el MBR, obteniendo su penetración, punto de reblandecimiento, índice de penetración y composición química. Posteriormente se define el contenido de MBR que se empleará en la mezcla y se calcula el porcentaje de ligante que aportará a la mezcla mediante la fórmula 3.4.

$$\% \text{ ligante envejecido} = \frac{\% \text{ betún en fresado} \times \% \text{ fresado}}{100} \quad \text{Fórmula (3.4.4)}$$

El ligante final será la suma del ligante envejecido y el ligante rejuvenecedor y deberá tener unas características similares a un betún nuevo y con una penetración que se ajuste a los valores especificados para el tipo de mezcla nueva, climatología, etc.

Para diseñar la mezcla de betún envejecido más betún rejuvenecedor, es necesario fijar un tipo de betún base, que generalmente será el especificado para una mezcla convencional de las mismas características.

Con el contenido de filler final y con las relaciones filler/betún marcados para el tipo de mezcla, zona climatológica, y capa a emplear, se establecerán cuatro o cinco puntos teniendo como centro la recomendada por el PG-3.

De la relación f/b y del contenido real de filler en la mezcla se obtiene el contenido de betún total teórico que tendría la mezcla para cada punto, estos contenidos comprenderían el ligante envejecido más el ligante rejuvenecedor y con ellos se realizará posteriormente el ensayo Marshall.

A la vista de los resultados del análisis del betún envejecido se debe escoger el tipo de betún rejuvenecedor. Una vez elegida su composición, se procederá a ajustar su penetración para cada punto de las relaciones f/b y betún total obtenidas anteriormente.

Esto obliga a que al variar el contenido de betún total, permaneciendo constante la cantidad de betún envejecido y variando la del rejuvenecedor, la propia consistencia del rejuvenecedor debe ir cambiando para obtener un ligante final de la misma consistencia.

Para encontrar la penetración del betún rejuvenecedor necesaria para cada uno de los puntos se utiliza la fórmula 3.2.

En la tabla 3.4.4 se muestra un ejemplo de diseño siguiendo los pasos descritos anteriormente, para una mezcla con un 40% de MBR, un 5% de betún en el MBR, un contenido de filler total del 5%, y una relación f/b recomendada de 1.2.

Tabla 3.4.4 Ejemplo e diseño de una mezcla reciclada (Fuente: REPSOL YPF, 2000)

			Recomendada		
Contenido de filler total en mezcla	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Relación f/b	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
Betún total en mezcla	3.57	3.85	4.17	4.55	5.00
Betún envejecido en mezcla	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Betún rejuvenecedor a aportar	1.57	1.85	2.17	2.55	3.00
Penetración final requerida	45	45	45	45	45
Penetración betún envejecido	10	10	10	10	10
Penetración del betún rejuvenecedor	306	230	180	147	123

Una vez fijados todos los parámetros, se realizará el ensayo Marshall “NLT-159/86” como si se tratara de una mezcla convencional. El contenido de rejuvenecedor de aporte se elegirá en función de los parámetros Marshall obtenidos, para el tipo de mezcla elegido, capa a aplicar, tipo de tráfico, etc.

Como paso final en el diseño del reciclado es necesario comprobar la idoneidad del diseño de la mezcla y su fórmula de trabajo con los siguientes ensayos:

- Caracterización del ligante final mediante:
 - Penetración de los materiales bituminosos, NLT-124/84
 - Punto de reblandecimiento anillo y bola de materiales bituminosos, NLT-125/84
 - Índice de penetración de los betunes asfálticos, NLT-181/88
 - Composición química de los betunes por cromatografía, ASTM D-2006
- Ensayo de inmersión-compresión, NLT-162/84
- Ensayo de deformación en pista de laboratorio, NLT-173/84

Especificación Europea sobre el uso de materiales recuperados de pavimentos en la fabricación de mezclas bituminosas

La creciente aplicación del reciclado en la producción de mezclas asfálticas en los países europeos, ha hecho necesario especificar el material fresado de pavimentos asfálticos (MBR) como otro material más que constituye las mezclas, de la misma forma que pasa con los áridos y los ligantes.

Por esta razón, el Comité Técnico TC227 del Comité Europeo de Normalización (CEN) preparó en el 2001 la propuesta de Norma *prEN 13108-8 “Bituminous mixtures- Material specifications Part 8: Reclaimed Asphalt”* para la normalización del MBR utilizado en la fabricación de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta.

Esta norma indica básicamente las características que debe cumplir el MBR para poder ser utilizado en la fabricación de mezclas recicladas en caliente en planta. Algunos de los puntos más importantes indicados en la norma son los siguientes:

- Se entiende como material recuperado de pavimentos a los materiales bituminosos, que no contengan alquitrán, obtenidos mediante el fresado o demolición de firmes, o a las mezclas sobrantes de los procesos de producción.
- El material recuperado de pavimentos se designará por las iniciales RA de *reclaimed asphalt*, y por el tamaño máximo del árido contenido en él. Por ejemplo un RA 8 es un material fresado con un tamaño máximo de árido de 8mm.
- El MBR puede contener algunos contaminantes que se dividen en dos grupos: el grupo de materiales minerales como el hormigón, ladrillos, materiales de subbase etc. y el grupo de otros materiales como metales, materiales sintéticos ó madera. El contenido de contaminantes del grupo de materiales minerales puede ser un máximo del 1% en masa para MBR utilizado en capas de rodadura o intermedias, y un máximo del 5% para capas de base. El contenido de contaminantes del grupo de otros materiales puede ser un máximo del 0.1%.

- Dentro de cada acopio de MBR, la penetración individual de cada una de las muestras realizadas debe ser como mínimo de 10 dmm y la media de todas las muestras debe ser mínimo de 15 dmm. El punto de reblandecimiento anillo y bola debe ser para todas las muestras menor a 77°C y la media de todas las muestras debe tener un valor máximo de 70°C. En caso de no cumplirse con lo anterior, debe hacerse un estudio para analizar la factibilidad de utilización de dicho material.
- Si se requiere se deberá hacer el análisis de los áridos del MBR de acuerdo con la norma *prEN 13043 “Aggregates for bituminous mixtures and surface dressings for roads, airfields and other trafficked areas”*.
- Si es requerido, se deberá indicar la granulometría de los áridos contenidos en el MBR, así como su tamaño máximo, definido en este caso como *D*. La granulometría y el valor *D*, deberán ser determinados de acuerdo con las normas *prEN 13043* y *prEn 12697-2 “Bituminous mixtures-Test methods for hot mix asphalt-Particle size distribution”*. El 100% de los áridos deberán pasar el tamiz *1.4D*.
- El número mínimo de muestras *n* necesarias para caracterizar un acopio está dado por el volumen del acopio en toneladas dividido por 500 toneladas y multiplicado por 5.
- Para porcentajes de MBR menores al 10% en capas de base y al 20% en capas intermedias o de base, solo será necesario cumplir con los requerimientos en cuanto a contaminantes, y características de ligante y de áridos contenidos en el fresado. Para porcentajes superiores de MBR en las mezclas, toda la normativa será aplicada además de la posible necesidad de estudios adicionales como las características del ligante final etc.

3.4.5. Plantas para la fabricación de mezclas asfálticas recicladas en caliente

De acuerdo con ASTEC (1998), las plantas discontinuas y las plantas continuas de tambor-secador-mezclador, son las indicadas para preparar mezclas de alta calidad utilizando MBR siempre y cuando se tomen ciertas precauciones para evitar problemas relacionados con el uso de MBR.

A continuación se describen brevemente y de forma general los diferentes tipos de plantas y los procedimientos que deben emplearse para la fabricación de mezclas recicladas en caliente:

Plantas discontinuas

Existen básicamente cinco métodos para la utilización de MBR en una planta asfáltica discontinua, y en todos los casos es necesario sobrecalentar el árido virgen. Una mayor humedad en el MBR y un porcentaje más alto de utilización del mismo requerirán temperaturas proporcionalmente más elevadas en el árido virgen. A menos que el MBR esté extremadamente seco no pueden utilizarse proporciones de MBR superiores al 40% en este tipo de plantas.

El sobrecalentar los áridos vírgenes a temperaturas muy altas hace que el acero del secador se caliente mucho más de lo normal, lo que podría dañar el tambor. La solución estaría en utilizar un secador enfriado por aire, pero su utilización, además de encarecer la instalación solo permitiría utilizar proporciones ligeramente superiores al 40% de MBR, lo que no justifica la inversión.

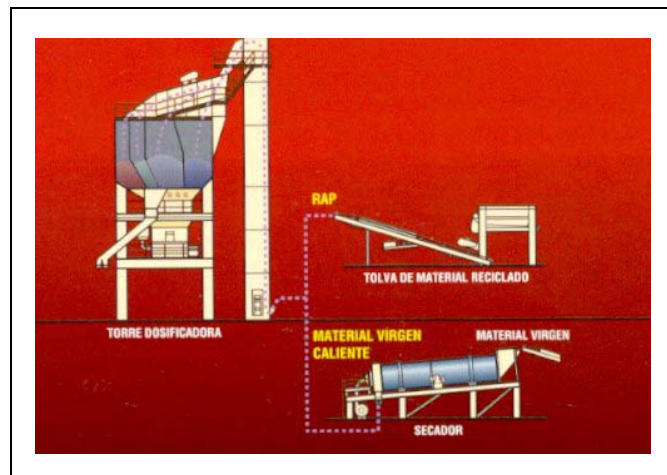


Fig. 3.4.9 Planta discontinua con ingreso de MBR en elevador caliente (Fuente: ASTEC, 1998)

El primer método para la fabricación de mezclas recicladas en caliente en una planta discontinua consiste en introducir el MBR frío en la funda del elevador caliente junto con el árido virgen sobrecalentado, como se muestra en la figura 3.4.9. Juntos son clasificados y almacenados en tolvas calientes.

A medida que el agua se va evaporando del MBR, se genera vapor, el cual es extraído de forma continua por el sistema recolector existente en la torre dosificadora. Este método no causa problemas de emisión. Sin embargo, únicamente deben utilizarse proporciones bajas de MBR a menos que la tela de la criba de la plataforma inferior exceda de 5 a 6mm. El uso de porcentajes más altos con menos de 5mm de tela de cribado produce una composición pegajosa que, a menudo, destruye o ciega la criba.

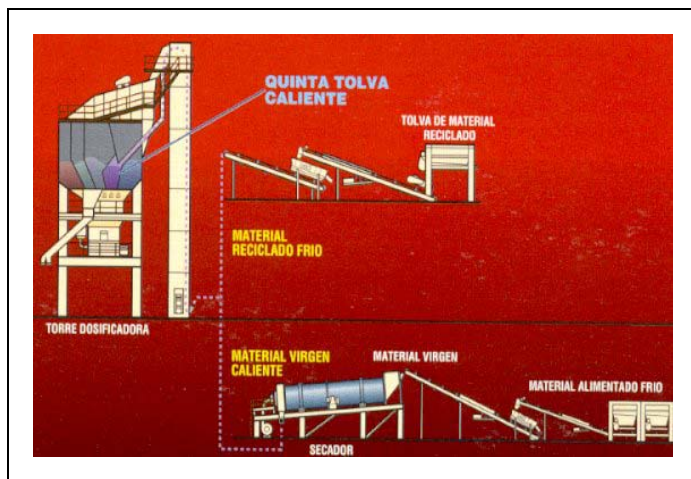


Fig. 3.4.10 Planta discontinua con quinta tolva caliente de la torre dosificadora (Fuente: ASTEC, 1998)

En el segundo método, la torre dosificadora debe tener una quinta tolva caliente como se muestra en la figura 3.4.10. En este caso, el MBR frío y preclasificado se puede introducir en la funda del elevador caliente junto con el árido sobrecalentado y preclasificado.

El elevador entrega el material mezclado directamente a la quinta tolva, desviándolo de las cribas de la torre. Este método da resultados óptimos y permite utilizar hasta el 40% de MBR, y permite pasar de mezclas con MBR a mezclas vírgenes sin vaciar las tolvas calientes porque no se sobrecalientan los materiales existentes en las mismas.

En un tercer método, se entrega el MBR frío preclasificado directamente a la tolva de pesaje de la torre dosificadora junto con el árido virgen sobrecalentado de la tolva caliente.

Para aumentar el tiempo de calentado del MBR, puede dejarse caer el MBR intercalado entre los áridos calientes. Normalmente, se produce una explosión suave cuando se deja caer el material sin mezclar de la tolva de pesaje a la amasadora en funcionamiento. La amasadora mezcla instantáneamente el MBR frío con el árido virgen caliente, y la explosión es el resultado de la evaporación casi instantánea del agua del material fresado. Generalmente se requiere de una *Baghouse* más grande para dar salida al vapor del mezclador.

El cuarto método consta de un nuevo sistema de control de alimentación que se está usando en las plantas discontinuas, tal como se muestra en la figura 3.4.11.

En este sistema, se alimenta el MBR hacia una tercera balanza para obtener una cantidad determinada del mismo. Después de pesado, se deja caer el MBR

en una tolva con un alimentador, el cual introduce el MBR en la amasadora en un intervalo de 20 a 30 segundos, lo que retarda el ciclo de la mezcla, pero permite una alimentación controlada. Por lo tanto, se extiende la generación de vapor a un intervalo de 20 a 30 segundos y facilita su control y eliminación. La tasa máxima de reciclado con este método se sitúa sobre el 20–25%.

El quinto método incorpora un secador separado utilizado para recalentar el MBR. Actualmente es utilizado principalmente en Europa, y aunque comparativamente con los sistemas anteriores es un sistema muy caro, tiene la ventaja de que se pueden utilizar proporciones de MBR del 35 al 40%. Es importante mencionar que las plantas adaptadas actualmente en Cataluña por las empresas RUBAU y PABASA pertenecen a este tipo, en la figura 3.4.12 se observa una de ellas.

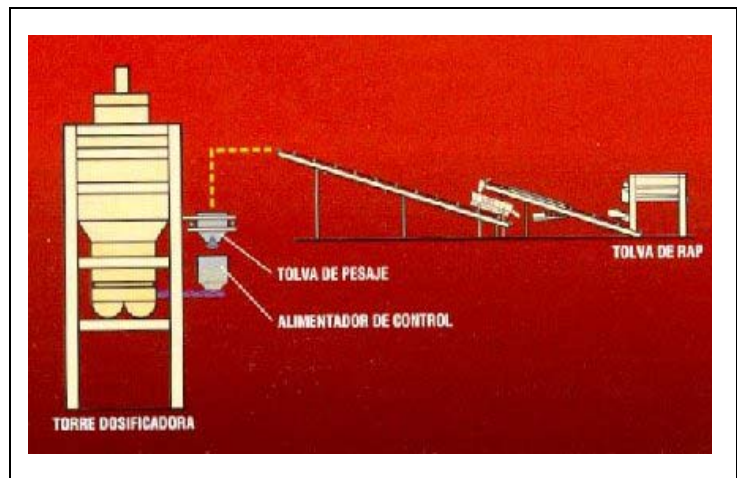


Fig. 3.4.11 Planta discontinua con alimentación controlada a la tolva de pesaje (Fuente: ASTEC, 1998)



Fig. 3.4.12 Planta discontinua con doble tambor secador para calentamiento del MBR de la empresa PABASA

En la figura 3.4.13 se observa el diagrama que presentan las plantas discontinuas del quinto tipo. En estas plantas, los gases del presecador son utilizados como aire secundario y se conduce hacia el secador del árido virgen, el cual consume el humo para evitar emisiones contaminantes.

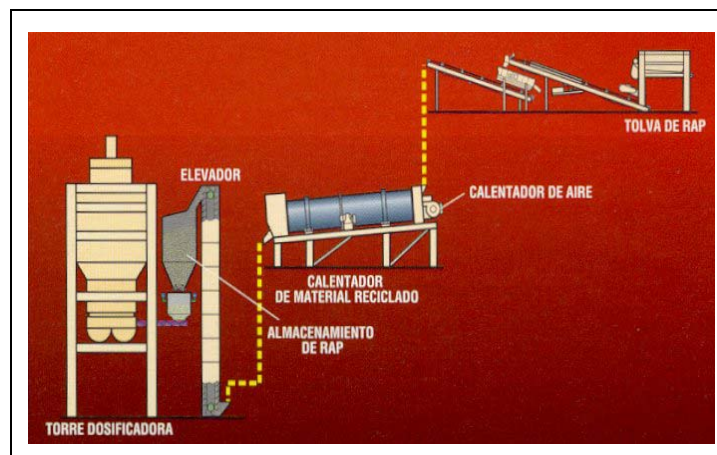


Fig. 3.4.13 Planta discontinua con doble tambor secador para calentamiento del MBR (Fuente: ASTEC 1998)

Plantas continuas de tambor secador-mezclador

De acuerdo con ASTEC (1998), puede decirse que existen básicamente cinco tipos de plantas de tambor secador-mezclador, capaces de manipular MBR aunque cada fabricante presentará variaciones de cada uno de estos tipos.

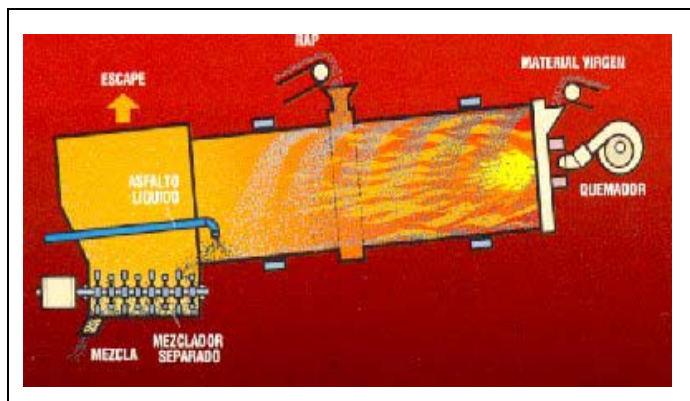


Fig. 3.4.14 Planta continua con secador de flujo paralelo con mezclador separado (DMC)
(Fuente: ASTEC, 1998)

En primer lugar están las plantas con mezclador de flujo paralelo con un tambor con anillo de entrada central, fueron utilizadas principalmente en las décadas de las 70 y 80 con eficacia, pero no pasaron las estrictas normas de emisión de gases que se fueron implantando en años posteriores. Usaban hasta el 25% de MBR sin producir humos.

En segundo lugar están las plantas con secador de flujo paralelo con mezclador independiente como se muestra en la figura 3.4.14. También son conocidas como plantas de mezclador *Drum Mix Coater I*, y tuvieron su apogeo en la década de los 80. Podían utilizar del 30 al 35% de MBR sin producir humo. Sin embargo, tampoco llegaron a superar las nuevas normativas.

Posteriormente aparecieron las plantas con secador de contraflujo y un mezclador continuo, que se denominaron plantas de mezclador *Drum Mix Coater II* (fig. 3.4.15), y que permiten utilizar del 35 al 50% de MBR. En estas plantas, ni el líquido virgen ni el MBR se exponen al vapor o a las altas temperaturas durante el proceso de secado. Producen mezclas de excelente calidad hasta con un 40% de MBR y cumplen con todas las normas de emisión de gases.

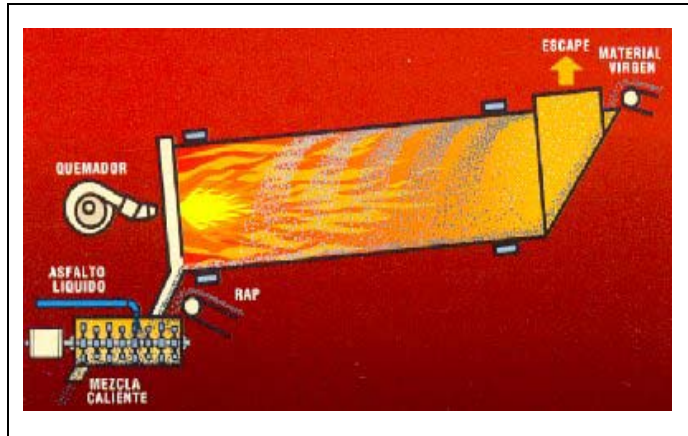


Fig. 3.4.15 Planta continua con secador de contraflujo con mezclador separado (DMC II)
(Fuente: ASTEC, 1998)

Su desventaja es que requieren un mezclador muy grande de alta potencia y un secador enfriado por aire, en especial cuando utilizan proporciones altas de MBR.

En cuarto lugar están las plantas de mezclador con tambor de contraflujo mostrada en la figura 3.4.16, y que cumplen todas las nuevas normas de emisión de

gases, pero tienen como desventaja su corto tiempo de mezcla, el cual no siempre proporciona una mezcla óptima. En condiciones de proporciones altas de MBR, la corta sección de fusión y de mezclado del tambor que posee, podría dar lugar a no fundir el MBR suficientemente, produciendo una mezcla no homogénea.

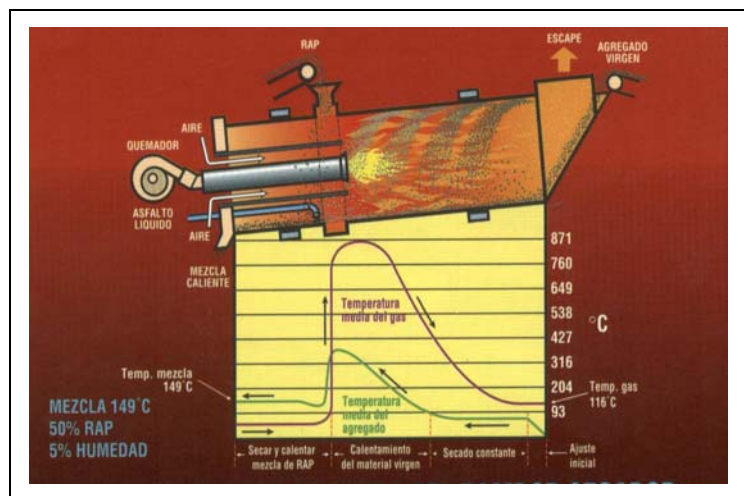


Fig. 3.4.16 Planta continua con tambor secador-mezclador de contraflujo (Fuente: ASTEC, 1998)

Por último se tienen las plantas con doble tambor o *Double Barrel* que son una combinación de un secador de contraflujo y un mezclador como se muestra en las figuras 3.4.17 y 3.4.18. El mezclador con doble tambor funciona como un *Drum Mix Coater II* con un mezclador grande ubicado debajo de la parte inferior del secador.

Este mezclador de gran tamaño da tiempo suficiente para que se funda completamente el MBR después de haberse mezclado con el material virgen sobrecalentado. El tiempo de mezcla es lo suficientemente prolongado como para obtener una mezcla muy homogénea antes de que se inyecte el

ligante nuevo en la mezcla, y hay tiempo suficiente para que los materiales combinados se enfríen a la temperatura normal de mezcla, después de haber añadido el MBR.

Durante el proceso de mezclado, toda la cámara de mezcla se llena de vapor. Dicho vapor origina una atmósfera inerte en la sección de mezcla. El vapor tiende a separar el aceite ligero, pero ya que ningún gas fluye por el mezclador, el aceite permanece en la mezcla y hace más brillante el MBR, dándole la apariencia de una mezcla de puro material virgen.

En estas plantas puede añadirse hasta un 50% de MBR sin contaminar la atmósfera con emisiones dañinas.

Al tener una alta eficacia térmica sus costos operativos se reducen sensiblemente. El calor del tambor del secador va directamente a la sección de mezcla en lugar de escapar a la atmósfera.

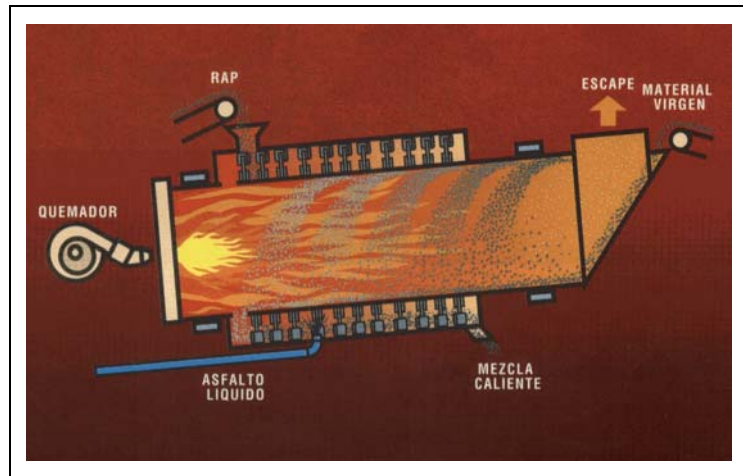


Fig. 3.4.17 Planta continua con tambor secador-mezclador de doble tambor (Fuente: ASTEC, 1998)



Fig. 3.4.18 Planta continua con tambor secador-mezclador Double Barrel (Fuente: ASTEC <www.astecinc.com>)

Plantas especiales a base de microondas

Según García (2001), existe actualmente otra tecnología que elimina totalmente los problemas medioambientales de emisiones, en especial en entornos con legislación muy restrictiva y que permite tasas de aprovechamiento del 85 al 100% de MBR, a la vez que preserva totalmente al ligante de cualquier riesgo de oxidación por la exposición a gases calientes en el momento del mezclado.

Se trata de plantas que utilizan microondas, ya hay varias en funcionamiento en Estados Unidos y hay una más en Róterdam. En este sistema, el MBR se machaca y procesa en dos o tres fracciones para un mejor ajuste granulométrico de la mezcla. Posteriormente se calienta el MBR en un primer escalón a 120°C, por medio de corriente de gases calientes y después, en un horno gigante de microondas, se lleva a 140-145°C, para llegar a la temperatura de mezclado.

Estas plantas tienen el gran inconveniente de un elevadísimo coste de adquisición y de operación.

3.4.6. Transporte, puesta en obra y compactación de mezclas asfálticas recicladas en caliente en planta

Para el transporte, puesta en obra y compactación de las mezclas recicladas en caliente en planta, se utilizan los mismos procedimientos y equipos que se emplean cuando se trata de mezclas convencionales. La única diferencia que se ha señalado en alguna ocasión, es que para porcentajes muy elevados de MBR en las mezclas, pueden ser menos trabajables que las convencionales.

Otro factor que puede ser importante dada la posible heterogeneidad de estas mezclas, es extremar los controles durante todo el proceso para asegurar la calidad final de las capas de firme construidas con estas mezclas.