

empleo en carreteras de residuos urbanos^(*)



Por Prof. J. JAVIER DIEZ

La incineración de residuos urbanos se está utilizando cada vez más en todo el mundo como medio de eliminación de basuras. Los productos resultantes de la incineración se pueden emplear como materiales de construcción en algunos casos, de los cuales el empleo en carreteras es el más importante hasta la fecha. Por otra parte, algunos componentes de las basuras, como son caucho, vidrio y plástico, pueden aprovecharse después de su separación previa del conjunto. Finalmente, los lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales también pueden utilizarse con algunas precauciones.

Se incluyen en este trabajo todos los residuos urbanos, tratados o no, desde las basuras indiscriminadas hasta cada uno de sus componentes aislados. En nuestro país es todavía frecuente el vertido de las basuras en determinadas zonas próximas a las ciudades. Sin embargo, conforme crece el volumen de estos residuos, se manifiesta como única solución satisfactoria la incineración o la pirólisis

del conjunto o de la fracción residual de algunos procesos de separación de fracciones concretas (metales, vidrio, est.).

La composición media de las basuras urbanas es de un 50 por 100 de papel, un 12 por 100 de restos alimenticios, un 10 por 100 de madera y otros vegetales, un 10 por 100 de textiles, plásticos y gomas, un 9 por 100 de metales y otro 9 por 100 de vidrio (1). Algunos de estos componentes admiten una separación y uso, pero también pueden someterse a la incineración o la pirólisis.

I. Residuos de incinerador.

Su producción es creciente en los países industrializados, donde el proceso de incineración reduce el peso de las basuras en un 70 por 100 y el volumen en un 90 por 100, y, dado que tal proceso requiere pequeño consumo adicional de energía, constituye un buen medio de reducción de las basuras con tal que se adopten adecuadas medidas para salvaguardar el medio. Estos residuos se componen fundamentalmente de vidrio, metales, cerámicas, piedras, cenizas y algún material incombustible. En la tabla I.1 se detalla

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de marzo de 1980.

TABLA I.1

Análisis de cenizas y escorias de incinerador (1) (*)

Componentes	2 incineradores continuos		4 incineradores a hornadas		Incin. de horno rotatorio
	Gama	Valores medios	Gama	Valores medios	
Vidrio	45,1 - 55,2	50,1	43,3 - 52,4	48,4	59,9 (**)
Metales ferrosos	23,6 - 32,8	28,2	27,0 - 36,6	31,5	40,9
Cenizas totales	15,9 - 18,6	17,2	13,1 - 19,4	17,0	59,9 (**)
Pétreo y cerámicos	1,2 - 2,3	1,6	1,4 - 2,9	2,2	0,1
Metales no ferrosos	1,2 - 4,1	2,6	0,7 - 1,1	1,0	0,1

(*) Estos resultados suponen humedad y porcentaje de combustibles nulos. La humedad puede suponer de un 24 a un 40 por 100 y los elementos combustibles un 4 a un 13 por 100.

(**) Imposible distinguir ambas fracciones.

EMPLEO EN CARRETERAS DE RESIDUOS URBANOS

TABLA 1.2

Granulometrias de los residuos de incinerador

Tamiz		1 1/2	1/2	4	16	50	100	:00
% cernido	Máx.	94	72	50	30	16	12	10
	Mín.	68	52	35	17	8	4	3
	Med.	81	62	42,5	23,5	12	8	3,5

la composición final de algunos residuos en función del tipo de incinerador.

Los valores globales y la gama de variabilidad son:

- Vidrio, 48 por 100 (40-68).
- Materiales minerales (21 por 100 (13-40)).
- Metales ferrosos, 14 por 100 (5-25).
- Metales no ferrosos, 4 por 100 (3-6).
- Combustibles, 13 por 100 (4-28).

La composición química de estos residuos es muy variable con los países, el tipo de incinerador y el procedimiento empleado. El componente más abundante es la sílice que oscila entre el 35-60 por 100; también son abundantes los óxidos de hierro, aluminio y calcio (5-25 por 100 cada uno) y los óxidos alcalinos (alrededor de un 8 por 100 en total); otros componentes menores son los óxidos de cinc, magnesio, titanio, manganeso, plomo y cobre, el carbono y los iones sulfato y fosfato.

Después de separar los objetos de mayor tamaño, el resto presenta una granulometría bastante continua. Conviene también separar los metales antes de su empleo como árido. Se recomienda su almacenamiento durante unos meses —pocos— con objeto de reducir los combustibles, sobre todo los que forman parte de las fracciones más finas (cernido por el tamiz número 100).

Recientemente, también se empleó la pirólisis para reducir el volumen de basuras; es un proceso que descompone químicamente las sustancias orgánicas por el calor a temperaturas entre 540° y 1.100° C en ausencia de oxígeno. En esencia es el mismo proceso que el de la destilación de carbón para obtener coque para la industria siderúrgica. Se originan entonces algunos gases, líquidos or-

gánicos y un residuo carbonizado. Este proceso presenta varias ventajas sobre la incineración —menor volumen de residuos, tratamiento total de plásticos y gomas, menor o ninguna contaminación de aire y agua y producción de fuel aprovechable—. Aunque se encuentra en la fase de centrales pilotos a escala pequeña, el potencial de empleo en carreteras del residuo sólido final merece su consideración aquí. Los diferentes sistemas de pirólisis —Torrax, Purox, Landgard— recuperan, en general además los metales ferrosos y los vidrios, el residuo final tiene una estructura más o menos vítrea.

La variabilidad de los residuos de incinerador ha conducido a un intento de clasificación basado en el grado de calcinación en el momento de la descarga de la planta incineradora que, a su vez, depende de la eficiencia de ésta y de la composición y humedad de los "inputs", que no sólo varían con la región geográfica y cultural, sino con la época del año. El grado de calcinación no sólo es un índice de las características del residuo final, sino de la eficacia de la operación. Sin entrar a analizar los varios tipos de incineradores ya en uso hay que partir de que el grado de calcinación se favorece con la agitación del material durante el proceso. La clasificación propuesta es cualitativa y distingue residuos bien calcinados (Well burned-out), medianamente cal-

cinados (intermediate burned-out) e insuficientemente (poorly) calcinados. Los primeros suponen una reducción en peso al 20-30 por 100, los segundos al 25-35 por 100 y los últimos al 30-40 por 100 (2). Conviene, sin embargo, tener presente que la eficacia incineradora depende, además del tipo de planta, de los objetivos de la misma y de su régimen de funcionamiento y conservación; estos procesos tratan de reducir el volumen de basuras y no está entre sus objetivos el lograr un producto acabado de "calidad" uniforme. Los productos de la pirólisis son casi siempre bien calcinados, vítreos y de granulometría continua con reducciones al 15-20 por 100 en peso.

Es evidente que esta clasificación deja mucho margen a la estima subjetiva por lo que es poco operativa y conviene introducir alguna base de cuantificación. Para ello se utilizan la pérdida al fuego y las impurezas orgánicas (por colorimetría), ya que ambos parámetros están en relación con el grado de calcinación. Para los correspondientes ensayos referencias 2 y 3. Los tres tipos descritos corresponden a pérdidas al fuego de < 5 por 100, 5-10 por 100 y > 10 por 100, respectivamente.

La granulometría suele ser continua y bien graduada y, aparte algunos elementos gruesos anómalos, tiene un tamaño máximo de 76,2 mm (3") por término medio y un porcentaje

"filler" del 6,5 por 100, tamaño medio. La curva granulométrica media y su variabilidad (2) se da en la tabla 1.2.

La humedad de los residuos otro parámetro que se halla relación con el grado de calcinación ya señalado, pero también con la edad de los mismos. Lo mismo ocurre con el peso específico aparente que es tan mayor cuanto mayor es aquél. Puede oscilar de 0,8 a 1,3 kilogramos por decímetro cúbico.

Los residuos de la pirólisis difieren considerablemente de los anteriores; en primer lugar, eliminados magnéticamente la mayor parte de los metales ferrosos y por flotación el polvo carbonizado, contiene una mayor proporción de vidrio (65 por 100) y de materia mineral (28 por 100); pero, además, su granulometría es mucho más fina con tamaño máximo de 1/4 a 3/8" y con una proporción de "filler" de 0-4 por 100. La inflexión de las curvas granulométricas se encuentran en torno al tamaño 8; finalmente, la escasa porosidad y la naturaleza vítrea de estos residuos justifican un muy escaso contenido en humedad (< 1 por 100, normalmente); el peso específico es también considerablemente más alto (1.963-1.922 Kg/litro).

1.1. Empleos habituales.

Actualmente se usan en varios países tanto en las capas del firme como en elementos accesorios y también en calzadas peatonales, estacionamiento y carreteras de tráfico ligero (Dinamarca) y en pistas forestales y en taludes (Alemania). El comportamiento en todos los casos mejora, como es lógico, con la eliminación en los acopios de los componentes combustibles. Para estos usos se eliminan los elementos superiores a 45 mm y se aplica directamente, sin ligantes y prácticamente sin machaqueo ni ajuste posterior de la granulometría.

Pero es en USA donde con más variedad y generalidad se han empleado los residuos de incinerador. No sólo como relleno sino en la construcción de terraplenes, en sub-bases de aparcamientos y pistas industriales y en algunas calles urbanas (2), después de la Segunda Guerra Mundial. Aunque las experiencias no parecen haberse realizado de manera muy ordenada, recientemente (2-3) se han puesto a punto la tecnología general y las instrucciones para el control y ensayos de los materiales y de la obra terminada. Se han estudiado varias posibles aplicaciones y los resultados parecen haber sido claramente favorables al empleo de estos residuos como áridos de mezcla bituminosa, aunque no tanto como material para estabilizaciones con ligantes hidráulicos. Pasaremos revista brevemente a estos estudios.

1.2. Empleos recientes y en experimentación.

a) Como material para terraplenes y exp'andadas son empleables los residuos medianamente o bien calcinados. Los demás, sólo si se ha permitido su alteración y combustión en acopios adecuados durante al menos seis meses o un año, según los casos. En todo caso los elementos de gran tamaño, y los restos metálicos, de madera, etcétera, deben separarse, para lo que se pueden emplear técnicas magnéticas, de tamizado, o simplemente basados en un rastreo manual rápido. Con objeto de determinar la humedad óptima de compactación se emplea el ensayo Proctor, según la especificación ASTM, D698, método C que establece un tamaño máximo de 3/4" (19,1 mm); pero se deben tener en cuenta algunas consideraciones. En primer lugar, los diversos componentes de estos residuos (metales, vidrio, cenizas...), ni están uniformemente repartidos en todo el conjunto, ni tienen la misma afinidad por el agua, te-

niendo además diferentes grados de degradación durante la compactación, lo que podría afectar a los resultados del ensayo debido al cambio progresivo de las características durante el mismo; por esta última razón se deben emplear porciones distintas de cada muestra para la determinación de cada punto recomendándose cinco puntos por muestra y al menos repetir el ensayo tres veces. Como consecuencia de todo ello es fácil que no aparezca un claro óptimo Proctor, lo cual es, por otra parte, común en otros suelos, por lo que queda un elemento subjetivo a la decisión, que ha de basarse en tomar como humedad máxima aquella a la que comienza a aparecer encharcamiento y como densidad óptima la correspondiente a ese momento. Humedades óptimas del 16-20 por 100 son normales, con densidades de 1.200-1.700 Kg/m³. En relación con las consideraciones anteriores se recomienda el establecimiento de un plan adecuado de puesta en obra y compactación que permita acopiar durante el tiempo adecuado para conseguir la humedad de compactación; en el caso de los residuos bien calcinados puede ser necesaria la adición de agua. El espesor de las capas de compactación debe ser de 8-12" (20-30 cm) y no se debe extender la capa siguiente hasta lograr el 95 por 100 de la densidad Proctor (con las consideraciones hechas) en la inmediatamente anterior. En el último metro del terraplén, las capas no deben exceder los 20 centímetros antes de compactación, exigiéndose entonces una densidad 100 por 100. La superficie superior conviene sellarla con un cut-back de curado rápido o con una emulsión en aplicación uniforme de unos 0,5-1,5 litros por metro cuadrado; ello evita la evaporación y formación de polvo e impide la penetración de agua en el terraplén. El equipo de compactación puede ser cualquiera, pero parece ló-

EMPLEO EN CARRETERAS DE RESIDUOS URBANOS

TABLA 1.3

Huso granulométrico de residuos de incinerador para bases estabilizadas

Tamiz	3/4	3/8	4	16	50	100	200
% cernido	75-97	41-77	24-51	10-30	3-21	2-16	0,5-12

gico emplear vibración u otro apto para suelos no cohesivos. Sólo queda recordar la posibilidad de contaminación de aguas por filtración si se emplea en puntos próximos a fuentes o capas freáticas aprovechables.

b) Como material a estabilizar para capas de base, son escasas las experiencias de obra ejecutados, aunque se han realizado abundantes estudios en laboratorio (2); no obstante, existe alguna patente, con empleo de cal apagada, que permite el empleo de residuos con mayores proporciones de carbono (pérdida al fuego). De los ensayos con varios estabilizadores sobre residuos de las tres diferentes calidades con o sin adición de un 50 por 100 de árido natural se deduce:

— La resistencia a compresión a los siete días de curado a 38° C se ve mejorada por la adición de pequeñas (4 por 100) proporciones de cal y, aún más, con la adición simultánea de un 12 por 100 de cenizas volantes y la mezcla con áridos naturales aumenta la resistencia, pero se alcanzan valores apreciables para residuos bien calcinados. La durabilidad a ciclos repetidos de hielo-deshielo es muy pequeña, salvo con la adición de cenizas volantes, en cuyo caso mejora claramente, menos del 10 por 100 de pérdidas (ASTM, D560). Se pueden alcanzar resistencias de hasta 25-30 Kg/cm² a los seis meses (la mitad a los veintiocho días) de curado; y con cenizas volantes de hasta 20-25 Kg/cm² a los siete días de curado.

— La estabilización por cemento (8-12 por 100) permite alcanzar aún mayores resistencias con durabilidades muy buenas (pérdidas menores al 5 por 100). Con residuos bien calcinados, se alcanzan resistencias de hasta 60 Kg por centímetro cuadrado a

los siete días de curado a 21° C y de hasta 100 Kg/cm² con un 50 por 100 de áridos naturales. Sin embargo, descienden mucho con residuos menos calcinados.

En cualquier caso el principal factor a cuidar en los residuos es la granulometría, análoga a la de otras estabilizaciones; el tamaño máximo se establece en 1,5 pulgadas, para lograr lo cual se separan los más gruesos y se recurre con un machaqueo de los que lo admiten. Por supuesto deben eliminarse los metales, trozos de madera, etc.

El huso granulométrico se detalla en la tabla 1.3, los residuos de pirólisis deben mezclarse con áridos convencionales para lograr la adecuada granulometría.

El buen comportamiento de la estabilización dependerá de un adecuado proyecto de la mezcla de residuos y de ligante (y de áridos naturales en su caso) y de la humedad de compactación. Los residuos acopiados previamente tienen ventajas de todo tipo, algunas de las cuales ya se han mencionado, pero antes de su empleo deben analizarse y corregirse en los diversos aspectos mencionados, desechándose los que contengan sustancias potencialmente peligrosas salvo justificación adecuada. Las proporciones del aditivo dependen de su naturaleza (6-15 por 100 de cal, 10-25 por 100 de puzolanas, 4-12 por 100 de cemento) y, en sentido inverso, de la densidad seca del residuo, y la elección correcta debe basarse en ensayos de re-

sistencia a compresión y de durabilidad y/o susceptibilidad a la humedad; en orden a lograr el óptimo económico conviene realizar dos series de ensayos, con y sin el empleo del 50 por 100 de áridos naturales. La determinación del agua de compactación se puede basar en el ensayo Proctor, pero teniendo en cuenta las consideraciones hechas más arriba; el contenido óptimo de agua oscilará entre el 15 y el 20 por 100 sin áridos naturales y entre el 10-15 por 100, con ellos al 50 por 100 y variaciones en el porcentaje de ligante no parecen afectar al mismo. Para la ejecución y ensayo de las probetas, ver referencias 2 y 3. Las resistencias a compresión mínimas a los siete días deben ser: con cal 12 Kg por centímetro cuadrado para tráfico ligero y aparcamiento y 18 Kg/cm² para tráfico medio y pesado; con puzolanas, 18 y 24 Kg/cm², y con cemento, 24 y 40 Kg/cm², respectivamente. A los veintiocho días deben incrementar en un 90 por 100 su resistencia. Para recibir las capas superiores del firme se les exige valores del C.B.R. superiores a 80, en todos los casos. Finalmente, las estabilizaciones con cal y/o puzolanas no deben perder más del 25 por 100 de resistencia tras el ensayo de durabilidad ASTM, DC593 (saturación al vacío), y las de cemento no más del 14 por 100 de pérdidas en peso tras 12 ciclos de hielo-deshielo.

Las mezclas deben ejecutarse en la planta próxima a la obra para mejor controlar el agua de compactación, ya que ésta es

EMPLEO EN CARRETERAS DE RESIDUOS URBANOS

TABLA 1.4

Huso granulométrico de residuos para uso en rodadura

Amiz (ASTM)	3/8	4	8	16	50	100	200
Cernido	88-98	60-82	42-57	26-44	12-24	7-16	4-13

operación más determinante; debe huirse de trabajar a temperaturas menores de 4° C, y los espesores compactados de cada capa no deben exceder los 10 cm sin bajar de los 10 cm. El escarificado de los dos últimos centímetros de cada capa para la conservación de su humedad, previas a la extensión de la siguiente, el adecuado control de densidades (98 por 100) y, sobre todo, en la capa superior (100 por 100), el sellado de la superficie de esta última y otras reglas de la buena práctica son comunes con otras estabilizaciones. El tráfico no debe abrirse hasta la ejecución de las capas superiores del firme.

c) Como árido para mezclas parece ser el empleo más prometedor de estos materiales. Las pruebas de laboratorio son concluyentes (3) y se han visto confirmadas en tramos experimentales, aunque aún no puede recomendarse su empleo en capas de rodadura. Como requisitos al material se establecen la granulometría adecuada (como la de estabilizaciones, salvo en rodadura en que el tamaño máximo se sitúa en 3/4" (19 mm) (tabla 1.4) una pérdida al fuego menor del 10 por 100, o, mejor, del 5 por 100, y una pérdida por abrasión en Los Angeles inferior a 40, aunque este ensayo ha de interpretarse adecuadamente dada la posible presencia de materiales de gran tamaño, por una parte, y de cenizas y material combustible por la otra. El peso específico suele oscilar entre 2,2 y 2,6 gr/cm³. El ensayo de laboratorio recomendado para proyecto y control de ejecución es el Marshall y de abundan-

tes experiencias se puede concluir:

- El contenido óptimo de ligante es del orden de un 50 por 100 menos si se emplea una mezcla a partes iguales de residuos y áridos naturales (5-10 por 100) que si sólo se usan los residuos, y ello en todos los tipos de mezclas ensayados (abiertas y densas). El contenido es mayor que en mezclas con otros áridos debido a la capacidad de absorción de alguna fracción de los residuos.
- En mezclas abiertas para capas de base la estabilidad mejora sensiblemente con la mezcla con áridos naturales al 50 por 100, mientras que no es indicativo el efecto de la eliminación magnética de metales.
- En mezclas densas para capas de base la mezcla con áridos naturales sólo aumenta la estabilidad si se emplean residuos no bien calcinados, pero con ello se logra entrar en especificaciones, y tampoco aquí es indicativa la eliminación magnética de metales.
- En mezclas para capas de rodadura la adición de áridos naturales sólo ofrece ventajas con residuos mal calcinados o medianamente calcinados sin elementos metálicos, siendo la separación magnética de estos sólo significativa —y perjudicial— en este último caso. También en estas mezclas es posible entrar siempre en especificaciones. La adición de cal en pequeñas proporciones

(2 por 100) no mejora sensiblemente la estabilidad, pero sí la resistencia conservada tras el ensayo de inmersión-compresión.

- Los valores de la fluencia son erráticos y, en algunos casos pueden salirse de especificaciones si se quiere una cubrición completa del material granular (a este respecto diremos que la estabilidad máxima se logra para porcentajes de ligante inferiores a los necesarios para esta completa cubrición y que son los que aquí se han considerado).
- En el cálculo de huecos ha de tenerse especial cuidado en la determinación de los pesos específicos dada la capacidad de absorción de los residuos (2).
- En general, siempre es posible lograr entrar en especificaciones jugando con la granulometría, el tanto por ciento de ligante y el empleo combinado de áridos naturales.
- En cualquier caso se recomienda la eliminación previa de los metales ferrosos que, por oxidación, podrían afectar a la adhesión del asfalto; además estos residuos tienen una recuperación.
- Tras una separación como la mencionada antes todos los residuos suelen tener una granulometría adecuada, pero sólo se recomienda emplear en mezclas bituminosas los bien calcinados, aunque se admiten abiertamente los intermedios.
- En el caso de residuos de pirólisis no es necesaria ninguna separación previa, aunque sí una cierta combinación con otros áridos que modifique y extienda la curva granulométrica.
- Desde el punto de vista económico, aunque las mezclas con residuos de incinerador requieran un mayor porcentaje de ligante, como tales

residuos tienen menor peso específico que otros áridos, el consumo total de ligante por unidad de superficie pavimentada es comparable y, en cualquier caso, la utilización de la mezcla de residuos y áridos naturales, además de mejorar las características de la mezcla y de permitir ajustarse a la curva granulométrica elegida, reduce el consumo de ligante. La proporción óptima de residuos se cifra entre el 40 y el 55 por 100 en peso.

- Las especificaciones del ensayo Marshall (con 75 golpes para tráfico pesado) se establecen en 250, 500 y 600 kilogramos por centímetro cuadrado de estabilidad para capas de base, intermedia y de rodadura, respectivamente, correspondiendo a fluencias de 2-5, 1,5-4 y 1,5-4 y a porcentajes de huecos en aire de 3-8, 3-5 y 3-5, también respectivamente. No se deben descuidar los otros dos porcentajes de huecos pero, dada la dificultad de su determinación, aún no se han propuesto límites a los mismos. Y en todo caso no debe emplearse un contenido de ligante que no logre la completa cubrición de los elementos granulares, o un 95 por 100 en el caso de capas de base, y ello tanto por lograr una adecuada resistencia al agua como una buena trabajabilidad de la mezcla, sin duda más crítica cuando se emplean estos residuos con fracciones de gran capacidad de absorción.

Todas estas conclusiones deben tenerse en cuenta a la hora de fabricar, extender y compactar las mezclas; desde el acopio, selección y control de los materiales, hasta la fijación y control de la fórmula de trabajo, los espesores de extensión, la energía de compactación y el control de densidades. Conviene

añadir que se debe cuidar la temperatura de compactación como en el caso de las mezclas clásicas, lo que afecta a la ubicación de la planta y/o a las condiciones del transporte.

En experiencias realizadas en Alemania (en capa de rodadura 25 por 100 de residuos y 75 por 100 de áridos convencionales) y en Dinamarca (en capa de base y 50-50) se obtuvieron éxitos técnicos pero se presentaron dificultades, precisamente, en relación con la energía consumida y con la problemática ambiental, las primeras a consecuencia de la necesidad de eliminar el 15-20 por 100 de agua de los residuos, y los segundos a causa de la contaminación del aire por los elementos más finos (cenizas). Pero en general, de los resultados globales se sugiere que se pueden emplear estos residuos como áridos y obtener mezclas satisfactorias aunque de "calidad inferior" (4).

Lo que no parece poderse admitir es su empleo en firmes de hormigón, y ni siquiera en mezclas con cemento de menor calidad por las reacciones que las fracciones con aluminio metal establecen con aquél durante la hidratación formando hidrógeno gaseoso y, también, por la potencial reacción de los álcalis del cemento con la sílice de los elementos vítreos de los residuos.

Por otra parte, se ha puesto a punto, también en Filadelfia, un método de producción de áridos sintéticos basado en la fusión parcial de estos residuos; primero se introducen en un horno rotatorio a temperatura de unos 870° C para eliminar las fracciones combustibles, y en seguida en un horno de fusión a unos 1.100° C. Aunque este proceso se autoalimenta de energía, es precisa una pequeña aportación complementaria, cuyo consumo se podría compensar aprovechando los gases producidos en el mismo. Las

características de estos áridos (5-6) les hace aptos, según los ensayos de laboratorio, para su empleo en mezclas bituminosas para capas de rodadura y intermedia. Se ha construido ya algún tramo de ensayo, pero sin tiempo para recoger datos sobre los resultados. Este proceso de fusión ofrece varias ventajas, además de las ambientales; la de conseguir buenos áridos en zonas donde puedan escasear y la de economizar costos de transporte.

II. Caucho, vidrio y plástico.

Constituyen parte de los residuos urbanos que se pueden separar del resto de los mismos y tratar separadamente. Todos ellos pueden emplearse en carreteras con mayor o menor facilidad, quizá los cauchos exijan de un proceso de preparación más complejo y una técnica más delicada; pero el mayor problema para su empleo radica en la posibilidad de lograr suministros suficientes o suficientemente regulares. Los neumáticos, aunque, como los otros, se producen en forma muy diseminada en todo un territorio, al menos pueden recogerse aprovechando la red de garajes existentes y estableciendo las adecuadas vías de concentración y transporte hasta los puntos de acopio; pero el vidrio y los plásticos acompañan casi siempre a las basuras y su recogida, concentración, transporte y acopio ofrecen una mayor dificultad: exigen adecuada planificación y el potencial de uso depende de las posibilidades de que todo ello se logre en forma económica.

II.1. Caucho.

Su principal fuente son los neumáticos usados y su utilización es bastante reciente; a pesar de las dificultades técnicas es preciso transformarlo en un granulado o en polvo, lo que no siempre resulta suficientemente

mico, la finura del granulado parece ser un condicionante importante de los resultados técnicos y, sin embargo, no está muy desarrollada la tecnología para lograrlo, lo que deriva en costos relativamente importantes en la preparación de aquel. La fabricación del polvo requiere previamente un troceado y subdivisión de los neumáticos de caucho natural o sintético—por procedimiento tradicional o criogénico con inmersión previa en baño de nitrógeno líquido—, la separación de arcasas y fibras y una trituración posterior; se puede fabricar bruto o "regenerado" o parcialmente devulcanizado mediante calor, tratamiento químico y adición de plastificantes.

Los neumáticos usados tienen otras neutralizaciones alternativas—pirólisis, defensas de atraque, etc., y, en el campo de la pavimentación, en el revestimiento de pistas deportivas—, pero en carreteras existen cuatro formas de aplicación del polvo de caucho.

- Fabricación de betún-caucho, ligante para fabricación de mezclas o para riegos superficiales.
- Empleo del polvo de caucho como árido en mezclas.
- Fabricación de juntas.
- Fabricación de mástic betún-caucho para ejecución de membranas antifisuras.

De las que la más importante, por el volumen consumido, es la primera. Para ello, se obtiene por trituración un polvo con un 95 por 100 de partículas de tamaño inferior a 1,25 mm y un 10 por 100 inferior a 0,8 mm, que se incorpora al betún en proporciones de 1:3, caucho-betún y a temperatura de unos 300° C. A la mezcla se le añade enseguida keroseno en un 8 por 100 aproximadamente en volumen con objeto de lograr la viscosidad adecuada para permitir una

extensión, con la técnica clásica para riegos, de unos dos a tres litros por metro cuadrado; los áridos, precalentados y preenvueltos, se reparten a razón de unos 20 Kg/m². Se pueden obtener así rodaduras de muy buena calidad sobre carreteras fisuradas sin aumento sensible del perfil; además, el ligante modificado es menos sensible a la temperatura, lo mismo a la alta que a la baja, y tiene magníficas características de impermeabilidad; las experiencias ya realizadas muestran un muy buen comportamiento después de cinco años. Existen otras técnicas para fabricar ligantes betún-caucho en otros países y en el Laboratorio del Transporte se han realizado experiencias al respecto.

Como árido no parece dar tan buenos resultados, rebajando las características mecánicas de las mezclas. En la fabricación de juntas y la construcción de membranas antifisuras intercaladas en el firme se consumen menos cantidades de caucho; estas últimas han dado buenos resultados, pero sus débiles resistencias mecánicas dificultan su adecuada puesta en obra.

La verdad es que hasta ahora el único interés en aprovechar este material se debía a la búsqueda de ligantes con nuevas propiedades y, para tales objetivos, comenzaron a dar mejores resultados otros elastómeros sintéticos. En la actualidad, sin embargo, su empleo debe revitalizarse por razones ambientales y de ahorro en el consumo petrolífico. Las investigaciones actuales abundan en las dos líneas mencionadas: empleo como aditivo al betún o como árido, pero en ambos casos se aprovechan fundamentalmente sus propiedades elásticas en orden a disminuir la fisurabilidad de la mezcla; los mayores inconvenientes derivan del costo elevado de la obtención del polvo de caucho y de las dificultades para incorporarlo al betún o a

la mezcla. Recientemente se han empleado las tiras de neumáticos en "tierra armada" en sustitución de las mallas metálicas.

De todos los empleos el que parece ofrecer mejores resultados es el de la fabricación de ligantes modificados, y aún ese resulta caro en un balance económico tradicional que no incluya los costes y beneficios sociales. La verdad es que la introducción de los que se producen por el impacto ambiental obedece hoy a criterios muy subjetivos por lo que es difícil lograr un acuerdo al respecto.

11.2. Residuos de vidrio.

Estos residuos se pueden recuperar, directamente de los desechos de fábricas de vidrio, lo que es más fácil de instrumentar, o de las basuras urbanas, mediante diversos procedimientos, todos costosos y laboriosos por el momento; incluso de las fábricas, su dispersión y sus posibilidades de reciclado ponen inconvenientes a aquélla. Tras el machaqueo se obtiene un material granular abundante en partículas de forma deficiente—planas o alargadas—, que tiene un coeficiente Los Angeles de 30-40; en la operación de machaqueo deben cuidarse las condiciones de seguridad e higiene por los riesgos derivados de la inhalación del polvo de vidrio.

Hasta el momento su empleo en carreteras ha sido muy escaso, aunque no introducía grandes problemas ambientales por las posibilidades de reciclar los residuos de las fábricas. Pero es posible su empleo como árido para capas de rodadura e inferiores y como ligante hidráulico en las capas inferiores (sub-base y explanada), además de su posible empleo como árido para hormigones, en condiciones análogas a los de otros áridos convencionales, aunque debería reservarse, dada su fra-

gilidad, para carreteras de tráfico ligero. La adición de un pequeño porcentaje de cal (1 por 100) a la mezcla mejora la adhesión, pero más difícil es corregir los índices de forma (lajas y agujas). En rodadura no soporta las cadenas ni los neumáticos a clavos, pero su brillo y su capacidad de retención del calor que le permite operaciones de extensión a menores temperaturas, les da ciertas ventajas. En hormigones se produce una pérdida de resistencia a compresión —y flexión— con el tiempo debido a reacciones químicas con los álcalis del cemento.

Como ligante hidráulico se emplea vidrio en polvo mezclado con un 6-15 por 100 de cal o sosa; la resistencia se mejora con fosfato ácido de potasio añadido a la sosa.

Por la dispersión y pequeña cuantía puntual con que se producen y por las dificultades de recolección, aún no resulta económico el empleo de estos residuos en forma general.

II.3. Residuos de materias plásticas.

Se incluyen aquí también los residuos derivados de actividades industriales, además de los de procedencia urbana. Los industriales suelen ser fácilmente reciclables, y los urbanos admiten también la incineración e incluso la favorecen por su aporte calorífico, por lo que su aplicación en carreteras no ha sido muy desarrollado. Sin embargo, tiene algún potencial de empleo en esta técnica por la mejora en el comportamiento de materiales clásicos. Se han estudiado dos líneas fundamentales, aparte su empleo en placas prefabricadas para revestimientos (80 por 100 de materias plásticas y 20 por 100 de betún como ligante); por una parte incorporando los residuos procedentes de la polimerización de PVC, una vez pulverizados, al alquitrán en

proporciones respectivas de 25 y 75 por 100, y por otra, la incorporación de residuos urbanos en forma de una lana de fibras, en la envuelta de áridos con alquitrán o betún, y en proporción de un 3 por 100 en peso aproximadamente.

Las experiencias en la primera línea muestran unas características mecánicas que mejoran en tres veces las de las mezclas de alquitrán y en dos las bituminosas. En la segunda se comportan como armaduras mejorando también las características mecánicas, aunque también se han utilizado en la estabilización de suelos, en terraplenes y taludes, no se halla recogida la experiencia en este campo.

III. Lodos de aguas residuales.

Cuando las aguas residuales se tratan de modo que permitan la separación de las partículas sólidas en suspensión, se producen estos lodos, mezcla de sales sedimentadas y coloides floculadas y depositadas. Esta operación se verifica en las fases conocidas como tratamiento primario y secundario, tamizado, precipitación y digestión en el primero, y filtrado y decantación más cloración en el segundo; en el tratamiento terciario, en el que entre otras operaciones específicas —absorción, ozonización, desmineralización, etcétera— se separan contaminantes no biodegradables, nitrógeno y fósforo, apenas se producen fangos. Es muy variable la cantidad de lodos producida, en función del grado de desarrollo, especificaciones legales para vertidos y lugar de los mismos y métodos de tratamiento empleados, pero se estima en 0,1 Kg por persona y día. Hasta ahora han sido vertidos al mar o a las corrientes fluviales o lagos, o bien incinerados, o extendidos en forma de humus o abonos tras algún tratamiento. Todas estas formas de manipulación de estos residuos cono-

cen hoy muy fuertes limitaciones sociales, si no legales, por razones, otra vez, ecológicas y energéticas.

Tras el tratamiento primario se forma una suspensión, de composición y viscosidad variables, de color negro u oscuro y bastante homogénea, aunque puede contener hasta un 10 por 100 en peso de caucho, ramaje y otros. Su contenido en sólidos oscila del 5 al 10 por 100 aunque puede llegar al 40 por 100 en algunos depósitos dispuestos para su acumulación. Aunque ya se mencionó su variabilidad, a título indicativo y como gamas de 42 muestras de Pensilvania, se detectaron de 28 a 166 gramos de grasas y aceites por kilogramo de fangos; 9-44 por 100 de partículas sólidas; 6-25 por 100 de cenizas; 92-316 gr/Kg de demanda química de oxígeno (COD); 8-40 gr/Kg de nitrógeno total en Kjeldahl y las siguientes cantidades de metales pesados (en p.p.m.).

Cinc	2.270 - 4.410
Cobre	574 - 1.000
Cromo	748 - 1.680
Plomo	805 - 2.610
Cadmio	18 - 33
Mercurio	92 - 937

Lo que supone altas proporciones de los mismos; su tratamiento y destino definitivo debe ser tenido en cuenta en la toma de decisiones respecto al vertido o reutilización de estos lodos. Su potencial contaminante pone en solfa las soluciones basadas en la acumulación en estanques o en el relleno o enterramiento.

Un empleo potencial adecuado podría ser su vertido en explotación mineral o de canteras a cielo abierto abandonado, con objeto de regenerar las aguas —si hay filtraciones hacia las subterráneas—, a pesar de lo cual constituye su mayor utilización en países de nuestra área. El empleo en terraplenes de los lodos una vez desecados se ha experimentado en las proximidades de Filadelfia. Los ensayos

Laboratorio con mezclas de o digerido y seco, cal, cenizas y sulfatos (procedentes también de procesos industriales) se verán en publicación posterior), han mostrado suficientemente resistencia mecánica para la construcción de terraplenes, así como buenas características de permeabilidad y percolación, lo que las faculta como material de uso potencial adecuado a los mismos. En un ensayo de ensayo se extrajeron resultados a los noventa días y se realizaron ensayos de compresión simple y susceptibilidad al agua y a los ciclos de hielo-deshielo, en unas, y de percolación en otras; excepto frente a los ciclos hielo-deshielo el material fue satisfactorio. Como resultado de estas y otras experimentaciones se puede concluir:

Se puede conseguir un material apropiado para terraplenes con una proporción moderada de lodos (10 por 100) integrado en una mezcla de cal, cenizas volantes o suelo natural y sulfato, que, además, posee adecuadas características de percolación y permeabilidad, lo que reduce su posible impacto ambiental negativo.

La susceptibilidad a la helada, y en menor grado a la humedad son relativamente altos, por lo que conviene recubrir los taludes con aproximadamente un metro de suelo natural.

Es posible su empleo generalizado en terraplenes, en combinación con los materiales naturales del área, con

tal que se experimente su compatibilidad y comportamiento adecuado en un trabajo experimental.

IV. Conclusiones.

Como con otros materiales ya considerados o por considerar, el principal motivo para su empleo en carreteras se deriva de consideraciones ambientalistas. Las proporciones en que se producen de ninguna manera podrían satisfacer las necesidades de estas construcciones, pero sí producirán graves problemas para su depósito y/o eliminación. De todos los considerados en este trabajo el mayor potencial de empleo lo tienen, sin duda, los residuos de incinerador aunque esta técnica de tratamiento de basuras está aún ínfimamente desarrollada entre nosotros. Parte de las basuras—vidrio, caucho, plástico— admiten empleos peculiares, pero su recuperación no está resuelta satisfactoriamente, desde un punto de vista económico, por lo que su tratamiento conjunto con las demás basuras parece indicado salvo justificación adecuada. Los residuos de incinerador, con o sin separación previa de estos materiales especiales sirven para terraplenes y pistas de tráfico ligero sin ningún tipo de tratamiento. Con ligantes bituminosos y granulometría cuidada—mejor en mezcla a partes iguales con áridos convencionales— se pueden emplear en todas las capas del firme; sin embargo, no son aconsejables en firmes rígidos. Su inconveniente mayor deriva

de su tendencia a la degradación por calcinación; además, suelen ser frágiles y reactivos en medio alcalino; ambos inconvenientes se palián con un tratamiento de agitación previa en vía húmeda. De todas maneras, junto estos empleos como las estabilizaciones con cal, cemento y cenizas volantes son muy prometedores.

BIBLIOGRAFIA

1. O.C.D.E.: "Utilisation des déchets et sous-produits en technique routière". París, 1977.
2. COLLINS, R. J.; MILLER, R. H., and CIESIELSKI, S. K.: "Guidelines for use of incinerator residue as highway construction material". F.H.A.O.R.D. Report N. F.H.W.A.-R.D.-77-150. Washington, 1977.
3. COLLINS, R. J.; WALLO, E. M.; BOYLE, M. J.; PINAZOLA, D. M., and TROPEA, J.: "Technology of use of Incinerator residue as Highway Material". F.H.W.A.R.D.-77-151. Washington D.C., 1977.
4. EMERY, J. J.: "Waste and byproduct utilisation in highway construction". Res. Recovery and Conserv., 1976.
5. PINDZOLA, D. M.: "Large scale continuous production of used aggregate from incinerator residue". Final Rep. F.H.W.A. R.D. 76-115. Washington, 1976.
6. PINDZOLA, D. M., and LHOUE, R. C.: "Synthetic aggregate from incinerator residue by a continuous fusion process". F.H.W.A. Final Report R.D.-74-23. Washington, 1974.