

Empleo en carreteras de los residuos de explotaciones mineras y de canteras de obras públicas^(*)

Por Prof. J. JAVIER DIEZ GONZALEZ

Ingeniero de Caminos, C. y P.

La escasez de materias primas, la de la energía y la creciente degradación del medio ambiente han determinado el estudio de la posible utilización de materiales residuales en construcción de carreteras. En este artículo se considera el empleo de materiales tales como gangas carboníferas y otras gangas mineras, productos de dragado, escombros, etc., presentándose finalmente consideraciones económicas y de tipo funcional de la aplicación de este tipo de materiales.

0. INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo económico y de los pilares industrial, tecnológico y de servicios en que se apoya y a los que, a su vez, acelera han conducido a la Sociedad Mundial a una crisis global medio-ambiental, además de simplemente económica y energética. Ciertamente que esta crisis afecta de diferente forma a las diferentes regiones del Globo, en razón de las características de sus respectivos ecosistemas y de las circunstancias políticas, culturales y de desarrollo, y que, como consecuencia lógica de que la fuente de la crisis se encuentra en la sociedad llamada occidental, es en ella donde más agudos se plantean los términos de la misma.

Tratando de simplificar el planteamiento todo lo posible para centrarnos en el tema que nos ocupa se podría decir que, como consecuencia de tal situación, aparecen tres tipos de problemas acuciantes: la escasez relativa de materias primas, la de la energía y la creciente degradación del medio ambiente derivada de una particular asignación y uso de los recursos naturales y de las transformaciones de algunos de ellos.

En estas circunstancias, la construcción de carreteras está presuponiendo consumo de energía y materias primas. Una de estas últimas la constituyen los áridos que son necesarios, además, para otras obras civiles. Como, por otra parte, son evidentes las acumulaciones de subproductos y otros materiales de desecho en muchos puntos de la

geografía donde, sin duda, están originando un cierto grado de degradación ambiental.

Pensando que quizás se podría racionalizar la construcción de carreteras de modo que se pudieran minimizar tales inconvenientes, y que uno de los procedimientos podría ser la generalización del empleo de materiales residuales en tales construcciones, se constituyó un grupo de trabajo de la O.C.D.E. con objeto de abordar tal problemática. Este y sucesivos artículos tratan de ofrecer un resumen de los trabajos realizados por el grupo, más la experiencia, poca, del autor, que firmó parte de aquél (1).

1. GENERALIDADES

En el tema que aquí se aborda se incluyen una serie de materiales residuales cuya capacidad potencial para su empleo en carreteras depende de múltiples variables y cuya forma de presentación puede variar desde materiales de tamaño grueso, con granulometrías más o menos continuas, hasta verdaderos limos. Su consideración como materiales de desecho o como subproductos puede ofrecer alguna dificultad metodológica aunque, en la terminología propuesta en mi trabajo (2) anterior, el primer término le es más adecuado o, mejor, nos queremos referir a aquellas gangas y residuos que no tienen previsto otro aprovechamiento posterior. Son materiales que se producen en cuantía notable y que suelen plantear graves problemas de acumulación con el consiguiente impacto negativo en el paisaje, en el ciclo del agua (por posibles filtraciones), y en la ordenación del transporte en el entorno. En algunas ocasiones, algunos de estos impactos pueden verse reducidos o eliminados por

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

EMPLEO EN CARRETERAS DE LOS RESIDUOS DE EXPLORACIONES MINERAS

la existencia próxima de barrancos o vaguadas adecuadas para su relleno, pero no son demasiado frecuentes, sobre todo si la adecuación se contempla con un apropiado enfoque ambientalista.

Por razones de método, y siguiendo la sistemática adoptada en el citado grupo de trabajo de la O.C.D.E., distinguiremos tres tipos de desechos por su origen. Gangas carboníferas, residuos de canteras y gangas de minas no carboníferas. En todos los casos, como veremos, su posible empleo en la construcción de carreteras es general pero la dificultad derivada de la disposición y costo del transporte puede ser completamente limitante. Aunque en nuestro país se han empleado abundantemente en varias obras, sobre todo en los años 50 (Jaén, Huelva...) no ha habido ni un control ni un seguimiento coordinados de las mismas por lo que nuestra experiencia en este campo no es aprovechable. En U.S.A. (3) se reconoce que los costes de transporte pueden ser en la mayoría de los casos superiores a los que supondrían otros materiales convencionales, incluso en el caso de transporte marítimo; pero consideraciones de tipo ambiental pueden justificar la solicitud de subvenciones o de circuitos privilegiados de transporte a precios inferiores. De los estudios citados (3) parece que, salvo grandes distancias de transporte, es económicamente rentable el uso de estos materiales siempre que su costo en mina o cantera no exceda de unos

dos o tres dólares por tonelada, y para un costo supuesto de operaciones de preparación y corrección, sobre todo en cuanto a su granulometría, de hasta un dólar por tonelada.

Por otra parte, y además de los impactos positivos, han de tenerse en cuenta los posibles impactos negativos sobre el medio derivados de:

- Ruidos y complicaciones de tráfico si hay poblaciones próximas.
- Contaminación de aire y/o agua.

Desde un punto de vista general diremos finalmente que los materiales de este tipo más utilizables son los de tamaño grueso, sobre todo si tienen granulometría continua. Si son granulares de tamaño fino son empleables como arena de machaqueo, dadas sus abundantes caras de fractura, siempre que sean escasos en material cohesivo (micas y otras fracciones arcillosas arrastradas por el agua). Si son limosos su potencialidad de uso desaparece.

2. GANGAS CARBONIFERAS

Aunque su definición no es muy ortodoxa, incluimos aquí el conjunto de desechos derivados de la explotación de minas de carbón, incluyendo los

TABLA 2.1.— Análisis químico de esquistos de *hulla*, calcinados y no calcinados (1,4).

| | Residuos calcinados | | | | | | No calcinados |
|--|---------------------|------|------|-------|------|-------|---------------|
| | A | B | C | D | E | F | |
| SiO ₂ | 57,6 | 56,2 | 60,2 | 55,6 | 56,4 | 45,4 | 51,9 |
| Al ₂ O ₃ | 31,3 | 31,1 | 21,2 | 26,5 | 23,3 | 21,5 | 19,4 |
| Fe ₂ O ₃ | 3,86 | 4,33 | 8,02 | 4,57 | 6,14 | 13,37 | 6,1 |
| TiO ₂ | 0,22 | 0,24 | 0,17 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 1,03 |
| CaO | 0,36 | 1,03 | 0,44 | 0,16 | 0,48 | 6,30 | 0,66 |
| MgO | 0,92 | 0,82 | 1,01 | 1,47 | 0,97 | 2,88 | 1,21 |
| Na ₂ O | 0,23 | 0,20 | 0,48 | 0,23 | 0,44 | 0,65 | 0,44 |
| K ₂ O | 2,50 | 2,06 | 3,30 | 3,45 | 2,63 | 2,77 | 3,0 |
| SO ₃ | 0,10 | 1,39 | 0,89 | 1,86 | 2,82 | 4,66 | 0,35 |
| S | 0,02 | 0,01 | 0,10 | 0,02 | 0,10 | 0,05 | 0,02 |
| Pérdida al fuego. | 1,9 | 2,2 | 3,8 | 6,3 | 5,5 | 2,6 | 16,13 |
| Total | 99,0 | 99,6 | 99,6 | 100,4 | 99,0 | 99,8 | 100,4 |
| pH de una suspensión acuosa. | 6,5 | 6,8 | 5,4 | 4,2 | 4,5 | 8,5 | |
| Contenido en sulfato de una suspensión agua-esquisto en proporciones de 1 : 1. | 0,06 | 0,14 | 0,16 | 0,70 | 0,69 | 0,15 | |

(porcentajes en peso)

EMPLEO EN CARRETERAS DE LOS RESIDUOS DE EXPLOTACIONES MINERAS

TABLA 2.2. — *Granulometrias y densidad de esquistos de hulla (1,4).*

| Diámetro de partícula (mm) | Esquistos calcinados | | | | | | Esquistos no calcinados | | | | |
|----------------------------|----------------------|------|------|------|------|------|-------------------------|------|----|----|----|
| | A | B | C | D | E | F | S | T | U | V | W |
| > 40 | 2 | 0 | 6 | 0 | 3 | 0 | 7 | 5 | 6 | 12 | 15 |
| 20-40 | 22 | 14 | 14 | 20 | 18 | 15 | 33 | 25 | 7 | 18 | 15 |
| 10-20 | 26 | 22 | 23 | 23 | 22 | 25 | 26 | 35 | 10 | 15 | 32 |
| 5-10 | 22 | 21 | 22 | 20 | 19 | 17 | 17 | 16 | 15 | 15 | 18 |
| 2-5 | 11 | 12 | 13 | 12 | 12 | 11 | 6 | 6 | 17 | 10 | 8 |
| < 2 | 17 | 31 | 22 | 25 | 32 | 32 | 11 | 13 | 45 | 30 | 12 |
| Densidad | 2,65 | 2,69 | 2,71 | 2,72 | 2,76 | 2,90 | 2,60 | 2,51 | — | — | — |

materiales originados en la apertura de galerías, y en la extracción del carbón con separación posterior del mismo por lavado, además de las pequeñas cantidades residuales del propio carbón y de otros productos de lavado. Esta consideración hace que sean desechos de una gran variabilidad en sus propiedades, aumentada por la posibilidad de su calcinación cuando se acumulan en grandes volúmenes.

Las cantidades producidas en 1975 en los países de la O.C.D.E. oscilan entre 0,3 (Holanda, con producción estabilizada) y los 90 (U.S.A. con tendencia a aumentar) millones de toneladas. En nuestro país, como en otros (Dinamarca, Finlandia, Italia y Suiza) no se tienen datos al respecto.

Los ensayos físicos y químicos realizados sobre varias muestras de diversas procedencias en el Reino Unido se presentan en las tablas 2.1 y 2.2. La calcinación afecta en gran medida a las características de estos materiales y los hace más adecuados para su empleo. La posible presencia de sulfatos puede imponer restricciones a su empleo. En principio sólo se empleaban con garantía las mangas calcinadas, pero en la actualidad, la posibilidad de compactarlos en condiciones climatológicas adversas ha impulsado el empleo de los relieves recientes, sin calcinar; mayores problemas plantean los depósitos antiguos no calcinados.

1. Empleo en terraplenes.

Estos residuos, calcinados, se han venido empleando satisfactoriamente en terraplenes próximos a las zonas de producción y/o depósito; este empleo es, como mucho, el de mayor potencialidad por la importancia de los volúmenes empleados. Toda su aceptable granulometría y su naturaleza granular fracturada admiten puesta en obra en todo

el espesor del terraplén, hasta la subbase, y compactación adecuada a la capacidad portante exigida. Su buen comportamiento ha permitido una normalización para su empleo en Alemania. Las únicas restricciones generales se deben a su susceptibilidad a la helada y a su posible contenido de sulfatos, por lo que no pueden colocarse a profundidades menores de 45 cm de la superficie, por la primera razón, ni a distancias menores de 45 cm de cualquier estructura de hormigón, si el contenido en sulfato de una suspensión acuosa (1 : 1 en peso) sobrepasa los 2,5 gr/l. En cualquier caso deben ensayarse y controlarse con los métodos habituales para otros materiales en empleo equivalente —granulometría, equivalente de arena, ensayo Proctor, límite plástico y unos ensayos de resistencia mecánicas— y serán siempre exigidos si los desechos no están calcinados. En la actualidad no se exige ningún tipo de protección de taludes, pero, en el caso de materiales no calcinados, el temor a la combustión espontánea ha supuesto una fuerte restricción a su empleo en la ejecución de los taludes, dado que la compactación exigible llega hasta un muy bajo índice de huecos con objeto de reducir al mínimo las posibilidades de aireación y de la alteración de los materiales silicatados más finos.

La posible combustión espontánea en terraplenes no viene sólo determinada por el porcentaje de carbón presente, sino también por las dimensiones de las partículas, la distribución de los residuos carboníferos en el conjunto, el porcentaje de volátiles en aquéllos, el contenido en piritas y, sobre todo, la posibilidad de penetración del oxígeno en el terraplén. Por todo ello es muy difícil dar un contenido límite en restos de carbón pero se puede afirmar que tal combustión no se producirá en un terraplén bien compactado (4). Si se quieren aprovechar viejos depósitos que siempre contienen alguna cantidad residual de carbón de baja calidad lo que puede acentuar su combustibilidad espontá-

EMPLEO EN CARRETERAS DE LOS RESIDUOS DE EXPLORACIONES MINERAS

nea, es siempre conveniente, en tales casos determinar la proporción de materiales combustibles en presencia. El método recomendado se basa en la determinación de carbono total, de CO_2 y de carbonatos (5).

En un reciente estudio sobre 78 muestras de gangas de antracita (6) se han detectado granulometrías gruesas con una fracción gruesa uniforme y una fracción fina muy tendida. La falta de finos hacia difícil la compactación, sin poder determinar una humedad óptima de compactación en el ensayo Proctor normal. En el modificado y/o en sucesivas compactaciones con remoldeo, sí se obtenía óptimo, debido a la mayor energía traducida en fractura de elementos gruesos con aumento de la fracción fina. El espesor máximo de capa de compactación se cita en 20 cm.

2.2. Empleo en capas de base y subbase.

Tales empleos serían de desear dados los costos de los materiales granulares empleados, y ello porque pueden satisfacer las especificaciones, particularmente para subbases granulares. En el Reino Unido las gangas esquistosas de la hulla, cuando están calcinadas y no contienen materiales plásticos, las satisfacen. El problema se deriva de su susceptibilidad a la helada, lo que les relega a mayores profundidades en el firme. La estabilización con cemento parece ser una solución alternativa aceptable. Por el contrario, los no calcinados sólo pueden emplearse en capas de subbase y después de una adecuada estabilización con cemento.

Los materiales de este tipo destinados a estabilizaciones con cemento, calcinados o no, deben cumplir las especificaciones granulométricas de tales estabilizaciones. Exigen un 6-10 por 100 de cemento, aunque este porcentaje puede disminuirse si se combina con la adición de cenizas volantes, en cuyo caso se disminuyen las incompatibilidades química y a la helada, aunque la presencia de sulfatos puede originar dificultades al tratamiento. Dada la extraordinaria variabilidad de estos materiales son inexcusables los ensayos adecuados, según las especificaciones, antes de su puesta en obra; fundamentalmente se deben comprobar la granulometría, las características de compactación con el cemento, la resistencia a tracción y compresión y su reducción en el ensayo de inmersión.

En Francia se han empleado en capas de base, estabilizadas con proporciones adecuadas de cenizas, cal y yeso. Y se han realizado experiencias con escoria laitier granulada, cal y ceniza. En otra línea se están experimentando las propiedades puzolánicas de algunos materiales esquistosos procedentes de minas de hulla, en orden a utilizar sus fracciones más finas, con la cal como estabilizador

de suelos para capas de subbase o explanadas mejoradas.

De acuerdo con recientes investigaciones (7) en estabilizaciones de estos materiales resulta una notable resistencia a compresión simple cuando se usa una mezcla de cenizas y cemento o cal; mejora que no se alcanza cuando se emplea sólo uno de los componentes. Tal resultado podría atribuirse a una excesiva absorción de humedad, sobre todo en el caso de la sola adición de cenizas volantes.

2.3. Otros empleos.

Estos materiales no son admisibles en general en las capas altas del firme, sobre todo en rodadura, salvo en carreteras de tráfico escaso y ligero o cuando se empleen como filler o como abrasivo en caso de nieve o de superficies deslizantes. Algunos de estos materiales, de colores ocres fuertes, tienen amplio empleo en carreteras secundarias en los que no se piensa recubrir temporalmente la capa de base y en pistas agrícolas y forestales. Su color les hace útiles también en capas de rodadura y parkings, mezclados con laitier granulado, cal y cenizas. Recientemente se han reconocido importantes características antideslizantes a estos materiales calcinados solos o mezclados con bauxita (4 : 1), admitiendo su empleo en mezclas bituminosas en caliente y en frío con notable estabilidad.

En todo caso estos empleos, como los del apartado anterior, aun ensayados y aceptados en el laboratorio y en pequeña escala, no están suficientemente confirmados en la práctica. En este sentido está puesta a prueba la capacidad innovadora de los técnicos en carreteras.

3. DESECHOS DE CANTERAS

Nos referimos a materiales procedentes de ciertas capas del terreno que deben extraerse para acceder a las más rentables, pero que pueden también emplearse en carreteras con o sin necesidad de preparación adecuada. En muchas ocasiones pueden ser verdaderos subproductos que, incluso, pueden tener un cierto precio de mercado. Se presentan, en general, como mezclas de todo tipo procedentes del machaqueo en centrales, con granulometrías muy variables según el clima, su naturaleza mineral y las características de las capas del suelo de procedencia. Ello impide su posible clasificación en cohesivos y no cohesivos.

Los procedentes de canteras de pizarra forman una categoría particular y se originan en todos los estadios de la explotación desde la excavación hasta la preparación del producto terminado.

EMPLEO EN CARRETERAS DE LOS RESIDUOS DE EXPLORACIONES MINERAS

3.1. Empleo en terraplenes.

En general, tienen una granulometría adecuada para la compactación hasta la estabilidad deseada; pero su puesta en obra y compactabilidad depende del porcentaje de finos (menores de seis milímetros). Si éste es mayor del 15 por 100 en peso aquellas operaciones son crecientemente susceptibles a condiciones climatológicas adversas. Con pequeños porcentajes de finos admiten, sin embargo, mejor densidad de compactación que otros suelos granulares no cohesivos sin finos. Su comportamiento a la compactación depende además de su límite plástico; con mayores porcentajes de fino y bajo límite plástico su comportamiento es más cohesivo que con menores porcentajes de finos y mayor límite plástico. Todo ello hace que con estos materiales puedan emplearse en todo —transporte, puesta en obra y compactación— los mismos equipos que con suelos naturales análogos.

En el caso de restos de canteras de pizarra las partículas tienen forma y textura superficial medianas debido a la presencia de planos de fractura, por lo que sus posibilidades de uso son limitadas; la energía de compactación en terraplenes sería muy elevada.

3.2. Empleo en capas de base y subbase.

Son utilizables si se les estabiliza; las cantidades necesarias de cemento y las estabilidades alcanzadas son muy variables, por lo que es necesario seleccionarlos adecuadamente y tratarlos de manera apropiada. En el Reino Unido, el «hassock», o residuo de las canteras de arenas calcáreas, se ha estabilizado satisfactoriamente con cemento en cantidades requeridas del 5-10 por 100, no siendo el material resultante susceptible a la helada (8). Los depósitos pizarrosos considerados hasta ahora como marginales y no utilizables pueden ser machacados para su aprovechamiento en capas de base, aunque sólo cuando se carezca de otros materiales de calidad.

La generalización de la estabilización de estos materiales presenta aún dificultades, derivadas fundamentalmente de la variabilidad en su composición, particularmente en sus elementos cohesivos, lo largo de la progresión del frente de cantera y en función del grado de erosión. Cuando se pueda garantizar una producción uniforme es fácil y económica su estabilización con un ligante hidráulico.

OTRAS GANGAS MINERAS

Son materiales de potencial de uso reconocido, la mayoría de los cuales se presentan muy localmente y, a veces en puntos relativamente excéntricos, lo que les resta posibilidades de empleo. Se

incluyen aquí, principalmente, los residuos de la explotación de pizarras bituminosas, la arena residual de los yacimientos de caolin, las escorias de azufre (Sicilia), las gangas de las minas de fluoruro de calcio, las de las piritas, y otras de menor entidad.

4.1. Esquistos bituminosos.

Son frecuentes en el Globo los yacimientos de explotación bituminosa rentable, pero la explosión productora de petróleo en el Oriente Medio durante los años 1950 y 1960 ha hecho declinar esta industria extractiva. La crisis de 1973 y, sobre todo, la que se avecina ahora mismo (1979) pueden modificar sustancialmente el panorama. En todo caso permanecen grandes depósitos de desechos en las zonas de antigua extracción petrolífera. El material es introducido en una columna de destilación vertical en la que la temperatura se eleva gradualmente hasta 700° C permitiendo separar los aceites de la roca. Los residuos de la destilación, y los desechados por inadecuados para el proceso extractivo, se han ido almacenando en terrenos próximos a las minas, donde la combustión espontánea es frecuente modificando su composición y características hasta hacerlas semejantes a las de los esquistos residuales de las minas de hulla calcinados. Su empleo en Gran Bretaña (Escocia) ha sido análogo al de estos últimos materiales, pero en U.S.A. se ha evitado hasta recientes estudios (6) en los que, del análisis de 40 diferentes muestras se deduce una granulometría más continua que la de los restos de la explotación de antracitas. La determinación de la humedad óptima de compactación mediante el ensayo Proctor normal es posible en primer moldeo, y han demostrado unos mayores ángulos de rozamiento interno y cohesión que los residuos de las antracitas.

4.2. Arena de caolin.

El caolin se emplea en las industrias del papel y de la cerámica. La mayor parte de la producción mundial procede del Sur-Oeste de Inglaterra y de U.S.A. (N. Carolina y Georgia). En España son de notable calidad los yacimientos del Norte de Lugo. Como consecuencia de su extracción se producen grandes cantidades de desechos arenosos (1 : 9) con la siguiente composición media: cuatro partes de arena gruesa; dos de roca; una de mica, y dos de otras gangas. Excepto eventualmente la mica, los demás residuos son claramente aptos para su empleo en carreteras, pero son las arenas gruesas las que ofrecen propiedades más interesantes además de mayor abundancia, sobre todo si se tiene en cuenta la escasez relativa de este tamaño de áridos. En Inglaterra se producen anualmente 10 millo-

EMPLEO EN CARRETERAS DE LOS RESIDUOS DE EXPLOTACIONES MINERAS

TABLA 4.1. — *Propiedades químicas y físicas de las arenas de caolin.*

| Análisis químico | Análisis mineralógico | % en peso |
|--------------------------------|-----------------------|-----------|
| SiO ₂ | Cuarzo. | 60-80 |
| Al ₂ O ₃ | Feldespato. | 1-15 |
| Fe ₂ O ₃ | Turmalina. | 2-10 |
| TiO ₂ | Mica. | 0,5-15 |
| CaO | | 70-90 |
| K ₂ O | | 5-15 |
| Na ₂ O | | 0,5-1,2 |
| MgO | | 0,05-0,15 |
| | | 0,05-0,5 |
| % de pérdida al fuego. | | 1,0-7,5 |
| | | 0,02-0,75 |
| | | 0,05-0,5 |
| | | 1,2 |

Propiedades físicas

| | |
|--------------------|-----------|
| Densidad. | 2,6-2,65 |
| Densidad aparente. | 2,63-2,70 |
| Absorción de agua. | 0,5-1,0 |

nes de toneladas con unos depósitos acumulados de 125 millones de toneladas. Carecemos de datos respecto de España (Lugo, Levante...). En la tabla 4.1 se resumen las propiedades químicas y físicas de estas arenas. Las granulometrías varían de unos depósitos a otros pero siempre es posible seleccionarlas de forma que encajen en las especificaciones para capas de subbase. Son fácilmente estabilizables con cemento para capas de base y subbase y se han empleado abundantemente en terraplenes en la escasa red de carreteras del Sur-Oeste de Inglaterra. También se pueden emplear en la fabricación de hormigón y de ladrillos de silicato de calcio.

4.3. Otras gangas.

La principal fuente de *fluor* la constituye el espato fluor o fluoruro de calcio, que se obtiene por gravitación y flotación, y cuya ganga consiste, sobre todo en una mezcla de piedras calcáreas y silicatos con trazas de barita, de fluoruros y de sulfuro de plomo. Este material se ha empleado como árido en

el estado de Illinois pero no se tiene información sobre su comportamiento.

Las gangas de los óxidos de *hierro* son, en general diferentes de las de otros minerales silicatados del mismo elemento como la taconita, particularmente abundante en el estado de Minnesota. Las disponibilidades anuales y acumuladas de estas gangas son muy grandes; y, aunque existe poca información sobre su empleo en general, se sabe del de la ganga de la taconita como árido en mezclas bituminosas, como material de terraplenes y en otros en el citado estado, incluso en revestimientos finos dada su buena adherencia, por lo que existen ya especificaciones al respecto. Parece que estas gangas pueden emplearse en cualquiera de las posibles aplicaciones de la construcción de carreteras en que sean necesarios áridos finos (cerificados por el tamiz número 4) y de buena granulometría no existiendo otra limitación que la derivada del costo de transporte. En Canadá se han empleado como áridos otras gangas de minerales de hierro en mezclas bituminosas.

4.4. Otros residuos.

Los citamos a título de ejemplo.

El clinker de azufre procede de la extracción de este mineral (Sicilia) formado por este elemento, yeso y arcilla, mediante calentamiento, y se emplea en la estabilización química de suelos en porcentajes del 20 al 40 por 100 en taludes y del 35 al 60 por 100 en explanadas y subbases, en cuyo caso debe ser de machaqueo y con granulometría adecuada. La minería del azufre está en declive y en la actualidad se buscan empleos del mismo en canteras, como se verá en un trabajo posterior, como aditivo a los ligantes bituminosos.

Los *lodos rojos* procedentes de la producción de alúmina a partir de la bauxita tienen una composición variable con el mineral pero, en general, contienen no menos de un 50 por 100 de óxido de hierro. La cantidad producida supone casi la mitad del mineral tratado y tiene una proporción de agua de aproximadamente el 40 por 100. Aunque no se ha empleado en carreteras podría servir como filtro en mezclas bituminosas o para fabricar áridos artificiales.

Las *cenizas de la pirita* (*Kiesabbrand*). Son el residuo de la fabricación de ácido sulfúrico a partir de las piritas. Consisten sobre todo en óxido de hierro y restos de roca con algo de azufre y sulfatos. Se emplean pequeñas cantidades en la construcción de terraplenes pero la mayoría se almacenan.

EMPLEO EN CARRETERAS DE LOS RESIDUOS DE EXPLORACIONES MINERAS

5. PRODUCTOS DE DRAGADOS

Nos referimos aquí a los materiales extraídos en las actividades de dragados en puertos y canales de navegación con el objeto de aumentar o conservar calados, anchura y/o radio de curvatura. Se excluyen, pues, explícitamente, los materiales de empleo como áridos y que habitualmente se extraen con tales fines. Estos materiales los incluye el informe final de la O.C.D.E. en el grupo de residuos industriales, pero, por su naturaleza más errática y en busca de un mejor equilibrio en el contenido de estas publicaciones, he optado por incluirlas en este primer grupo.

Habitualmente su depósito en áreas de tierra firme es la solución hasta ahora preferible, dado que su vertido en el mar origina perturbaciones ambientales de imprevisibles consecuencias. Pero cada vez abundan menos las áreas disponibles para recibir tales depósitos; ante cuya situación caben tres tipos de alternativas:

- a) Crear más depósitos en el mar, con los ya mencionados problemas ambientales.
- b) Depositarlos en áreas-recinto, cerradas mediante diques, lo que permite ganar superficie al mar para explotaciones portuarias u otros usos, pero que tiene el inconveniente de modificar apreciablemente un biotopo muy sensible como es la franja litoral.
- c) Proporcionar y favorecer su empleo en terraplenes para carreteras. En cualesquiera tres alternativas, como en los tradicionales, el control y corrección de la contaminación por metales pesados es absolutamente necesaria. Estos metales, procedentes de otras fuentes de contaminación, se depositan en estos fondos y se acumulan, dada su densidad, transformándose en nuevo foco en la operación y vertido del dragado.

Para tener una idea del volumen que suponen estos materiales baste citar que se estiman en unos 230 millones de metros cúbicos en obras de conservación y unos 60 millones más en obras nuevas, los producidos por año en U.S.A. Sólo en la área de Rotterdam se producen unos 13 millones de metros cúbicos por año, de los que sólo cinco se aprovechan en terraplenes y los demás se vierten en el mar. En un futuro, aunque se ha de prever un incremento de áreas portuarias, la tendencia hacia instalaciones off-shore puede evitar una escalada de incrementos en los dragados. En cualquier caso es una operación permanente e inevitable.

Los efectos derivados del vertido de estos materiales en el agua son varios, y aparte en relación a los metales pesados, podemos citar el incremento de turbidez (efecto sobre la fotosíntesis) y

elevación de la D.B.O. entre otros. Por el contrario, los depósitos en tierra pueden originar contaminación de las aguas por filtración y percolación. Parece que desde un punto de vista ecológico, el primer impacto es más peligroso y menos rectificable.

Entre los materiales que componen estos lodos en suspensión acuosa pueden distinguirse de grano grueso, de grano fino y productos orgánicos —aparte otros materiales gruesos, rocosos, procedentes de obras nuevas— que se han podido clasificar (9), en cinco tipos principales de suelos, alguno de los cuales —arenas, gravas y conchas— son claramente utilizables, mientras que otros —más frecuentes— tienen empleo problemático, si no imposible. Dentro de estos últimos (conteniendo limos, arcillas, humus orgánicos, turba, residuos urbanos o industriales, tierra vegetal, restos de madera, metales y otros, en proporciones diversas), la composición es muy variable de unas áreas a otras, pero siempre tienen unas características mediocres: baja resistencia y elevada compresibilidad; es preciso dejar depositar la suspensión y secar los depósitos; por todo ello sólo parecen aprovechables en taludes y en terraplenes y, en ocasiones, los costos de transporte no compensan su empleo, salvo con el secado previo, lo que deja intactos los problemas ambientales en la franja litoral. Parece que en San Francisco (California) (10) se ha puesto a punto una nueva técnica de secado en recintos cerrados que resuelve ambos problemas en alguna medida y permite la construcción de terraplenes de 30 metros de altura o más.

Otra solución alternativa puede venir de la mano de las estabilizaciones químicas análogas a las que hoy ya se emplean con otros fangos procedentes de procesos de depuración de aguas. Ello podría permitir, o bien un empleo más general en las capas bajas del firme o en la fabricación de áridos sintéticos (11).

6. ESCOMBROS Y RESTOS DE OTRAS OBRAS

En este grupo se incluyen no sólo los materiales procedentes de la demolición de edificios y obras civiles, sino los procedentes de las obras previas para la regeneración y/o refuerzo de carreteras preexistentes, tanto de firmes bituminosos como de hormigón. Estos materiales son de producción creciente, aunque no muy significativa, y tienen la ventaja de una potencialidad de empleo inmediata. La inclusión en el informe de la O.C.D.E. en el grupo de residuos urbanos se basaba en que tal era el origen de los materiales procedentes de la demolición de edificios, pero al menos tienen un potencial de empleo separado de aquéllos por el momento; por ello hemos preferido incluirlas en esta

EMPLEO EN CARRETERAS DE LOS RESIDUOS DE EXPLOTACIONES MINERAS

publicación, lo mismo que los del subgrupo anterior.

En las operaciones de demolición y excavación de obras anteriores es muy frecuente que los materiales aprovechables queden contaminados con otros —tierra vegetal, raíces y otras materias orgánicas, etc.—, cuya separación sería antieconómica, y que no permiten su aplicación de nuevo. Sin embargo, la tendencia tecnológica es a emplear en cualquier obra de demolición maquinaria que facilite la separación de las fracciones aprovechables, y ello porque se disminuye el impacto ambiental.

A parte los refuerzos, en los que el viejo firme pasa a constituir más o menos mediamente las capas inferiores del mismo, hemos de mencionar entre los posibles empleos de estos materiales los siguientes:

- Como material de subbase o base granulares, previa eliminación de materiales perjudiciales (principalmente madera y hierro de armaduras). Se han realizado experiencias reales en este sentido con instalación de una planta de machaqueo y disgregación por lo que se han pasado tanto residuos de firmes bituminosos como de hormigón u otros materiales procedentes de estructuras, edificios, etc., y también con operaciones de disgregación «in situ».
- En estabilizaciones con betún o con cemento para capas de base o subbase, mediante reciclado «in situ» o en planta (1).
- Aunque existe poca información sobre el posible reciclado de los hormigones, una vez triturados, para fabricar un nuevo hormigón, el campo parece atractivo. Si se añaden otros escombros es claro que se deben evitar los materiales yesíferos y calizos.
- Reciclado de firmes bituminosos, para el que abundan ya equipos y técnicas (1). Esta opción, además, presenta varias ventajas: menores costes de transporte y energía, disminución de la demanda de áridos y ausencia de depósitos de residuos, disminución de las necesidades de betún (hasta en un 75 por 100 o más) y atenuación de los impactos ambientales generales. Existen al menos cuatro técnicas: Reempleo «in situ», añadiendo alguna emulsión bituminosa, empleo de regeneradores del betún, empleo de maquinaria de repavimentado, y reciclado en planta de mezclas en caliente; las dos últimas son las más interesantes. La repavimentación se efectúa según un proceso bien conocido: Calefacción del pavimento hasta unos

160° C (evitando oxidación o degradación del betún, por lo que se recomienda radiación), escarificación, incorporación de algún regenerador bituminoso, mezclado, nivelación y compactación. Sobre el reciclado ya hay abundantes experiencias técnicas controladas; se levanta la antigua capa y se acopia el material obtenido; se disgrega y tamiza en un proceso análogo al de una planta preparadora de áridos; de los nuevos acopios se alimenta, en las proporciones correctas para la adecuada granulometría, y añadiendo los áridos complementarios necesarios, el calentador. A la mezcla caliente se le añade un aditivo, que reduzca la viscosidad del betún preexistente, y la cantidad de betún adicional necesaria.

Aunque el éxito del empleo de estos materiales está asegurado, las desordenadas técnicas de demolición y desescombrado obstaculizan su aprovechamiento. Razones ambientales y energéticas lo impondrán con el tiempo.

7. CONCLUSIONES

En general, se ha podido constatar la potencialidad de uso de estos residuos de yacimientos, con la mayor limitación derivada del costo de transporte o, quizás, de la pereza innovadora de los técnicos en carreteras. En algunos casos, como en los esquistos hulleros, el empleo ha sido general pero se carece de los resultados de un control y seguimiento adecuados de las experiencias realizadas, sobre todo en relación con la generalización de su uso a las capas superiores. Salvo por la presencia de sulfatos, su estabilización parece abrir nuevos empleos potenciales. En todo caso la innovación debe acompañarse de una ejecución y control adecuados. Lo mismo diríamos del empleo de restos de cantera en capas de base y subbase, sobre todo si se estabilizan con un ligante. Otras gangas o residuos tienen un empleo potencial más restringido por su localización muy puntual y excéntrica.

Por otra parte, los materiales residuales ocasionados en obras públicas pueden ser, por su naturaleza y características físicas y químicas de inmediata aplicación aunque nuestra despilfarradora civilización no parece querer perder demasiado tiempo en ello. Las crisis energéticas sucesivas y la protesta ambientalista presionará en sentido favorable. Aunque en algunas obras civiles concretas, como son los de dragado, el aprovechamiento no es tan ventajoso ni tan directo, la extraordinaria cantidad en que se producen aconseja una investigación adecuada que permita ampliar su potencial de empleo.

EMPLEO EN CARRETERAS DE LOS RESIDUOS DE EXPLOTACIONES MINERAS

8. EL PROBLEMA DEL EMPLEO EN CARRETERAS DE MATERIALES RESIDUALES

1. El empleo eventual de un material de desecho en la construcción o reparación de carreteras depende de sus aptitudes y de su disponibilidad. Los desechos y subproductos de los que se dispone en las diferentes regiones del mundo y su potencial de empleo han sido objeto de otros artículos del autor (2, 12, 13 y 14); aquí sólo se trata de los aspectos esenciales de su utilización óptima, teniendo en cuenta las necesidades hoy tan manifiestas de conservar el medio ambiente, economizar energía y no despilfarrar los recursos naturales. Es evidente que el empleo de tales materiales debe ser promovido; ya se halla más o menos desarrollado en numerosos países, pero, incluso en estos, aún existen grandes posibilidades de extensión de tal empleo. Si la importancia de su utilización no responde totalmente a las esperanzas de los más entusiastas es porque, sin duda, existen factores que se oponen a ello; por otra parte, conviene tener en cuenta otras posibles alternativas de empleo, a veces más indicadas para un material concreto que las propias carreteras. En el presente artículo se trata entonces de las posibilidades de empleo óptimo de desechos en carreteras, sin que ello suponga en todos los asos la mejor de las posibles utilizaciones alternativas, y de las consideraciones medioambientales que, aún induciendo formalmente estos empleos, pueden constituir objeciones sulementarias a algunos de ellos.

2. Con la excepción notable de las escorias de alto horno y de acerías, los desechos y subproductos que se prestan a la construcción de las diferentes capas del firme como áridos, son pocos y limitables a las capas inferiores, salvo alguna transformación. Uno de estos

procesos consiste en la fabricación de áridos sintéticos, a lo que se prestan varios de los residuos, y a la sustitución por los cuales de los áridos naturales no existen objeciones de principio, salvo que no presentan ventaja ninguna y que su coste elevado puede restringir su empleo a casos específicos. Más aplicable es su estabilización con cemento, cal o ligantes bituminosos para permitir su empleo en capas con mayores necesidades portantes como los de subbase y base; sin embargo, esta solución es poco recurrida por el aumento de costo que implica y porque exige de ensayos suplementarios, tanto previos como de control; sin embargo, la posibilidad de tales empleos tiene evidentes ventajas para la comunidad social por la conservación que supone de las fuentes de áridos naturales y la supresión de las plantas preparadoras de los mismos, así como, en muchos casos, por los menores costos de transporte, y de los impactos de éste en el medio, hasta límites que, en ocasiones, pueden justificar el empleo generalizado de estos materiales de desecho en todas las capas del firme.

3. Aunque no sea imposible así el empleo de estos desechos en las capas del firme, tienen, sobre todo, vocación de empleo en terraplenes y explanadas, lo que, por otra parte, equilibra el déficit, normal en toda obra, de materiales de aporte, que se produce por más que se trate de que queden compensados los volúmenes de terraplén y desmonte. Un material tal debe ser fácil de transportar, de poner en obra y de compactar. Debe constituir por consiguiente solamente una capa lo bastante estable y resistente, lo que pueden satisfacer numerosos materiales de desecho. Existen, por tanto,

en principio, grandes posibilidades de empleo de todos estos materiales en sustitución de otros clásicos, pero la cuestión se complica cuando se examinan más detalladamente todas las circunstancias de cada caso concreto y el recurso a tales desechos pueda no constituir necesariamente la solución más indicada desde el punto de vista del triple objetivo: Conservación de recursos —protección del medio— ahorro de energía.

3.1. Para calidad y facilidad de empleo análogas, la utilización de desechos presenta las ventajas de:

A) Suprimir los vertederos y/o disminuir la cantidad de materiales destinadas a ellos.

B) Evitar la apertura de frentes de extracción de préstamos.

Y los inconvenientes o ventajas de:

C) El coste suplementario del transporte.

D) Las perturbaciones que resultan de este transporte.

Aunque estos términos del análisis ya han sido tratados con anterioridad (5) merece la pena traerlos de nuevo a consideración.

A) Si se admite que cualquier depósito para residuos o subproductos (vertedero) produce una cierta lesión al paisaje natural y constituye algún inconveniente para la población —cosa que podemos admitir en la práctica sin ningún género de excepciones, aunque en algunos casos puedan justificarse aduciendo que se pueden mejorar así terrenos naturales degradados—, es posible, al menos en principio, evaluar los costos ambientales de este inconveniente de forma que se determine la suma que la comunidad social estaría dispuesta a dedicar a evitarlo; consideremos como mínimo el coste de explanar

EMPLEO EN CARRETERAS DE LOS RESIDUOS DE EXPLOTACIONES MINERAS

y tratar el depósito para que admita una colonización vegetal y la plantación de ésta para conseguir una cierta integración en el paisaje; esta última solución es muy recurrida en algunos países —y en el nuestro es el recurso general aplicado a la consecución de superficies horizontales a partir de un terreno irregular, pero culminado mal o no culminado por cuanto no se evitan otros impactos negativos aparte el visual— puesto que, incluso aún cuando todas las carreteras de un país desarrollado se ejecutaran utilizando al máximo los materiales de desecho, seguirían necesitando de almacenamiento la mayor parte de éstos, tal es el volumen en que se producen. Es entonces posible determinar de forma bastante precisa el coste de ordenación y adecuación paisajística y ambiental y considerarlo como un rendimiento o beneficio derivado del empleo en carreteras de estos materiales, en la hipótesis de que éste al menos será igual o superior al coste evitado para la consecución de aquellas ordenación y adecuación.

B) Una cantera puede hallarse próxima a una obra de carretera de forma que la distancia de transporte y las solicitudes ejercidas sobre los firmes de su ruta puedan ser relativamente pequeñas y hacer olvidar las desventajas que pueden resultar de la apertura de una cantera para préstamos. En efecto, el impacto de la desfiguración temporal o permanente depende, en una cierta medida, de las adecuaciones previstas en la planificación, pero también del relieve; en un área accidentada es relativamente fácil restaurar el paisaje y, aunque el relieve pueda resultar modificado, las diferencias respecto al paisaje anterior pueden no ser muy manifiestas y, con una cierta adecuación, puede hacerse una restauración rápidamente sin dejar rastros permanentes;

en un área llana y, sobre todo, cuando la capa freática está próxima a la superficie, la reordenación del paisaje es, sin embargo, más difícil o, incluso, imposible, de forma que la desaparición de los vaciados producidos puede exigir unos nuevos préstamos casi nunca disponibles a corta distancia. La cuantificación de estos daños al paisaje no es fácil y no existe ningún método generalmente admitido para hacerlo, pero podría estimarse como mínimo en los costos de transporte ocasionados por los rellenos y los de la adecuación paisajística de estos, cuando ello sea posible.

C) De todos los factores, el costo del transporte es el más fácil de evaluar; y se trata del *suplemento* de costo que supone el transporte de los desechos hasta pie de obra; en este análisis se supone que tal suplemento es positivo dado que se admite en principio que una cantera para obtener materiales de préstamo se puede abrir generalmente a pie de obra, lo que no siempre ocurre, sobre todo cuando se necesitan materiales de unas ciertas características mínimas, en cuyo caso aquel suplemento de costo sería negativo.

D) Se consideran en este término las perturbaciones sobre el medio derivadas de la circulación por las vías públicas de camiones, de la congestión del tráfico consiguiente, del ruido y de los vertidos, al paso, de materiales en la calzada; el hecho de que tales efectos son difíciles de cifrar hace que se tienda a ignorarlos, lo que no quiere decir que no existan; claro que lo mismo ocurre con el transporte de materiales tradicionales ignorándose también con ellos este tipo de impactos, pero, en determinados casos, podrían ser menores los impactos derivados de aquel transporte que los de éste. No existe tampoco un método general-

mente admitido para cuantificar todas estas perturbaciones y su saldo neto, y en cada caso, habrá que partir de una evaluación de distancias de transporte, volúmenes de tráfico generado, importancia y distribución de la población.

3.2. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores el problema se plantea en los siguientes términos: vertederos y extracción de préstamos o aprovechamiento de los residuos. Se han visto las ventajas de la segunda alternativa y también los posibles inconvenientes, aunque no se ha mencionado una ventaja adicional por su prácticamente imposible cuantificación, mas no por ello menos real: se trata de las ventajas potenciales derivadas de la conservación y ahorro de las materias primas que constituyen los áridos naturales (E). No obstante, y prescindiendo por ahora de tal ventaja, lo que nos coloca del lado de la seguridad desde una perspectiva ambientalista, la ecuación anterior la podríamos esquematizar en la expresión general:

$$A + B \dots C + D$$

donde *B* puede o no existir y donde *C* y *D* pueden tener un signo u otro, y donde el signo representa la condición para el empleo de los materiales de desecho considerados. La simplicidad de esta relación es más aparente que real; si fuese posible medir todos los términos no sería difícil saber cuándo las circunstancias son favorables a su empleo, pero de la discusión anterior se deriva que sólo los términos *A* y *C* son susceptibles de valorar en términos monetarios y aún haciendo una estimación de los *B* y *D*, sería prácticamente imposible la utilización de las mismas unidades de cuenta de una manera que se pudiera aceptar con una cierta generalidad. El único procedimiento se basa en una evaluación subjetiva que tenga en cuenta, no

EMPLEO EN CARRETERAS DE LOS RESIDUOS DE EXPLORACIONES MINERAS

obstante, todos los términos del problema, lo que permitiría entonces incluir un quinto, E , en el primer miembro de la ecuación; estando prevenidos contra toda sobrevaloración del término C , derivada de que es el más fácilmente contabilizable monetariamente, y tendiendo a mayores valoraciones de las tradicionales en los otros términos, más ambientalistas y con mayor capacidad para inducir la utilización de estos materiales en carreteras. No cabe duda de que tal enfoque tiene el defecto de la subjetividad, pero se puede corregir con una buena campaña de información pública y de recogida de criterios contradictorios. En Gran Bretaña ya se vienen ensayando hace tiempo métodos de análisis del problema en colaboración con la contrata. El empleo directo de los desechos, evitando todo tipo de almacenamiento acopio intermedio es, sin duda, el más ventajoso y tal situación se vería claramente promocionada por una estrategia de gestión adecuada en los órganos de decisión de las fuentes de producción de desechos.

4. Aunque no sea objeto de este artículo el estudio de otras aplicaciones para los materiales de desecho creemos conveniente hacer ahora una alusión a ellas, de modo que se tenga en cuenta que su uso en carretera no es ni la única ni, muchas veces, la óptima solución. Probablemente los materiales con mayores empleos potenciales son las cenizas volantes y las escorias, que, a su vez, están entre los más aprovechables en carreteras, pero no son los únicos; y los empleos más generalizados son la industria cimentera y en la fabricación de hormigones y prefabricados en general. Concretándonos a los dos materiales mencionados, dada su diversidad de aplicaciones y el que su empleo en la producción de cementos puede inducir ahorros de energía, se podría

discutir cuál sería su más adecuado empleo; pero hoy por hoy constituiría una discusión puramente académica, sobre todo en nuestro país puesto que más de la mitad de la producción permanece hoy sin utilizar; lo que también ocurre en otros países en que se emplean con generalidad; por ejemplo, en Gran Bretaña sólo se han utilizado el 53 por 100 de las cenizas volantes producidas (6) y en Francia el 72 por 100. La tendencia, sin embargo, es a investigar nuevos empleos para todos estos materiales, y no sólo para los más claramente utilizables como la escoria de alto horno.

5. Existen, sin embargo, varios factores físicos y químicos que pueden limitar el empleo de todos estos materiales, o de algunos de ellos, por diversas causas, aunque en alguna medida vienen considerados en cada caso en otros artículos (2, 12, 13 y 14) no estará de más el agruparlos aquí.

5.1. La primera propiedad por su capacidad limitativa que se nos presenta en muchos de estos materiales es su *solubilidad* en agua; entre los componentes solubles se encuentran frecuentemente la cal, viva o apagada, los sulfatos de sodio, potasio, magnesio y, sobre todo, de calcio, en todas las formas de éste, hidratados o no, y las sales de hierro, sulfatos y cloruro sobre todo. En tales casos es importante determinar el contenido en sustancias solubles, a fin de juzgar si una solución parcial del material por las aguas de infiltración, freáticas o capilares puede ocasionar alguno de estos efectos nocivos:

5.1.1. Asientos inadmisibles o un deterioro de las propiedades mecánicas como consecuencia de la disminución del volumen derivado de la lixiviación, lo que puede acompañarse de la formación de un efluente nocivo, bien para otros ele-

mentos de la obra o para el medio; nocividad que depende de la naturaleza de las sustancias disueltas y de su concentración en el efluente o en las aguas freáticas. Por todo ello es necesario determinar experimentalmente el porcentaje en peso que puede perder el material de desecho en cuestión bajo la acción prolongada del agua y debido a la solubilidad, la naturaleza de las sustancias disueltas o de sus iones y las concentraciones que se pueden alcanzar en la solución. En general se puede delimitar para cada sustancia un valor umbral de nocividad y de ahí la importancia de los ensayos de solubilidad, ensayos que no se hallan normalizados para nuestro caso, pero que pueden ser ejecutados según los diversos procedimientos admitidos (1). A este respecto conviene tener presente que en algunos casos, como en la disolución de metales pesados, la nocividad se alcanza para muy pequeñas concentraciones, lo que constituiría limitación mucho antes que la derivada de otras consideraciones como la producción de asientos inadmisibles.

5.1.2. La *agresividad* de los sulfatos disueltos al hormigón y otros materiales con cemento Pórtland merece mención especial. El ión sulfato (SO_4^{2-}) reacciona con el aluminato tricálcico del cemento para formar la sal de Clandot con un aumento de volumen que disloca el material. El número de materiales aquí considerados que contienen sulfatos en grado tal que puedan constituir peligro es elevado, pero el sulfato de calcio, que es el principal de sus componentes es relativamente poco soluble y su presencia supone menor riesgo que la de los sulfatos alcalinos y de magnesio; por todo ello, la determinación de sulfatos totales puede conducir a un error de apreciación de riesgos reales. Este problema se subsana en algunas especificaciones

EMPLEO EN CARRETERAS DE LOS RESIDUOS DE EXPLOTACIONES MINERAS

al respecto como las británicas en las que se prescribe la preparación de un extracto acuoso agitando una muestra del material con un peso igual de agua y determinar sobre él la concentración de sulfatos.

5.1.3. *La contaminación* de las aguas de superficie y subterráneas por compuestos solubles, como el berilo, flúor, arsénico, selenio, cadmio, bario, metales pesados, elementos radiactivos o sustancias orgánicas tóxicas, puede hacer a aquéllas tóxicas para el hombre o el resto de la biocenosis del ecosistema. Soluciones con un pH demasiado alto o bajo, o las que contienen agentes oxidantes o reductores en exceso pueden ser peligrosas también, e, incluso, soluciones de sustancias en principio inofensivas pueden provocar perturbaciones, como la eutrofización, no deseable en un ecosistema. Finalmente, una acción sinérgica eventual puede complicar aún más el problema. Es, por tanto, necesario que en todo proyecto en que se pretenda aprovechar cualquier material residual se consulte a especialistas en el tema, aunque lo mismo debiera hacerse en la mayoría de los casos en que se empleen materiales tradicionales.

5.1.4. Cuando los ensayos de solubilidad muestren que el empleo de un material residual es susceptible de producir por lixiviación efectos inadmisibles de asientos, ataque o polución, es preciso evitar aquéllo por medios adecuados, análogos a los que ya han demostrado su eficacia para evitar la acción del agua en las calzadas y tales como la impermeabilización de los revestimientos, la interposición de una capa anticapilar o de una membrana estanca entre el suelo que soporta el terraplén y la base de éste, o entre dos capas determinadas del firme, y la protección de los taludes mediante una capa poco permeable.

5.2. Hay también casos en que se puede producir una *contaminación* indeseable del *aire*, siendo la sustancia más peligrosa a este respecto el amianto, que se puede presentar en varias formas. Ya está claramente confirmado que la inhalación de fibras de amianto puede provocar cáncer pulmonar, entre otros efectos, y la presencia posible de tales fibras en los residuos de las explotaciones mineras, aunque no probable, debe contemplarse, para tomar las medidas de control correspondientes.

5.3. *La radiactividad* remanente de algunos materiales procedentes de la extracción de minerales radiactivos y en otros casos excepcionales, puede ser peligrosa en zonas habitadas; este problema ya se ha planteado en algunos países de la O.C.D.E. al tratar de aprovechar en terraplenes materiales proce-

dentes de la obtención de uranio.

Conclusiones.

Varios factores hay que considerar antes de la utilización de un desecho o subproducto concreto en carreteras, tal y como se ha descrito, y que conciernen a la economía y conservación de recursos naturales, el ahorro de energía y a la degradación del medio en su doble variante, estética y por contaminación. Esta última parece ser la más limitativa de las consecuencias de los procesos de lixiviación, siendo frente a ella despreciable el efecto de ésta en asientos a largo plazo. Pero tanto los diferentes riesgos de contaminación, como la agresividad físico-química o la debida a la acción de los sulfatos entre otras, pueden ser previstas mediante los análisis adecuados y controlados.

BIBLIOGRAFIA

- (1) O.C.D.E.: "Utilisation des déchets et sous-produits en technique routière". París, 1977.
- (2) DIEZ, J. J.: "Empleo de materiales en la construcción de carreteras". B. Lab. Transporte núm. 119, págs. 49-54, 1977.
- (3) COLLINS, R. J., and MILLER, R. H.: "Availability of Mining wastes and their Potential for Use as Highway Material". Fed. H. Adm. Final Report. Washington D. C., 1977.
- (4) SHERWOOD, P. T.: "The use of waste and low-grade materials in road construction". 2. Colliery Shale. T.R.R.L. Labor. Rep. 649. London, 1974.
- (5) SHOLS, A.: "Die Bestimmung Brennbazer Anteile in Bergen der Steinkahle-nanfbereitung". Glueckauf, 110, 14, 1969.
- (6) BUTTEL, Ph. E.: "Utilization of Coal Mine Refuse in Highway Embankment Construction". Soc. of Mine Eng. Pennsylvania, 1976.
- (7) MOULTON, L. K.; ANDERSON, D. A.; SEALS, R. K., and HUSSAIN, S. M.: "Coal Mine Refuse: an engineering material". Ist. Symp. on Mine and Prep. Plant Refuse Disposal Coal and the Envir. Tch. Conf., pp. 1-25, 1974.
- (8) SHERWOOD, P. T.: "The use of waste and low-grade materials in road construction, 1: Guede to materials available". T.R.R.L. Rep. 647, 1974.
- (9) MILLER, R. H., and COLLINS, R. J.: "Waste materials as potential replacements for highway aggregates". Rep. 166. NCHRP. Transp. Res. Board Washington, 1976.
- (10) ANON: "New Method dewatering dredged material, cuts lagooning space". A.S.C.E., April 1975.
- (11) ANON: "The stabilization game". Environmental Science and Technology. Vol. 9. No. 7. July 1975.
- (12) DIEZ, J. J.: "Empleo de subproductos industriales en carreteras". Boletín A.E.D.C.R. Madrid, 1979.
- (13) DIEZ, J. J.: "Empleo de subproductos metalúrgicos en carreteras". Boletín A.E.D.C.R. Madrid, 1979.
- (14) DIEZ, J. J.: "Empleo de residuos urbanos en carreteras". Revista de Obras Públicas. Madrid, 1979.