

Uso de los Materiales Reciclados en los Pavimentos (Firmes)



Por los miembros del Comité Técnico Internacional 4.1 Pavimentos de Firmes de PIARC:

José del Cerro
MITMA

Jesús Díaz
IECA

Curro Lucas
REPSOL

Esta es una revisión bibliográfica realizada por el Comité Técnico 4.1 Pavimentos de la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC) sobre un texto publicado por PIARC en el que se incluye:

- Reciclado in situ empleando ligantes hidráulicos y/o bituminosos
- Reciclado en planta

A continuación, se redacta un resumen de este documento. Tras una introducción en la que explica los objetivos del reciclado y la reutilización, el ciclo de vida de un firme, el downcycling o reutilización en menor calidad, la recarbonatación de los pavimentos de hormigón, el RAP o pavimento asfáltico recuperado, el RCA o los ári-

dos de hormigón reciclado, o una tabla que ofrece una visión general de las aplicaciones de los áridos reciclados y la metodología (ya en el ciclo anterior el C7/8 incluyó un documento sobre reciclado)

Comenta los aglutinantes posibles, y distingue el lugar donde se realiza la mezcla (in situ o en planta), analizando los estudios preliminares del reciclado in situ (los estudios de campo, la caracterización de los materiales y las técnicas de evaluación no destructivas como la medida de las deflexiones (que miden la uniformidad del soporte), el radar de penetración en el suelo (tipo GPR que sirve para determinar las capas límites entre materiales diferentes) o una combinación de técnicas de investigación de pavimentos.

Árido reciclado	Carpeta	En el lugar	En la planta
áridos artificiales	Ligante hidráulico		Pavimento de hormigón
			Base de carretera
	Ligante bituminoso		Pavimento de asfalto
			Base de carretera
áridos de mezcla bituminosa	Ligante hidráulico	base de carretera	Pavimento de hormigón
			Base de carretera
	Ligante bituminoso	Pavimento de asfalto	Pavimento asfalto
		Base de carretera	Base de carretera
áridos de concreto (hormigón)	Ligante hidráulico	Base de carretera	Pavimento de hormigón
			Base de carretera
	Ligante bituminoso	-----	-----
		-----	-----
áridos de bases de carretera	Ligante hidráulico	Base de carretera	Base de carretera
	Ligante bituminoso	Base de carretera	Base de carretera

Figura 1. Posibles aplicaciones del uso de áridos reciclados

a) Reciclado in situ con ligantes hidráulicos

El reciclado in situ con ligantes hidráulicos ocupa un papel importante puesto que supone un aumento significativo de la capacidad portante, además de resultar en muchos casos la alternativa más económica. Es de aplicación en construcciones nuevas, así como en rehabilitación (no solo en todo tipo de carreteras, sino de puertos, aeropuertos, etc.) de muchos países, en los que ya existe experiencia. Se clasifica el material procedente del fresaado en:

- Material bituminoso recuperado o RAP
- Material reciclado mixto
- Material granular recuperado

Si se trata de materiales granulares y/o bituminosos lo adecuado es el cemento, empleado un ligante combinado de cal y cemento en el caso de incluir arcilla y/o limo. El proceso es:

- Ajuste de la curva granulométrica.
- Dosificación de un ligante hidráulico adecuado en superficie.
- Fresado y disgregación de las capas existentes.
- Extendido y recortado del material reciclado.

- Compactación de la capa.
- Prefisuración, en su caso. Con protección a heladas o el tráfico elevado por aumentar el contenido de cemento y es necesario prefisurar.
- Pulverización del agua para obtener la humedad adecuada.
- Colocación de la(s) capa(s) de asfalto o de la lechada o micro en superficie de vías BIT.

Medioambientalmente es muy ventajoso ya que sus exigencias ambientales son mínimas. No se extraen las capas estructurales existentes, ni se eliminan en vertederos además de no existir transporte (hay menos daños en la red adyacente). La falta de especificaciones técnicas ha hecho inviable en algunas zonas esta técnica.

Puede no ser la solución pues los problemas del agua no los corrige. Puede considerarse la base de un pavimento semirrígido o rígido (uso de catálogos o métodos mecánico- empíricos basados en el análisis y cálculo de tensiones y/o deformaciones).

La aplicación de este método no daña la subrasante del pavimento durante la ejecución. El espesor de la capa reciclada depende de los requerimientos de capacidad portante del pavimento rehabilitado (puede llegar a profundidades de 400 mm).

El cemento y la cal hidratada son los ligantes hidráulicos normalmente empleados en todo el mundo. Conglomerantes como el HRB pueden emplearse si el suelo es arcilla o limo. El tipo de cemento seleccionado es menos importante que el contenido y la densidad obtenidos. El cemento más adecuado para el reciclado son los que tienen un alto contenido de adiciones y de resistencia media 32,5 (mezcla del clinker con cenizas, escorias u otras puzolanas) en las normas EN 197-1 o ASTM C 150, o ligante hidráulico (HRB) en las normas EN13282 (de estos los hay de endurecimiento normal y rápido). El contenido mínimo debe ser superior al 3 %, siendo normal del 4 al 7%. La

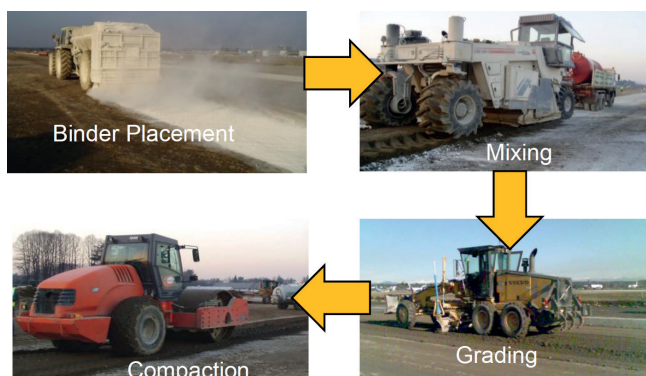


Figura 2. Principales fases de construcción del reciclado in situ con ligantes hidráulicos.

baja dosis de ligante puede causar problemas posteriores mucho más caros de resolver.

La homogeneidad, las características volumétricas y las prestaciones mecánicas son factores determinantes en mantener las prestaciones durante la vida útil del firme (diseño, construcción y mantenimiento). La resistencia a la inmersión debe ser:

$$R_{c, \text{inmerso}} / R_{c, \text{referencia}} \times 100 \% > 70\%$$

o aumentar el contenido de cemento

$$R_{c, \text{inmerso}} = R_{\text{resistencia a compresión}} \text{ en probetas 7 días curado con } > 90 \% \text{ humedad relativa } + 7 \text{ días inmersas y}$$

$$R_{c, \text{referencia}} = R_{\text{resistencia}} \text{ en probetas 14 días curado con } > 90 \% \text{ humedad relativa}$$

Es aconsejable realizar ensayos de resistencia a compresión a 28 y 90 días, y el módulo elástico en compresión. Pueden definirse las siguientes relaciones además del rendimiento mecánico de la mezcla/capas recicladas y el tiempo de curado (también depende de la naturaleza del ligante):

$$R_{c, 90d} = 1,5 R_{c, 7d}$$

$$R_{c, LP} = 12 R_{c, 7d}$$

$$R_{ti, 90d} = 2 R_{ti, 7d}$$

$$R_{ti, 90d} = 0,1 R_{c, 90d} = 0,15 R_{c, 7d}$$

$$R_{f, 90d} = 2 R_{f, 7d}$$

$$R_{f, LP} = 1/(0,442802 + (2,822844/R_{c, 7d}))$$

donde $R_{c, Xd}$ es la resistencia a compresión a X días, $R_{ti, Xd}$ es la Resistencia a tracción indirecta y R_{fxd} la Resistencia a flexión a X días

La ley de fatiga del material reciclado con cemento responderá a la expresión:

$$\sigma/R_f = 1 - 0,058 \log N$$

ó

$$\sigma = 0,65 R_f (N/106)^{(-0,035)}$$

donde “ σ ” es el esfuerzo de flexotracción provocado por una carga de eje P (kN) aplicada después de un número “N” de aplicaciones.

Algunos países disponen de catálogos de secciones de firmes reciclados con cemento. La menor pendiente de la ley de fatiga y el menor módulo aseguran un mejor comportamiento a fatiga del material reciclado con una mayor deformación elástica recuperable.

El control debe hacerse en 2 etapas: avance de los trabajos y resultado final. Conviene hacer una sección o tramo de prueba para comprobar las máquinas, la profundidad de reciclado, y la eficacia de la mezcla y equipos. El empleo de una maquinaria eficaz es un factor clave para lograr una calidad (en Francia hay criterios de clasificación según el esparcidor del ligante CVL y CVT y el mezclador). Hay que controlar al menos los materiales, el contenido de ligante, la humedad., la granulometría del suelo, la homogeneidad de la mezcla, el nivel de compactación, el comportamiento mecánico y, el aspecto y geometría (profundidad del reciclado). Conviene además

Tabla 1. Parámetros de diseño documentados en el proyecto Direct-Mat

País	Hopt	Contenido aglutinante		Pruebas mecánicas
		Compactación	Curado de las muestras	
Alemania	Compactación Estática (50 kN)	Compactación Estática (50 kN)	2 días a 20°C y 95% humedad + 26 días a 20°C y 55%	Contenido vacío; R a tracción indirecta tras 7 28 días; Sensibilidad al agua y módulo rigidez
Irlanda		Compactación Estática (130 kN)	14 días a 35°C y 20% humedad relativa	Compatibilidad; Resistencia a compresión; R a humedad; Modulo Rigidez a tracción indirecta; R a tracción indirecta; Res. a compresión
Portugal	Proctor Modificado	Compactación Estática (21 MPa/8 MPa)	1 día a Temp. ambiente + 3 días a 50°C	Sensibilidad al agua R a compresión uniaxial
España	Proctor Modificado	Compactación Estática (170 MPa/60 MPa) giratorio	3 días a 50°C	Sensibilidad al agua R a compresión uniaxial R a tracción indirecta
Reino Unido	Proctor	Proctor	3 días a 60°C	Módulo de rigidez a tracción indirecta
Wirtgen	Proctor Modificado	Compactación por impacto 2x75 golpes	3 días a 40°C	Modulo de rigidez a tracción indirecta (en seco); R. a tracción indirecta (húmeda y seca); Resist. a compresión no confinada.

controlar el espesor, la resistencia mecánica, la geometría, la capacidad portante y algunas veces, las deflexiones y las grietas reflejadas.

b) Reciclado in situ con ligantes bituminosos

El reciclado in situ con ligante bituminoso puede realizarse con emulsiones asfálticas y asfalto espumado además de otros como el filler o el cemento hidratado. Se necesita una pequeña proporción de finos para que la espuma bituminosa funcione (del orden de más del 4%). Las recuperadoras funcionan en 150 mm y 300 mm pues por encima de este rango se ralentiza la producción y pueden no lograrse capas compactables.

Suele utilizarse una fresadora aunque la disponibilidad del equipo es una consideración para el diseño de la mezcla. Se debe aclarar que el diseño de las mezclas in situ es menos preciso que en planta. La granulometría y la calidad son los parámetros de interés.

El contenido óptimo del ligante se realiza de varias maneras como se muestra en el proyecto Direct-Mat (europeo, diferente a como se hace en EEUU o en Australia donde se acepta el módulo de resistencia de los núcleos compactados Marshall). (Tabla 1)

El reciclado in situ puede realizarse sin agente estabilizador para mejorar la base. Las máquinas de reciclado, a las que se acopla camiones cisterna que puede empujar, han mejorado considerablemente constando de un tambor de corte, corazón del reciclado in situ. El fluido es añadido en la cámara donde está el tambor mediante bombeo controlándose el flujo mediante un microprocesador. Las tareas de trabajo se pueden dividir en:

- Eliminación de la antigua capa superficial bituminosa
- Corrección del perfil geométrico
- Adición de áridos y corrección de la granulometría en ocasiones
- Adición de relleno activo (cal hidratada o cemento)
- Pulverización
- Profundidad del reciclado
- Adición de agua; y del ligante
- Mezcla
- Colocación
- Compactación (inteligente en la que algunos compactadores cuentan con GPS para ver la velocidad y el número de pasadas y acelerómetros para medir la rigidez relativa). Se puede utilizar los valores de rigidez para definir un patrón de rodadura.

Tras un análisis a los equipos (recicladoras sobre neumáticos u orugas, ...) y del control se finaliza este capítulo, no sin antes indicar el posible empleo del RAP en las mezclas in situ por el método "hot in place" (HIPAR) con un equipo especial móvil con calentador que ablanda la superficie del pavimento asfáltico, un escarificador, la mezcla, el extendido y la compactación, todo ello con o sin material suplementario. El objetivo del HIPAR es mejorar las alteraciones superficiales hasta una profundidad de 50 mm. Se puede distinguir entre el rehace (sin cambios en la formulación de la mezcla asfáltica como el recapado o el remix) , la remezcla o esta compacta.

Tabla 2. Idoneidad del uso del Asfalto Recuperado			
Origen del asfalto recuperado	Idoneidad para su uso en		
	Capa superficial de asfalto	Capa intermedia de asfalto	Capa base de asfalto
Capa de rodadura o rodamiento de asfalto	preferencia ¹⁾	preferencia	adecuado
Superficie de asfalto y capa intermedia	adecuado con la precondición ²⁾	preferencia	adecuado
Capa intermedia de asfalto	adecuado con la precondición ²⁾	preferencia	adecuado
Capa base de asfalto	No es adecuado	No es adecuado	preferencia
preferencia: el mayor valor añadido está asegurado, adecuado: no se aprovechan todas las ventajas técnicas y económicas, apto con condición previa - sólo referente a una prueba especial, ns - no apto. 1) normalmente sólo para mezclas de hormigón asfáltico AC 2) tras un tratamiento especial			

Tabla 3. Directrices para las pruebas de calidad del árido de RAP recuperado

Contenido de RAP en la mezcla	Pruebas de áridos recuperados de RAP
≤ 30%	• Comprobar las propiedades intrínsecas de los agregados • Clasificación de los áridos
> 30%	• Comprobar las propiedades intrínsecas de los agregados • Clasificación de los áridos • Valor de trituración de los áridos (ACV) / resistencia a la fragmentación - Coeficiente de Los Ángeles • Valor de aplastamiento del agregado de finos (10% FACT) o • Índice de escamación • Valor de la piedra pulida PSV (si se requiere) • resistencia a la congelación y descongelación (si se requiere)

Tabla 4. Directrices para las pruebas de calidad del betún recuperado del RAP

Sustitución de betún RAP	Pruebas de betún recuperado RAP
≤ 15%	• Contenido de betún • Contaminantes (presencia de alquitrán de hulla)
> 15%	• Contenido de betún • Contaminantes (presencia de alquitrán de hulla) • Punto de ablandamiento o • Penetración o • Viscosidad • Parámetros de grado de rendimiento: • G*, δ, JNR, utilizando el reómetro de cizalla dinámico (DSR) • Valor de S y m mediante el reómetro de viga de flexión (BBR) • Composición del betún

c) Reutilización en planta del pavimento de asfalto recuperado (RAP)

El RAP es generalmente procesado por trituración (fresado), cribado y la colocación en pilas separadas, listo para ser utilizado como material constitutivo del asfalto, después de haber sido probado, evaluado y clasificado de acuerdo con las normas pertinentes.

El contenido de RAP de una mezcla puede definirse como la masa total de RAP expresada como un porcentaje de la masa total de la mezcla. Las limitaciones vienen determinadas por las propiedades del ligante virgen. El betún del RAP también puede clasificarse según los parámetros del grado de rendimiento (PG Grade) o por el punto de reblandecimiento. Con más de 15%, es necesario cribar y fraccionar el RAP.

Almacenar por separado el RAP de la capa de rodadura o de la capa de rodadura y de la capa intermedia. El RAP también debería almacenarse por separado en función del objetivo final de uso. La idoneidad de utilizar varios tipos de RAP se muestra en la tabla 2.

El asfalto recuperado se clasificará en función de los materiales que lo componen y de sus características de

rendimiento. Una de las características más importantes es la homogeneidad

La directriz para los ensayos sobre la calidad del árido recuperado de cada fracción de RAP se basa en el contenido de RAP y se presenta en la tabla 3.

La sustitución del betún de RAP es la base de la directriz para los ensayos sobre la calidad del betún recuperado, tabla 4.

El procedimiento para el estudio del RAP es, a grandes rasgos, el siguiente

- Moler la muestra de RAP del sitio designado.
- Procesar el RAP en al menos las fracciones mínimas requeridas.
- Determinar el rendimiento porcentual medio de cada fracción de RAP procesada.
- Realizar pruebas de contenido de betún en cada fracción de RAP.
- Realizar pruebas de clasificación de los áridos en cada fracción de RAP.
- Calcular la sustitución (nominal) del betún RAP que debe especificarse.

- Determinar las siguientes propiedades del betún recuperado RAP:
 - Punto de reblandecimiento y/o
 - Penetración y/o
 - Pruebas de betún PG (JNR, G*, , etc.).
 - Composición del betún
- Deben tomarse muestras representativas de RAP utilizando una fresadora

Cuando se utiliza el RAP de mezclas en las que se ha utilizado un betún modificado y/o un aditivo modificador, y/o la propia mezcla contiene un betún modificado o un modificador, la cantidad de contenido de RAP debe limitarse a un máximo del 20 % en masa de la mezcla total. En el caso de la adición de una gran cantidad de RAP, se pueden utilizar rejuvenecedores para restaurar las características del betún envejecido.

Se indica las fórmulas para conocer la penetración y el punto de reblandecimiento en el betún, indicando los ensayos de tipo y el diseño de la mezcla de trabajo cuando se use RAP.

Así se debe indicar:

- cada tamaño de árido: fuente y tipo
- el betún: tipo y grado,
- relleno: fuente y tipo,
- aditivos: fuente y tipo
- asfalto regenerado: declaración de la gama de propiedades admisibles y métodos de control además de todos los componentes.

De la formulación de la mezcla se facilitará:

- la composición del objetivo de entrada cuando se utilice la validación de laboratorio, destacando el porcentaje de cada uno de los agregados, la distribución granulométrica de la mezcla de áridos, el contenido de betún y el contenido de aditivos.
- las temperaturas máximas y mínimas de mezcla para las mezclas con betún modificado o duro o con aditivos
- temperatura de preparación cuando se añaden aditivos para reducir la temperatura de mezclado y de colocación.

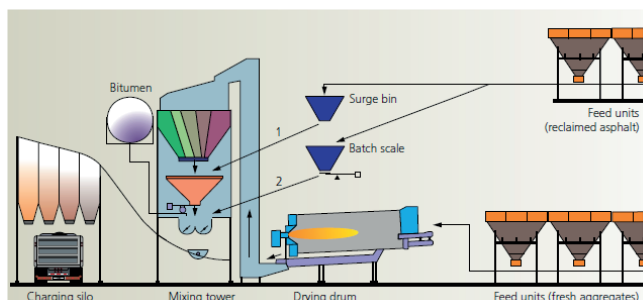


Figura 3. Planta de mezcla por lotes - calentamiento de asfalto recuperado con áridos calientes, adición por lotes (1: adición a la báscula de áridos; 2: adición a la mezcladora)

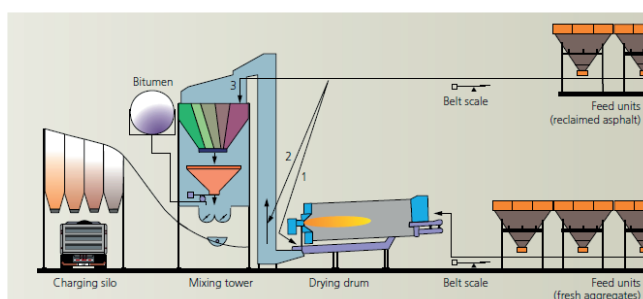


Figura 4. Planta de mezcla por lotes - calentamiento del asfalto recuperado por los áridos calientes, adición continua (1: adición a la salida del tambor de secado; 2: adición al elevador caliente; 3: adición al bypass de la criba)

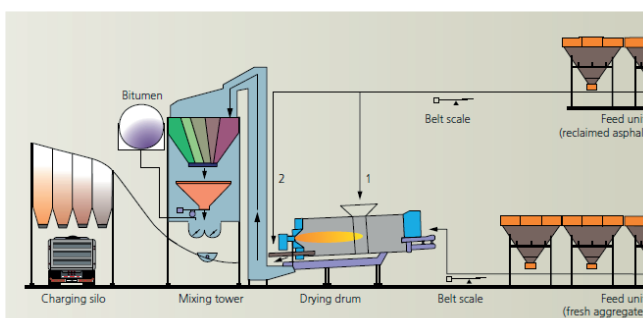


Figura 5. Planta de mezcla por lotes - calentamiento del asfalto recuperado junto con los áridos, adición continua (1: tambor de secado - sistema de alimentación central; 2: adición al tambor de secado a través de la pared frontal del lado del quemador).

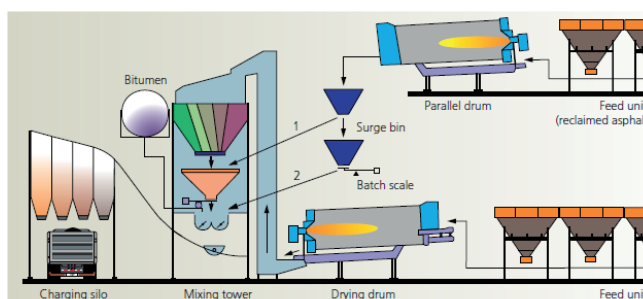


Figura 6. Planta de mezcla por lotes - Calentamiento del asfalto recuperado en un dispositivo separado (tambor paralelo) (1: adición a la báscula de áridos; 2: adición a la mezcladora)

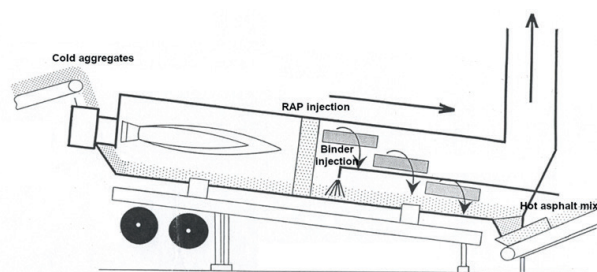


Figura 7. Tambor de calentamiento, secado y mezcla.

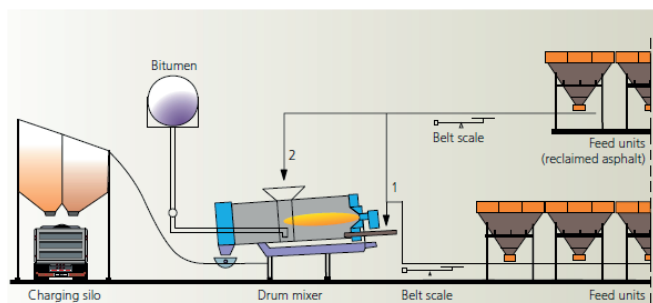


Figura 8. Planta de mezcla continua - calentamiento del asfalto recuperado junto con los áridos (1: adición junto con los áridos; 2: adición separada en el centro del tambor mezclador)

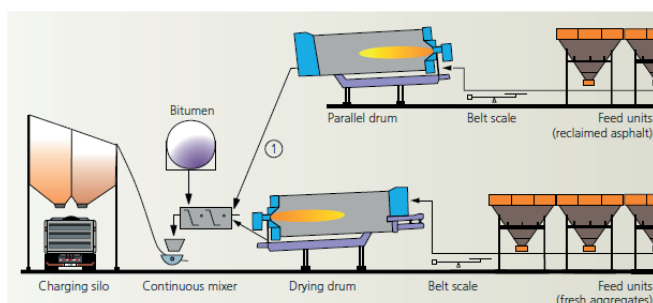


Figura 9. Planta de mezcla continua -Calentamiento del asfalto recuperado en el dispositivo separado (tambor paralelo) de la planta continua)

De las características de la mezcla asfáltica se facilitará la siguiente información:

- características volumétricas: y entre ellas el contenido de huecos de aire, los rellenos con betún y del contenido de huecos en un agregado mineral,
- sensibilidad al agua,
- resistencia a la deformación permanente,
- características funcionales sofisticadas destacando la rigidez, la resistencia a la fatiga y las propiedades a baja temperaturas.
- otras características relevantes en función del tipo de mezcla asfáltica

Entre los diferentes tipos de plantas mezcladoras de todo el mundo, se suelen emplear las discontinuas:

- Plantas discontinuas o de lotes con un tambor de calentamiento separado (adición en caliente),

- Plantas discontinuas o de lotes sin tambor de calentamiento separado (adición en frío),
- mezcladoras de tambor,
- plantas mezcladoras adecuadas para producir mezclas asfálticas en caliente a partir de casi el 100% de asfalto recuperado.

d) Reciclado de materiales en un pavimento de hormigón con mezclas realizadas en planta

Los áridos reciclados incrementan el interés en la economía circular, pueden utilizarse en toda la profundidad o pueden limitarse a la capa inferior de un pavimento de hormigón de dos capas, aunque solo se utilizan los gruesos para evitar consumo excesivo de cemento. Pueden ser:

- áridos de hormigón reciclado de alta calidad (RCA) o de calidad normal procedentes de residuos de construcción y demolición (CDW) o de bases y subbases.
- áridos reciclados procedentes de otros residuos minerales de la construcción
- áridos asfálticos reciclados (RAA o RAP)
- áridos artificiales.

En cualquier caso, hay que eliminar el recubrimiento asfáltico (si lo hay), el sellador de juntas y de los parches para minimizar los contaminantes y romper el pavimento al tamaño del material necesario, así como retirar las piezas rotas y organizar su transporte.

La demolición de estructuras de hormigón se realiza generalmente con martillos de impacto o martillos de resonancia.

Los pasos son trituración y clasificación (estando incluidos el pretratamiento, lavado, clasificación para eliminar contaminantes, ...), la calidad y uso del árido RCA ("trituración inteligente") y las características del RCA, en el que se incluye la tabla 6.3 de características con varios apartados de propiedades mecánicas y químicas con los valores umbrales de los áridos.

Hormigón con áridos reciclados

Indica que Las características de calidad de todos los materiales deben conocerse de antemano para cumplir los criterios de diseño y propiedades de la mezcla de hormigón, incrementándose la relación de agua y reduciéndose la resistencia a la compresión y el módulo. Los áridos finos o la arena no es recomendada por a su alta demanda de agua y a su efecto negativo en el rendimiento del hormigón.



Figura 10. Martillo hidráulico, guillotina, rodillo poligonal y rompedor de resonancia.

Hormigón con áridos de asfalto reciclado (RAA o RAP)

La sustitución del árido natural por el árido asfáltico conduce a la disminución de la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción y el módulo elástico. No tiene efecto positivo sobre la tendencia al agrietamiento del hormigón aunque estudios estadounidenses y franceses demuestran una mejor resistencia a la fatiga.

El diseñador debe sopesar la economía y ganancias ecológicas de la sustitución de los áridos por el RAP frente al necesario sobreespesor o el coste del cemento para mantener las propiedades.

Pavimentos de hormigón de dos capas

Construidos con dos hormigones diferentes, los componentes caros sólo son necesarios en la capa superior de espesor limitado, sin embargo, los materiales más ba-

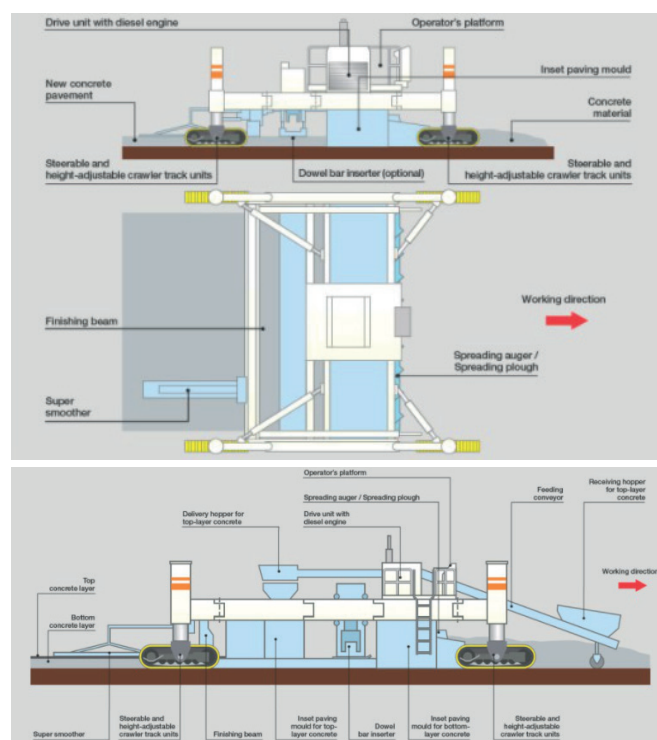


Figura 11. Detalles de construcción

ratos compensan los costes adicionales de construcción. Las ventajas medioambientales son claras.

Los pasos serán: recogida de datos relacionados con el tramo de carretera existente, encuesta sobre el terreno, estudios de laboratorio de los materiales procedentes de los núcleos perforados o de las fosas de prueba, decisiones relativas a las principales cuestiones de reciclaje, demolición del antiguo pavimento de hormigón, operaciones de trituración y cribado, producción de un nuevo pavimento de hormigón de cemento y construcción del nuevo.

Pavimentos de hormigón compactado con rodillo (rcc)

Técnica híbrida que permite utilizar equipos de asfalto para conseguir un pavimento con propiedades (resistencia, durabilidad) similares a las de los pavimentos de hormigón vibrado y en la que los avances en maquinaria y métodos de construcción, junto con casi 50 años de experiencia, permite cualquier aplicación.

Reciclado de materiales en capas de base con mezclas fabricadas en planta

Las aplicaciones de bases no ligadas (granulares) son el uso más común del ACR producido a partir de pavimentos de hormigón. Las capas base ligadas hidráulicamente pueden dividirse según el tipo aglutinante o la clase de resistencia. El RAP o pavimento de asfalto recuperado ha demostrado un rendimiento satisfactorio como base granular para carreteras de 20 años.

Otros materiales incluidos son las escorias de alto horno, las escorias de acero, las tejas de asfalto (que incluyen cemento asfáltico, agregado mineral y celulosa o fibra de vidrio), el ladrillo (que pueden ser estructurales, adoquines y refractario) y la ceniza (subproducto en una central eléctrica de carbón).

Hay una colección con varios casos de estudio de todos los tipos de reciclado. ❖