



Certificación ISO 9001:2008 ‡

ESTADO DEL ARTE SOBRE EL USO DE RESIDUOS Y SUB-PRODUCTOS INDUSTRIALES EN LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS

María Guadalupe López Domínguez
Alfonso Pérez Salazar
Paul Garnica Anguas

**Publicación Técnica No. 394
Sanfandila, Qro., 2014**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**ESTADO DEL ARTE SOBRE EL USO DE
RESIDUOS Y SUB-PRODUCTOS INDUSTRIALES
EN LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS**

Publicación Técnica No. 394
Sanfandila, Qro, 2014

Esta investigación fue realizada en la División de Laboratorios de la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por la M. en C. María Guadalupe López Domínguez y el Ing. Alfonso Pérez Salazar, con las valiosas aportaciones del Jefe de la División de Laboratorios, el Dr. Paul Garnica Anguas.

Contenido

Resumen		iv
Abstract		vi
Resumen	Ejecutivo	viii
Capítulo 1.	Introducción	1
Capítulo 2.	Residuos y subproductos industriales	3
Capítulo 3.	Tecnologías y controles en el reciclado en caminos	15
Capítulo 4.	Casos empleo de subproductos y reciclado internacionales	21
Capítulo 5.	Diagnóstico para México y materiales de uso potencial	29
Capítulo 6.	Conclusiones	31
Bibliografía		33

Resumen

El presente trabajo compila experiencias internacionales y el estado del arte que guarda el manejo de residuos y sub-productos para identificar los factibles a utilizar en México y los controles de calidad que se deben tomar para estos materiales, distintos a los convencionales. Con el objetivo de prevenir y reducir la explotación de fuentes naturales y tener una alternativa a la limitada capacidad de sitios de disposición de residuos en el país. Así, los materiales con potencial para ser utilizados en la infraestructura de carretera son subproductos de demolición y construcción industrial, reciclaje de concreto y pavimento, escorias de fundición y residuos procedentes de la producción de acero. De este trabajo resulta que en México es técnica y económicamente factible utilizar materiales de residuo y la reutilización de sub-productos industriales, ya sea como sustituyente de algún componente en terraplenes o incorporarlos a la carpeta, cumpliendo siempre con las especificaciones para carreteras mexicanas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Abstract

This paper compiles international experiences and the state of the art that keeps wastes management and by-products, to identify feasible to use in Mexico and the quality controls that should be taken for these materials, which are different from the conventional used. With the objective of prevent and reduce exploitation of natural sources, and to have alternatives to the limited capacity of the disposal sites on the country. From this work, it results that in Mexico is technically and economically feasible use these materials either as a replacement for any component in landfills or incorporate them into the folder, always complying with the specifications for roads for the Mexican Secretariat of Communications and Transportation.

Resumen ejecutivo

En esta investigación se aborda el tema del empleo de residuos en la construcción de carreteras como una práctica para solucionar el problema del manejo de residuos y la valoración de éstos dentro de los procesos constructivos del Sector Transporte. Dado que el empleo de este material en las carreteras no es un concepto nuevo, el enfoque en cómo se habían empleado surge con una nueva perspectiva donde el objetivo es el de generar carreteras sostenibles. Por ello, una ingeniería en carreteras sostenible se basa en incluir todos los impactos dentro de un proyecto, desde el diseño y proyección, hasta la construcción, operación y mantenimiento. Esto involucra el empleo de tecnología e innovación en procedimientos constructivos y productos, sobre todo, haciendo uso de las mejores técnicas disponibles. Lo último implica analizar y definir técnicas en la elaboración de un producto que sean procesos eficientes y sostenibles en términos de geotecnia y, adicionalmente, en términos ambientales.

Este trabajo se enfoca en los procesos que actualmente se están realizando en cuanto al reciclado y la reutilización de residuos y sub-productos industriales, dónde se están aplicando, bajo qué controles y la legislación o normativa que les rige. El sondeo incluye a México y los avances que se están obteniendo en resultados preliminares y la experiencia sobre complementar la evaluación del desempeño con valoraciones de impacto ambiental que puedan tener estos materiales. Se encontró que en algunos países la práctica de reutilizar residuos o sub-productos industriales se contrapone a acciones de trazabilidad sobre la disposición de residuos, por lo que la misma legislación local imposibilita su uso en este sentido.

En México, el marco legislativo en materia hace la promoción e impulsa la gestión adecuada de residuos y la reutilización de materiales que aún puedan tener propiedades que lo puedan reincorporar a algún proceso productivo. Respecto al tema, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, en su Título Tercero, hace la clasificación los de residuos y su Reglamento busca que los residuos y subproductos sean recuperados, aprovechados o revalorizados para su reciclaje, reprocesamiento o aprovechamiento energético fomentando en el país el desarrollo de tecnología y métodos para este fin. Se define como residuo al material final que resulta del término de un ciclo principal de consumo de un producto o ciclo de extracción; mientras que un subproducto industrial puede definirse como un producto secundario que es obtenido durante la producción de un producto principal para el cual un proceso industrial fue inicialmente llevado a cabo.

Así, se encontró que los residuos y sub-productos principalmente empleados son las escorias de fundición, cenizas volantes, plásticos y en menor frecuencia lodos, llantas usadas y residuos de celulosa con las especificaciones que aplican para cada uno de ellos. También se reutiliza concreto proveniente como residuo de la construcción y otros caminos, así como el hierro y acero junto con material de la carpeta asfáltica de caminos antiguo, lo anterior depende del tipo de material y país. El uso más frecuente es como material en el relleno y construcción de terraplenes o como sustitución de algún componente o como reemplazo. La mayoría de los casos son materiales que se utilizan solos y, menos frecuentemente, con algún tratamiento previo o con mezcla de otros agregados.

La razón de porqué es empleado un residuo o sub-producto en lugar de algún otro tiene que ver con factores como la carencia del material, los procesos que los generan y si es un problema para el país; también se relaciona con las prohibiciones en los sitios de disposición, las políticas impuestas para el desarrollo sustentable del país, como preservar los recursos naturales y, finalmente, si se cuenta o no con la tecnología necesaria para reutilizarlos; de éstos el que tiene mayor peso es el cumplimiento con mecanismos y restricciones legislativas y de lineamientos de normas que implican sanciones en su incumplimiento.

Importar o exportar estos materiales no es una opción que sea económicamente factible debido a los costos de traslado que se tiene para llevar un residuo o sub-producto de un país a otro. Sin embargo, sí existen casos aislados donde esta práctica es llevada a cabo.

1 Introducción

El manejo y la gestión de los residuos se han convertido en una prioridad ambiental alrededor del mundo. En algunas partes esto ha llegado, incluso, a ser una problemática de salud pública y social, repercutiendo de manera directa o indirecta en la economía del país que la sufre. En la última década ha habido un fuerte desarrollo de tecnología y alternativas para buscar el aprovechamiento de estos residuos y sub-productos y minimizar, así, su producción en los procesos que los generan. Como el volumen de residuos y subproductos materiales generados en nuestra sociedad y el costo para su eliminación siguen aumentando, hay un incremento en presión e incentivos para recuperar y reciclar estos materiales y utilizarlos en aplicaciones secundarias. Debido a que la construcción de pavimentos requiere grandes volúmenes de materiales, los organismos viales se han convertido en participantes de estos esfuerzos de reutilización y reciclaje.

Desde una perspectiva de ingeniería de pavimentos, los materiales recuperados deben ser utilizados de una manera tal que el rendimiento esperado del proyecto no se vea comprometido. Los residuos y subproductos, sin embargo, son materiales muy diferentes a los naturales ya que han sufrido procesos que modifican sus propiedades, debido a esto, una parte importante de su reutilización o reciclado es la determinación de las mismas para encontrar su uso óptimo y especificaciones. La experiencia y el conocimiento sobre el uso de estos materiales varían de un material a otro, así como de un lugar a otro (país, estado, región). Para recuperar estos materiales para su uso potencial, ingenieros, investigadores, generadores y reguladores deben estar al tanto de las propiedades de los materiales, la forma en que se pueden utilizar y qué limitaciones pueden ser asociadas con su uso.

Las consideraciones a tener son debido a las condiciones a las que estará sometido el residuo o sub-producto y son determinantes en su empleo. Desde su origen o procedencia se pueden abordar algunos controles sobre la heterogeneidad del material, si requerirá algún tratamiento previo a su empleo, la constancia en su producción, los tiempos para su estabilización, en caso de ser necesaria, entre otros. En México aún no hay aplicaciones formales en campo de estas nuevas tecnologías para el desarrollo de carreteras sustentables. El objetivo de este trabajo es recopilar información para conocer los residuos y el proceso que los origina localmente, con el potencial de que puedan ser valorados para la construcción de caminos, asegurando la calidad en su desempeño. Así mismo, plantear las bases para determinar los ensayos complementarios para que en el país puedan logarse los objetivos de desarrollo sustentable respecto a la optimización de recursos mediante la reutilización y reciclaje de residuos y sub-productos en la construcción de carreteras, incorporándolos en la construcción de bases o sub-bases o en las carpetas.

Hasta hace poco tiempo, en la construcción de caminos se había desechado material que, de manera inmediata, no presentaba tener las características geotécnicas satisfactorias, como el contenido de agua, el contenido mineral, propiedades mecánicas, entre otros, por lo que su uso no era posible en el proyecto. Estos materiales eran considerados residuos y sustituidos por otros naturales obtenidos de canteras externas y bancos de materiales que sí cumplieran con las especificaciones geotécnicas. Sin embargo, dado que en muchos países es un requisito ahorrar recursos naturales y optimizar el uso de los mismos, junto al manejo de residuos, se están desarrollando métodos para el tratamiento de suelos y el uso de subproductos industriales que contribuyan al ahorro de recursos naturales y así construir obras estables. Sumado al beneficio económico que conlleva, propulsado con las restricciones ambientales que día a día surgen en más lugares, y son cada vez más severas sobre la optimización y manejo de recursos naturales, se ha logrado un gran progreso en el desarrollo de métodos para la estabilización de suelos.

En el uso de materiales alternativos, como lo son los residuos y sub-productos, a diferencia de cuando se emplean materiales naturales en la construcción de caminos, se debe tomar en cuenta la interacción que éstos tendrán en el ambiente desde un punto de vista químico y físico. Algunas de las interacciones potenciales que se podrían dar son: 1) el transporte de partículas finas en el empleo del material (e.g. cenizas), 2) infiltración por lluvia (antes de cubrir el material e.g. antes de sellos en carpetas), 3) transferencias de contaminantes al subsuelo o agua subterránea por infiltración de la lluvia, antes, durante o después de los sellos o coberturas, 4) el efecto de la transferencia de contaminantes por deformaciones debido al añejamiento por condiciones climáticas, y 5) el efecto de la transferencia de contaminantes por deformaciones debidas al tránsito.

Durante el periodo de vida útil del material, su comportamiento puede verse afectado por diferentes factores (termales, químicos, mecánicos), los efectos que pueda tener estos materiales en el ambiente están predominados a su exposición a la precipitación, por lo que las evaluaciones para conocer la lixiviación de contaminantes en los residuos y sub-productos es determinante para su control ambiental.

2 Residuos y Subproductos industriales

Hasta hace poco tiempo, en la construcción de caminos se había desechado material que, de manera inmediata, no presentaba las características geotécnicas satisfactorias, como contenido de agua, contenido mineral, entre otros, debido a que su uso no era posible. Estos materiales eran sustituidos por otros naturales obtenidos de canteras externas. Sin embargo, varios países están tomando en consideración los objetivos del desarrollo sustentable, especialmente en los terraplenes. En estos países, es un requisito ahorrar recursos naturales y optimizar el uso de estos recursos. En este contexto, los métodos para el tratamiento de suelos y el uso de subproductos industriales contribuyen al ahorro de recursos naturales y construir obras estables.

El beneficio económico, las consideraciones en restricciones ambientales y los lineamientos sobre desarrollo han permitido un fuerte desarrollo en el tema de estabilización de suelos en algunos países desarrollados. Sin embargo, al parecer la falta de experiencia técnica, la ausencia de material adaptado, la falta de producción local de mezclas, así como experiencias de intentos no exitosos o condiciones climáticas muy específicas han impedido el desarrollo del tratamiento de suelos en países en desarrollo en las últimas dos décadas.

2.1 Definición

En países no europeos y países que no pertenecen a la Comunidad Europea, definen como residuo al “material final del término de un ciclo principal de consumo de un producto o ciclo de extracción”; y un sub-producto industrial puede definirse como “un producto secundario que es obtenido durante la producción de un producto principal para el cual un proceso industrial fue inicialmente llevado a cabo”. México cuenta con esta clasificación para estos materiales dentro de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (Título Tercero, Clasificación de los Residuos).

Algunos otros países consideran sub-producto industrial a los residuos no tóxicos que no hayan estado bajo ningún proceso particular de manufactura. Para los países dentro de la Comunidad Europea, los residuos son definidos por el Consejo de la Directiva de la Unión Europea 75/442/EEC fecha 15/07/1975. Esta Directiva fue recientemente modificada a una versión de la Directiva 2006/12/EEC del Parlamento Europeo y el Consejo de Residuos. Y define a un residuo como cualquier sustancia u objeto que se encuentra en las categorías indicadas en el Anexo 1 de esta Directiva, el cual el poseedor quiere, intenta o requiere desechar. En la tabla 1 se muestran las categorías de residuos de acuerdo al anexo.

Tabla 1. Categorías de residuos listados en la Directiva 75/442/CEE

Anexo 1 – Categorías de los residuos	
Q1	Producción o residuos de consumo no especificados debajo
Q2	Productos fuera de especificaciones
Q3	Productos cuya fecha para su apropiado uso ha expirado
Q4	Materiales derramados, perdidos o que sufrieron algún percance, incluyendo cualquier material, equipo, etc., contaminado como resultado del mismo
Q5	Materiales contaminados o sucios como resultado de acciones planeadas (e.g. residuos por operaciones de limpieza, empacado de materiales, contenedores, etc.)
Q6	Parte inusables (e.g. Baterías rechazadas, catalizadores exhaustos, etc.)
Q7	Sustancias las cuales ya no se desempeñan satisfactoriamente (e.g. ácidos contaminados, solventes contaminados, sales de temperización exhaustas, etc.)
Q8	Residuos de procesos industriales (e.g. escorias, fondos destilación, etc.)
Q9	Residuos de procesos de control de contaminación (e.g. lodos de depuración, polvo de cámaras de filtro, filtros gastados, etc.)
Q10	Residuos de manufactura o acabado (e.g. virutas de torno, cascarilla de laminación, etc.)
Q11	Residuos provenientes de extracción y procesamiento de materiales crudos (e.g. residuos de minería, decantaciones de campos petroleros, etc.)
Q12	Materiales adulterados (e.g. aceites contaminados con PCB's, etc.)
Q13	Cualquier material, sustancia o producto el cual haya sido prohibido por la ley
Q14	Productos para los que el poseedor ya no tiene más uso (e.g. agricultura, domestico, oficina, rechazos comerciales y de tiendas, etc.)
Q15	Materiales contaminados, sustancias o productos resultantes de las acciones de remediación con respecto al suelo
Q16	Cualquier material, sustancia o producto que no esté contenido en las categorías anteriores

Al parecer la definición de sub-producto o co-producto industrial no existe en la legislación europea aplicable a los países participantes de la UE. Igualmente, varios países europeos han decidido rechazar las leyes locales y los documentos relacionados a ellas que se transpongan a las regulaciones europeas, ya sea en

su totalidad o en parte. Estas leyes principalmente rigen la generación, clasificación o manejo de residuos.

2.2 Tipos

El tipo y la cantidad de residuos o sub-producto empleado en la construcción de caminos en los terraplenes (bases y sub-bases) están relacionados con la producción local y con el tipo de industria existente en el país.

Estos materiales son utilizados frecuentemente en ciertos países (Francia, Bélgica, Polonia); sin embargo, el uso de éstos para trabajos en caminos es virtualmente inexistente en otros (Portugal, Suiza) y menos divulgado o aún en estado experimental en otros (Italia, España).

Estos materiales son regularmente usados de acuerdo a la cercanía de los sitios de producción y raramente son transportados largas distancias por el alto costo de transportación comparado con el valor inherente del material.

Se pueden clasificar en una primera categoría por el proceso que los genera en residuos de proceso termal, residuos de trabajos de demolición y residuos provenientes de otras fuentes.

2.2.1 Residuos provenientes de procesos termales

Esta categoría agrupa residuos y sub-productos provenientes de las industrias de procesamiento del acero, cemento y cal, así como materiales resultantes de la combustión de carbón en plantas de energía térmica o en los incineradores de residuos sólidos.

La escoria de alto horno, la escoria de acero y las cenizas volantes son los principalmente utilizados en la construcción de caminos. Las cenizas de fondo de la incineración de residuos sólidos municipales (RSM) principalmente se emplea en países cuyo proceso para eliminar los RSM es la incineración.

2.2.2 Residuos provenientes de trabajos de demolición

En esta categoría se incluyen los sub-productos de las actividades de demolición de cualquier proyecto de construcción y la demolición parcial o total de las carpetas de pavimento (concreto y asfalto). La reutilización y el reciclado de este tipo de materiales son los más comúnmente empleados en la mayoría de países. Estos materiales son generalmente usados sin un tratamiento previo, pero sí con la determinación de sus propiedades para obtener información de su comportamiento, dado sus distintos constituyentes (ladrillo, madera, concreto, etc.).

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en la Ley General para la Prevención y Gestión de Residuos (LGPGR) promulgada el 2003 [DOF, 2003], define los llamados Residuos de Manejo Especial (RME) como los residuos generados en los procesos de producción que son producidos por grandes volúmenes (más de 10 toneladas al año) de residuos sólidos urbanos, pero que no tienen las características para ser considerados residuos peligrosos.

Debido a esta reciente regulación, se tienen algunos datos sobre los volúmenes de generación de residuos y algunos sub-productos. Se estima que de la generación de RME en 2005 para servicios a través de los productos, donde la mayor parte de ésta es para la construcción y demolición o de la industria (77%), 18% son de los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, 3% se relacionan con los residuos generados por los servicios de transporte (en su mayoría de las terminales de pasajeros y las actividades administrativas y comerciales, así como el movimiento de las unidades) y el 2% se refiere a los generados en los servicios de salud [SEMARNAT-INE, 2006] y todavía falta una gran cantidad de industrias por presentar informes completos sobre su generación de desechos (Figura 1). La cantidad anual de residuos de demolición y construcción son cerca del 77 % de las 235,8 millones de toneladas generadas de residuos en general, y sólo un 5% de esto va a una disposición final adecuada.

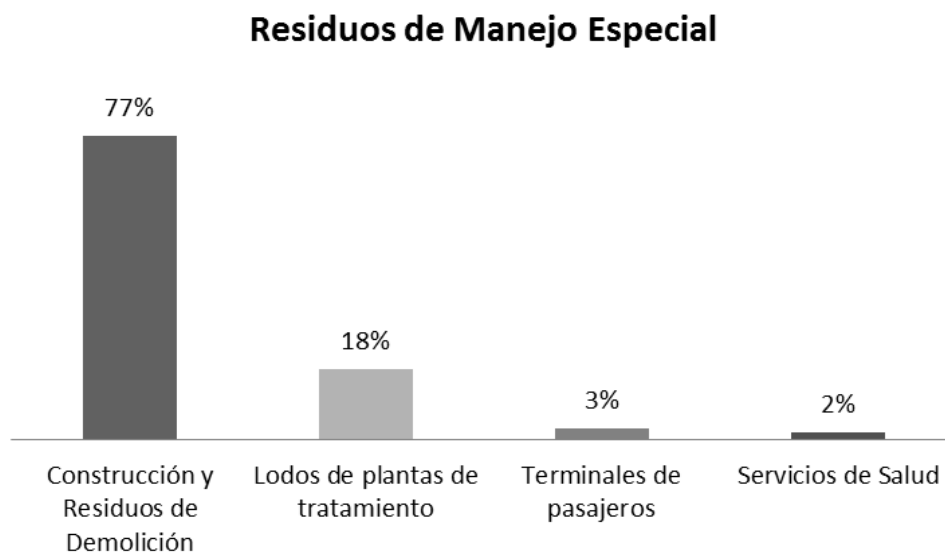


Figura 1. Residuos de manejo especial generados en el 2005. (SEMARNAT-INE 2006).

2.2.3 Residuos provenientes de otras fuentes

El tipo de residuo o sub-producto que es reusado en carretera está directamente relacionado con la producción de las industrias locales. Estos materiales raramente son importados o exportados. Se clasifican por su origen en:

- Procedentes de la misma obra e instalaciones adyacentes: sobrante de material, suelos marginales e inadecuados, lodos de excavación, reciclado in situ de la carpeta, fíller de recuperación, etcétera.
- Procedentes de la misma obra con tratamiento selectivo: fresado para la fabricación de mezclas bituminosas, demolición de concreto, y otros.
- Procedentes de plantas de tratamiento de residuos de construcción y demolición (RCD)
- Procedentes de otra actividad: residuos industriales, urbanos, llantas, cenizas inertes, escorias, etcétera.

Mundialmente, existe la experiencia del empleo de estos materiales donde se realizan pruebas de caracterización geotécnica en los materiales, especialmente en residuos o sub-residuos industriales, para predecir comportamientos estructurales aparte de los realizados para descartar a estos residuos como peligrosos. Estos análisis estructurales se complementan con estudios básicos sobre comportamiento de suelos y dependen de las especificaciones de obra que se requieran para la unidad en la que se pretende serán empleados. Es decir, determinar requerimientos de tratamientos previos, o una mezcla con otros materiales, para poder cumplir con las especificaciones establecidas para su uso y obtener el máximo valor en su incorporación al proceso.

El residuo no debe experimentar transformaciones químicas, físicas o biológicas, solubilizarse o reaccionar de ninguna manera; de igual manera, no debe ser biodegradable o interaccionar de manera negativa con algún otro material con el que va a estar en contacto. Se debe tener en cuenta la lixiviación, la toxicidad y el contenido de compuestos que pudieran llegar a ocasionar algún tipo de contaminación o afectar a la salud humana. Estos parámetros, en términos generales, son sencillos de determinar y, en caso haber algún riesgo, se pueden estabilizar con cal o cemento, que además de volverlos compuestos inertes, mejora las características geotécnicas y resistencia a la compresión.

2.3 Residuos y sub-productos con uso potencial

Como ya se había mencionado, a nivel mundial existe experiencia en el uso de estos materiales en ensayos de caracterización geotécnica, los cuales se llevan a cabo en el material utilizado, sobre todo en los desechos o residuos industriales, para predecir el comportamiento estructural al lado de pruebas para determinar que no se consideran desechos peligrosos. Analizar estas estructuras

complementa los estudios básicos sobre el comportamiento del suelo y depende de la especificación requerida para las unidades en que se utilizará, tales como, determinar si un tratamiento previo se requiere, o si es necesaria la mezcla con otros materiales para alcanzar las especificaciones de uso y obtener el máximo valor de su incorporación en el proceso.

Entre los diferentes tipos de residuos que pueden ser considerados para su reutilización en las carreteras y autopistas, se pueden clasificar en:

- Desde el mismo sitio de trabajo de construcción y las instalaciones adyacentes: el exceso de material, suelos marginales e inadecuados, excavación lodo reciclado de la carpeta, la recuperación de relleno,
- Desde el mismo sitio de trabajo de construcción con un tratamiento selectivo: molienda para la fabricación bituminoso, demolición de hormigón,
- A partir de la construcción y demolición planta de tratamiento (CDW)
- Viniendo de otra actividad: residuos industriales, urbanos, ruedas, ceniza inerte, escoria, entre otros.

2.3.1 Residuos de demolición y construcción (RDC)

En esta categoría se incluyen los sub-productos de las actividades de demolición de cualquier proyecto de construcción y la demolición parcial o total de las carpetas de pavimento (concreto y asfalto). La reutilización y el reciclado de este tipo de materiales son los más comúnmente empleados en la mayoría de los países. Estos materiales son generalmente usados sin un tratamiento previo, pero sí con la determinación de sus propiedades para obtener información de su comportamiento, dado sus distintos constituyentes (ladrillo, madera, concreto, etc.).

En México, la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en la Ley General para la Prevención y Gestión de Residuos (LGPGR) promulgada del 2003 (DOF, 2003), define los llamados Residuos de Manejo Especial (RME) como a los generados en los procesos de producción que son producidos por grandes volúmenes (más de 10 toneladas al año) de residuos sólidos urbanos, pero que no tienen las características para ser considerados residuos peligrosos.

Los residuos de demolición y construcción (denominados RDC) carecen de una gestión adecuada que permita la promoción de su uso o reciclaje en nuevas obras o proyectos. Sin embargo, las necesidades actuales de materiales en la construcción de infraestructura (carreteras, puentes, entre otros), el aumento de la demanda de vivienda y la gestión medioambiental casi nula en este tipo de residuos, han generado una problemática en torno a su disposición y regulación.

En julio del 2006, el Gobierno del Distrito Federal (GDF) emite normas sobre este tipo de residuos, en las cuales estipula que al menos el 25% de los nuevos materiales sean sustituidos por materiales reciclados en los proyectos de construcción, a reserva que los resultados de las pruebas de control puedan establecer otro porcentaje a ser usado. Esta normativa tiene el objetivo de promover el uso de materiales reciclados en cualquier proyecto de construcción.

Los residuos de demolición y construcción (denominados RDC) carecen de una gestión adecuada que permita la promoción de su uso o reciclaje en nuevas obras o proyectos. Sin embargo, las necesidades actuales de materiales en la construcción de infraestructura (carreteras, puentes, entre otros), el aumento de la demanda de vivienda y la gestión medioambiental es casi nula en este tipo de residuos, lo cual ha generado una problemática en torno a su disposición y regulación.

En cuanto a este tipo de residuos, se pueden señalar dos tipos: los residuos de demolición y construcción de edificios y cimientos, y los residuos de demolición de pavimentos de concreto. En el primero se está haciendo referencia, principalmente, a residuos de la demolición de pisos, muros y cimientos; mientras que en el segundo se trata de residuos producto de la demolición, únicamente, del concreto de caminos ya existentes.

Ambos tienen propiedades mecánicas similares que dependen principalmente de la calidad del concreto originario y de su edad. Son materiales con agregados bien graduados, fáciles de manejar y compactar. Se caracterizan por ser materiales fuertes con alta resistencia al desgaste y a la abrasión, así como un alto módulo elástico y una baja deformación (permanente).

Dependiendo de la calidad del material de donde se origina, puede haber una baja resistencia mecánica como desgaste y fragmentación, la cual podría deberse a la fracción de la pasta. Existe también un riesgo de hinchamiento si hay presencia de yeso en el material. En caso de emplearse con una alta exposición al agua, existe el riesgo de lixiviar con un pH alcalino muy alto. Además del problema ambiental que genera, puede haber daño por corrosión en los equipos de construcción.

En el caso de los RCD provenientes de pavimentos de concreto, la intensidad de compactación es mayor que en los obtenidos por la demolición de edificios, ya que presentan una mayor resistencia al desgaste y a la abrasión. Sin embargo, son materiales cuya contaminación se da principalmente en los hombros del camino y otros trabajos de asfalto. En sitios donde se emplean productos para evitar el congelamiento del camino, también puede existir contaminación por presencia de cloruros (Cl').

2.3.2 Llantas

Con respecto a las llantas y neumáticos en desuso, debido a la problemática que presentan dada la velocidad de su generación, existen normativas que limitan su utilización. Sin embargo, existen ya especificaciones para su uso en la construcción de camino para buscar la reducción de residuos. El objetivo de incorporar estos residuos es principalmente el de su reducción.

Se ha observado que la incorporación de la molienda del caucho recuperado puede darle ciertas propiedades deseables a las carpetas asfálticas y de concreto, lo cual hace viable esta práctica para caminos con especificaciones de bajo tránsito u obras adjuntas como capas de nivelación, muros de contención banquetas, entre otros.

2.3.3 Cenizas volátiles

Son las partículas finas sólidas silíceas, generadas a partir de la pulverización de los residuos de la combustión en plantas de energía, las cuales son llevadas hacia arriba por los gases de combustión y recolectadas en los dispositivos de control de emisiones a la atmósfera.

La finura de estas partículas va de 0,2 a 200 micrones de diámetro, con excepciones de 500 micrones. Estos diámetros las llevan a hacerlas útiles en el cemento Portland y como material de relleno. Dado a este tamaño de partícula, están sujetas a una gran dispersión por el viento por lo que las emisiones al aire son un inconveniente durante su manejo; es un material ligero, con un módulo elástico intermedio y es fácil de compactar pero con propiedades altamente hidrofílicas.

2.3.4 Cenizas del fondo de horno

Son las partículas de las plantas de incineración, generalmente en donde los incineradores son empleados como método de eliminación de los residuos sólidos municipales (RSM), y están contenidas al fondo de los hornos. Los fondos que no son cenizas, constan de material sin combustionar, que son materiales inertes como metales, cenizas volátiles que fueron arrastradas al fondo y concreto. Una vez que los materiales metálicos son removidos, las cenizas del fondo del horno de los incineradores se consideran un material adecuado para ser reutilizado en la construcción de caminos. Antes de ser empleado como tal, estas cenizas tienen un periodo de almacenamiento de 3 a 6 meses y son uno de los materiales más ampliamente estudiados como material alternativo con respecto a sus propiedades ingenieriles y ambientales.

Este material tiene propiedades de agregado ligero bien graduado, su tamaño de partícula y su forma facilitan su compactación Proctor óptima. Bajo condiciones óptimas de compactación, las cenizas continúan siendo un material drenante. Son de fácil manejo, tienen un alto grado de fricción interna y un moderado largo de partícula. Algunos estudios han demostrado que tienen un alto grado a la deformación. El “añejamiento” puede traer algunos cambios de fases, principalmente a las fases vítreas, haciendo posible la absorción de contaminantes. Se puede presentar un endurecimiento del material debido, principalmente, al tiempo y se vincula a reacciones de cimentación producidas por la formación de calcita bajo carbonatación.

Su grado de susceptibilidad al congelamiento varía de acuerdo a la fracción <0,063 mm, por lo que la granulometría de las cenizas se ajusta para mantener la permeabilidad y evitar el congelamiento. Al ser un material ligero podrían reducirse costos por transporte debido a su baja densidad.

Debido a su composición mineral, no es un material estable por lo que el proceso de preparación para su empleo como un material en la construcción de caminos es importante para asegurar las propiedades funcionales esperadas en su aplicación. A esto se le suman las fracciones pobremente combustionadas que quedan remanentes y generan factores potenciales de deterioración en la capas. Igualmente, hay un riesgo de hinchamiento al ser mezcladas con aglutinantes hidráulicos, ya que se pueden generar cristales expansivos debido al aluminio metálico contenido en la ceniza y su reacción con el cemento.

Se sugiere que su compactación sea en un contenido óptimo de agua durante los trabajos de compactación, dificultándose la sequedad; por su característica de alta porosidad puede no ser conveniente su uso en mezclas asfálticas, ya que absorbería en exceso el asfalto.

El pH de las cenizas es superior a 12, bajando hasta 10 – 11, después de su periodo de almacenamiento debido al proceso de carbonatación que se presenta, cuando se aplica en trabajos de superficie, en un par de años se alcanza un pH de 7 a 8, mientras que en trabajos de sub-base prevalecen las condiciones alcalinas (pH 10,5).

El contenido de material orgánico biodegradable en este tipo de residuos es generalmente bajo (carbón orgánico total < 1% en masa) y los lixiviados de metales como Pb, Zn, Al a pH altos, teniendo la mayor movilidad en el Cu, su lixiviación incrementa al aumentar el carbón orgánico disuelto, al cual generalmente es bajo (<100 mg/Kg).

2.3.5 Escorias de fundición

Las escorias de fundición son partículas generadas a la par que la oxigenación básica en hornos para la producción del acero (OECD, 1997). Estas partículas son duras, densas y resistentes a la abrasión. Debido al proceso de enfriamiento, dentro de las escorias de metal se tienen numerosas cavidades por las burbujas atrapadas durante el mismo, por lo que propiedades como la densidad, la porosidad y el tamaño de partícula son afectadas directamente por los rangos de temperatura a los que se lleva a cabo el enfriamiento de la escoria. Su composición química y mineralógica es igual de variable.

Dado a su gravedad específica, relativamente alta, se espera que su empleo aumente la densidad de los materiales tradicionalmente utilizados que no pueden cumplir por sí mismos. Las escorias de fundición tienen una muy buena resistencia a la abrasión y una contención de temperatura alta, esto último puede servir a las mezclas de asfalto en caliente para trabajos de mantenimiento y reparación ya que mantendrían la mezcla por más tiempo a una temperatura alta.

Las escorias pueden ser fácilmente procesadas para cumplir con los requerimientos del tamaño de agregado, ya que generalmente no se producen finos como en los materiales naturales. Dado a su alta gravedad específica, pueden aumentar la densidad de los materiales tradicionales, logrando impactar en los costos de manejo y transporte.

Tienen una muy buena resistencia a la abrasión y un alto ángulo de fricción interna que le da una alta estabilidad. Los valores de pulimento que presentan van de buenos a muy buenos; sin embargo, también están relacionados a su proceso de producción. La estabilidad del volumen está influenciada por el contenido de óxido de calcio (CaO) y de magnesio (MgO), la determinación para ambos no da resultados muy certeros en la determinación de cal para escorias.

2.3.6 Residuos provenientes de otras fuentes

El tipo de residuo o sub-producto que es reusado en carretera está directamente relacionado con la producción de las industrias locales. Estos materiales raramente son importados o exportados. Se clasifican por su origen en:

- Procedentes de la misma obra e instalaciones adyacentes: sobrante de material, suelos marginales e inadecuados, lodos de excavación, reciclado *in situ* de la carpeta, *filler* de recuperación, etcétera.
- Procedentes de la misma obra con tratamiento selectivo: fresado para la fabricación de mezclas asfálticas, demolición de concreto y otros.
- Procedentes de plantas de tratamiento de residuos de construcción y demolición (RCD).
- Procedentes de otra actividad: residuos industriales, urbanos, llantas, cenizas inertes, escorias, etcétera.

Mundialmente existe la experiencia del empleo de estos materiales, donde se realizan pruebas de caracterización geotécnica en los materiales, especialmente en residuos o sub-residuos industriales, para predecir comportamientos estructurales además de los realizados para descartar a estos residuos como peligrosos. Estos análisis estructurales se complementan con estudios básicos sobre comportamiento de suelos y dependen de las especificaciones de obra que se requieran para la unidad en la que se pretenden ser empleados. Es decir, determinar requerimientos de tratamientos previos, o una mezcla con otros materiales, para poder cumplir con las especificaciones establecidas para su uso y obtener el máximo valor en su incorporación al proceso.

3 Tecnologías y controles en el reciclado en caminos

3.1 Tecnologías

Dentro de las tecnologías que se tiene para el reciclado y manejo de los residuos se encuentran progresos significativos logrados en el área de equipos de alto desempeño para aglutinantes en polvo, mezclando y compactando las capas tratadas. En los últimos años, los equipos de alto desempeño se han utilizado para detectar puntos débiles durante el proyecto, o para asegurar que el desarrollo de los objetivos se haya cumplido al final del proyecto. Algunos de estos desarrollos son:

- Pulverizadoras de suelo de alto poder: proveen moliendas de suelo más finas, cavan a una profundidad de 50 cm o más y producen inicialmente bloques de suelo más fuertes (>200 mm).
- Esparcidores con un rango de dispersión proporcional a la velocidad de viaje, amplitud de esparcimiento variable y coeficientes de variación muy bajos. Estas máquinas dan ahorros en aglutinantes, una mejor distribución de los productos y reducen el riesgo de dispersión desproporcionado.
- Máquinas de riego que aumentan en gran medida la cinética de la hidratación y la homogeneidad de los materiales mientras incrementan su retención de agua. Éstos tienen mejores desempeños que las superficies con riegos tradicionales.
- Pulverizadoras de bloque usadas para romper grandes componentes de silicio de materiales como arcilla de pedernal o de esquisto. Éstas ayudan a hacer el suelo más homogéneo.
- Cubetas mezcladoras adaptadas para pequeños sitios como brechas de relleno de sanitación u otros trabajos del camino
- Finalmente, unidades móviles de tratamiento integrado que permiten realizar el proceso oportunamente en sitios pequeños y mejorar el uso del exceso de materiales de terraplenes y reciclado de otros materiales.

Los polvos aglutinantes pueden actuar en seco o humedad con gran precisión, lo que permite bajas tolerancias y generar ahorros.

La distribución de agua en un modo más homogéneo a través de la inyección o arado del suelo tiene un alto costo, debido a que este proceso es difícil de manejar dada la escorrentía de los equipos de riego de superficie.

La experiencia en sitios grandes que tratan la sub base, o las capas de la base con aglutinantes cementantes, indica que los actuales tratamientos, combinados con los equipos modernos, tienen desempeños al mismo nivel que los

tratamientos llevados a cabo en planta y son una opción viable ya que tienden a ser ligeramente más gruesos que el promedio.

Igualmente, la migración hacia el uso de materiales heterogéneos y residuos de sitios de construcción ha llevado a desarrollos tecnológicos significativos en facilidades móviles y fijas, y en cambios en el equipo. Con respecto a las plataformas de reciclado, el tratamiento de materiales está comenzando a tener hojas de identificación que incluye la información sobre las características geotécnicas, facilitando determinar los usos potenciales del producto.

El progreso continuará, eventualmente, contribuyendo sobre todo a la optimización del manejo de recursos. Se debe prestar particular atención al monitoreo de los tratamientos en sitio, como aseguramiento de la durabilidad de las estructuras que se construyen.

3.2 Productos

El cemento y la cal son los materiales más ampliamente utilizados. Sin embargo, recientemente se han desarrollado otros agentes estabilizadores que incrementan la adaptación de otros materiales a las especificaciones, por lo que está incrementado también el número y tipo de materiales que pueden ser usados para los tratamientos. Muchos sub productos industriales pueden ser estabilizados y algunos pueden ser utilizados como aglutinantes.

Se han logrado avances en:

- El desarrollo de cal de bajo polvo y aglutinantes cementantes de caminos que hacen posible llevar a cabo su tratamiento en zonas urbanas sensibles, suburbanas o agrícolas y en áreas ambientalmente protegidas o áreas con riesgos específicos.
- El desarrollo de aglutinantes específicos para caminos usando mezclas mixtas adaptables (cal, escoria, rebaba, ceniza, etc.).
- La utilización de aglutinantes rápidos para reducir el tiempo de espera para el uso de caminos y asegurar más tiempo de protección contra los riesgos potenciales por la degradación debido al clima (erosión, congelamiento, etc.).
- En algunos países, el uso de agentes aglutinantes hechos con subproductos industriales como escorias finas provenientes de plantas de cal está incrementándose.

Se han logrado algunos progresos en las siguientes aplicaciones:

- Tratamientos de suelos húmedos y secos con lavados de cal. Esta técnica utilizada frecuentemente en EEUU por muchos años, fue recientemente introducida a países del Sur de Europa.
- Tratamiento de suelos con sulfitos en dos pasos. El tratamiento de este tipo de suelo es precedido por un paso en el cual la formación inicial de etringita está asegurada por la adición de cal y la humedad.
- Más frecuentemente el tratamiento de materiales reciclados, esquejes de trinchera o el exceso de material de terraplén.
- Desarrollo de tratamiento de suelo para bases de pavimentos en lugar de usar materiales granulares de alta calidad.

Estabilizar la formación de nivel (consistente de la parte superior del terraplén, el fondo de la excavación y, más generalmente, la sub-base) está volviéndose una técnica más usual en los sitios de construcción de caminos y de carreteras de tránsito pesado.

Estudiar el comportamiento de los materiales tratados, como se ha hecho en foros internacionales, permite determinar los resultados de durabilidad empleando dichos tratamientos, pero también se puede determinar la dificultad de control, el delicado periodo de tiempo que tardan en colocarse los materiales, los cuales a menudo coincide con o sigue cercanamente a las actividades de riego y compactación de los materiales tratados.

Se ha visto que se han tratado un amplio panel de rocas naturales y se han estudiado varios suelos, pero ha habido un énfasis fuerte en los suelos finos limosos o suelos con una determinada cantidad de arcillas. Los materiales con grandes cantidades de arcillas son usados en algunas aplicaciones, junto con sub productos derivados de la alteración de rocas granitas o lateritas.

Las características geotécnicas de los materiales han sido establecidas a través de métodos muy tradicionales como lo es la prueba Proctor y CBR, los límites de Atterberg, valor de azul de metileno, análisis de tamaño de partícula, entre otras. La prueba de desempeño mecánico más ampliamente reconocida para los materiales tratados es la prueba de compresión no confinada, algunas veces complementada con pruebas triaxiales, aparato de corte directo o de compresión diametral o pruebas de tensión. En algunos casos, se mide también el módulo de resiliencia.

Se ha puesto particular énfasis en la influencia de sulfatos en el tratamiento de suelos usando cal o cemento Portland. Algunos desarrollos se han logrado, con respecto a los métodos, para probar sulfatos en suelos y las técnicas de construcción para prevenir hinchamiento.

La bibliografía más reciente también indica que hay un interés en la tecnología enfocado a la estabilización de suelo orgánico, es cual es difícil de tratar con

cemento o cal por la interferencia de la materia orgánica que se mezcla en el proceso. Algunas otras consideraciones entran en juego como, por ejemplo, grandes cantidades de mica mineral en los suelos.

La durabilidad es el factor clave cuando se estudia el comportamiento de los suelos tratados, especialmente respecto al clima.

En términos de áreas de investigación clave, parece haber un crecimiento en el interés de entender mejor el comportamiento macroscópico de los suelos tratados a través de los procesos físicos y químicos que ocurren a nivel microscópico. Herramientas analíticas y de investigación, como lo son la difracción de rayos-X, la termo gravimetría, la microscopia electrónica o incluso MRI, son sin duda factores que contribuyen en el avance para la comprensión de estos procesos.

3.3 Equipamiento

Progresos significativos se han logrado en el área de equipos de alto desempeño para aglutinantes en polvo, mezclando y compactando las capas tratadas. En los últimos años, se han diseñado equipos de alto desempeño para detectar puntos débiles durante el proyecto, o para asegurar que el desarrollo de los objetivos se haya cumplido al final del proyecto. Algunos de estos desarrollos son:

- Pulverizadoras de suelo de alto poder: proveen moliendas de suelo más finas, cavan a una profundidad de 50 cm o más y producen inicialmente bloques de suelo más fuertes (>200 mm).
- Esparcidores con un rango de dispersión proporcional a la velocidad de viaje, amplitud de difusión variable y coeficientes de variación muy bajos. Estas máquinas dan lugar a ahorros en ligantes, una mejor distribución de los productos y reducen el riesgo de esparcimientos desproporcionados;
- Máquinas de riego que aumentan en gran medida la cinética la hidratación y homogeneidad de los materiales mientras incrementan su retención de agua. Éstos tienen mejores desempeños que las superficies con riegos tradicionales.
- Pulverizadoras de bloque usadas para romper grandes componentes de silicio de materiales como arcilla de pedernal o de esquisto. Éstas ayudan a hacer el suelo más homogéneo.
- Cubetas mezcladoras adaptadas para pequeños sitios como brechas de relleno de sanitación u otros trabajos del camino.
- Finalmente, unidades móviles de tratamiento integrado que permiten realizar procesos oportunamente en sitios pequeños y mejorar el uso del exceso de materiales de terraplenes y reciclado de otros materiales.

Los polvos aglutinantes pueden actuar en seco o humedad con gran precisión, lo que permite bajas tolerancias y generar ahorros.

La distribución de agua de un modo más homogéneo, a través de la inyección o arado del suelo, tiene un alto costo debido a que este proceso es difícil de manejar dada la escorrentía de los equipos de riego de superficie.

La experiencia en sitios grandes que tratan la sub base o las capas de la base con aglutinantes cementantes indica que los actuales tratamientos, combinados con los equipos modernos, tienen desempeños al mismo nivel que los tratamientos llevados a cabo en planta y son una opción viable ya que tienden a ser ligeramente más gruesos que el promedio.

Igualmente, migrar hacia el uso de materiales heterogéneos y residuos de sitios de construcción ha llevado a desarrollos tecnológicos significativos en facilidades móviles y fijas, así como a cambios en el equipo. Con respecto a las plataformas de reciclado, el tratamiento de materiales está comenzando a tener hojas de identificación que incluye la información sobre las características geotécnicas, facilitando el determinar los usos potenciales del producto.

El progreso continuará, eventualmente, contribuyendo sobre todo a la optimización del manejo de recursos. Se debe prestar particular atención al monitoreo de los tratamientos en sitio, como aseguramiento de la durabilidad de las estructuras que se construyen.

4 Casos empleo de sub-productos y materiales reciclados

En general, hay muy poca o nula posibilidad de exportar o importar estos tipos de materiales. Sin embargo, esto no considera las importaciones no reguladas que siempre son difíciles de cuantificar. Solamente Panamá declara importar ciertos materiales de residuo o sub-productos de los Estados Unidos y Japón. Por lo que la aplicación de estos materiales es de acuerdo a la cercanía de los sitios de producción, ya que raramente son transportados largas distancias por el alto costo de transportación en que caerían comparados con el valor inherente del material.

4.1 Residuos por demolición y construcción

Hay pocos trabajos que podrían contar cómo funciona el CDW como sustituyente de áridos en una subrasante carretera. A continuación, se presentan algunos de los resultados que tuvieron estos residuos probados bajo controles de calidad para ser empleados como sub-base (Rivera y Gutiérrez, 2008). En su papel, las pruebas se basan en el estándar N CTR CAR-1-04-002/03 para la construcción de carreteras sub-base. Para ello, cuatro muestras fueron tomadas a partir de una planta de reciclaje de residuos de demolición local. Las muestras fueron de cuadrantes (bajo la norma mexicana NMX -AA -015- 1985) y la prueba de las propiedades físicas en virtud de las normas de control de calidad para emplearse en carreteras secundarias. La subrasante carretera secundaria debe ser adecuada para una Intensidad Media Diaria anual entre 500 a 1500 vehículos.

En una primera etapa, el material se ensayó de acuerdo con la curva granulométrica. La composición física del material es principalmente de concreto, ladrillo, arcilla, cerámica, mortero, bloque, mampostería y algunos limos. El material se encuentra libre de basura, papel, madera, plástico, textiles y materiales tóxicos. Figura 2.



Figura 2. Material reciclado del banco.

Las curvas de clasificación fueron los siguientes: 3 "a las multas, 1/2" a multas, 1/2" a 1/4" (nuevo) Material de la Virgen (tezontle) y una base controlada. Las prueba de las propiedades físicas de control de calidad de acuerdo N CTR CAR-1-04-002/03 fueron: humedad, granulometría, límites de Atterberg consistencia, contracción lineal, densidad de gravas, peso volumétrico, prueba de compactación Proctor, equivalente de arena y relación de soporte California (CBR). Figura 3.

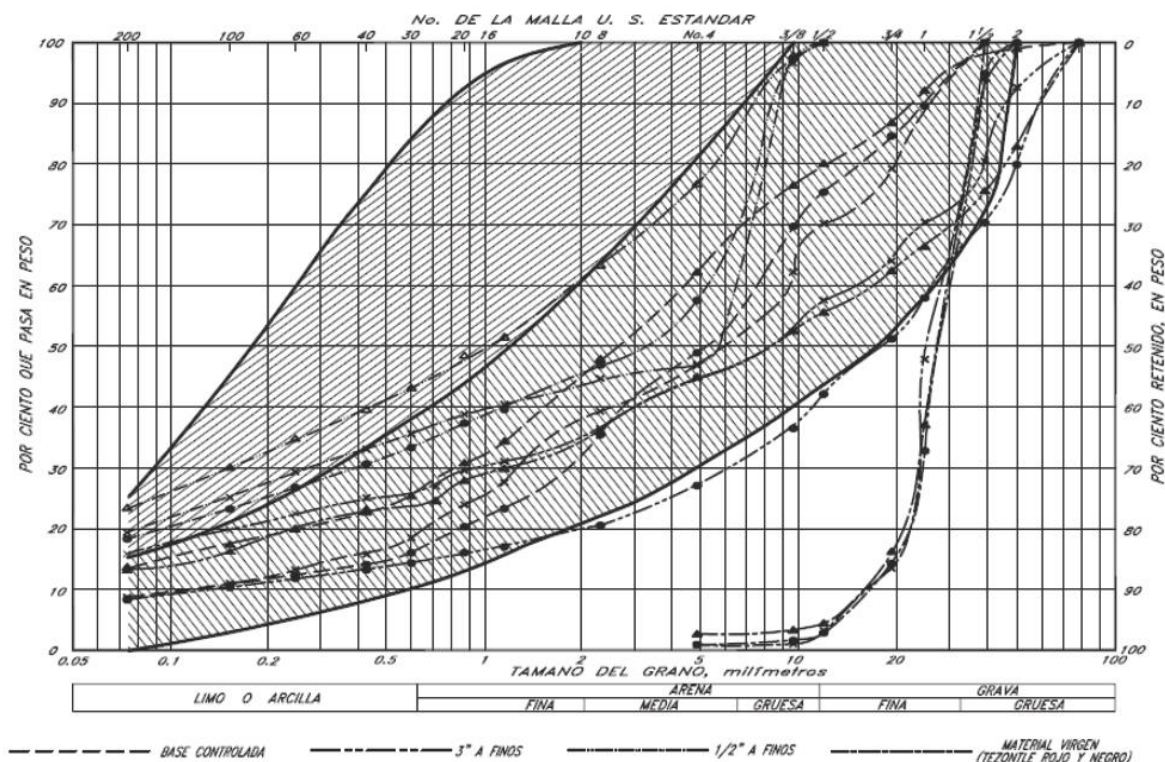


Figura 3. Curva de gradiente. Fuente: Rivera y Gutiérrez, 2008.

Tabla 2. CBR y contenido de agua.

Muestra	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Base controlada
Contenido óptimo de agua, W_{opt} %	12,48	11,76	12,66	7,23	7,23
Peso volumétrico seco, δ_{max} Kg/m ³	1538	1628	1711	1634	1687
CBR %	24,62	27,35	30,48	23,44	51,97

Fuente: Elaboración propia con datos de Rivera y Gutiérrez, 2008.

En este análisis, se puede concluir que las mezclas y las bases controladas tienen un porcentaje de finos inferior al 25%, por lo que todos ellos se encuentran en una deseable calidad. Acerca del contenido de agua y su plasticidad, todas las mezclas están en una adecuada calidad y la base controlada en deseable debido a su baja plasticidad, que es una propiedad necesaria sobre los materiales de sub-rasante, así como un bajo contenido de arcilla, que es también el caso de todas las mezclas y la base controlada. Por último, la prueba de CBR muestra que una mezcla 3 y la base controlada tienen el mejor rendimiento al colocarlos en una deseable y una adecuada calidad, respectivamente. Las mezclas 1, 2 y 4, mostraron valores muy cercanos a la calidad mínima requerida para materiales de sub-rasante.

Es posible aplicar metodologías conocidas en el campo de la construcción de materiales de RDC e incorporarlas en proyectos de carreteras como sustituyente de nuevos materiales; en el caso de la mezcla 3, que cumple los parámetros de calidad tan bien como los materiales nuevos (base controlada), puede ser utilizada en la construcción de caminos como parte de la sub-base en las carreteras con especificaciones secundarias.

4.2 Reciclado pavimentos asfálticos (RAP)

Reciclar significa un camino para transformar un pavimento degradado en una estructura homogénea capaz y adaptada para soportar una cantidad de tráfico significativo. Los materiales en un camino de construcción pueden ser reciclados o recuperados mediante la reutilización de los materiales utilizados en él para crear una nueva capa, la cual surge por la desintegración de los mismos en una cierta profundidad. Esto implica la adición de un aglutinante, agua (para envuelto hidratación y compactación), agregados para la clasificación óptima y, en algunos casos, en el laboratorio probaron dosis de aditivo (CALTRANS, 2006).

Los pavimentos reciclados o regenerados, ya sea de concreto o asfalto, podrían ser clasificados por el sitio en donde el reciclaje va a tener lugar, la temperatura de la mezcla, por la característica del material para ser reciclado o de la carpeta. Hay muchas ventajas en pavimentos de reciclaje, incluyendo la explotación de materiales envejecidos; la extracción de características, contaminados o pavimento inadecuado existente y contribuir a mejorar la resistencia geométrica del nuevo pavimento y su homogeneización y, desde un punto de vista ambiental, para reducir la extracción de los agregados de los bancos de materiales vírgenes. Otro aspecto a considerar es que en pocos años la producción de cemento asfáltico va a tener un alto valor comercial y será un material en desuso por la crisis del petróleo que podría ocurrir (Ferrari, 2011), a menos coste en el reciclaje puede variar considerablemente de un sitio a otro, uno de sus principales objetivos es dar a cada material, de la mejor manera posible, las tarifas más bajas para lograrlo.

La recuperación (o reciclado) de pavimento de asfalto (RAP) es una práctica muy común en Estados Unidos y los países europeos, y cada día va en incremento (EAPA, 2005). Como resultado, una gran cantidad de documentos y obras se centran en el desarrollo de metodologías de diseño, construcción y funcionamiento de las mezclas asfálticas con contenidos RAP. Sin embargo, en México este desarrollo sigue ausente. Fonseca y colaboradores (2009), están trabajando en este tema mirando desde el principio que un alto contenido de RAP (%) en mezclas asfálticas en caliente (140-180° C) podrían alcanzar hasta 100-80% de RAP y tienen características deseables como alta resistencia a la tensión a la tensión (TSR), estabilidades Marshall hasta 800 Kg y el porcentaje de vacíos entre 3,0 y 5,0%.

Las pruebas se llevan a cabo para 40, 60, 80 y 100% de material de RAP. La deformación plástica permanente utilizando la máquina de la pista Hamburgo, cumple con todas las dosificaciones de contenido de RAP de 60%, 80% y 100%. Para el caso de 40% de RAP no cumple con deformaciones de menos de 10 milímetros antes de los 20 000 ciclos.

El uso de productos (aditivos) para mejorar el cemento asfáltico son innovaciones empleadas para devolverle propiedades útiles al pavimento. El ensayo del módulo elástico, valores de rigidez y la relación con la deformación plástica permanente son pruebas importantes para completar la evaluación de mezclas de RAP.

El reciclaje de asfalto incorporado en los nuevos revestimientos en carreteras reduce el carbono emitido y evita que los residuos vayan a rellenos y sitios de disposición final de residuos. Permite volver a utilizar el asfalto que ayuda a asegurar de que se está haciendo un uso eficiente de los materiales, y la preservación de los recursos naturales (en forma de combustibles fósiles).

Al no existir en México, ningún estudio científico formal que muestre una metodología de diseño de mezclas asfálticas con alto contenido de RAP, este proyecto de investigación pretende definir una metodología de diseño de mezclas asfálticas con alto contenido de RAP junto con la presentación del Equipo Industrial de Reciclado de Mezclas Asfálticas en Caliente, EIRMAC®.

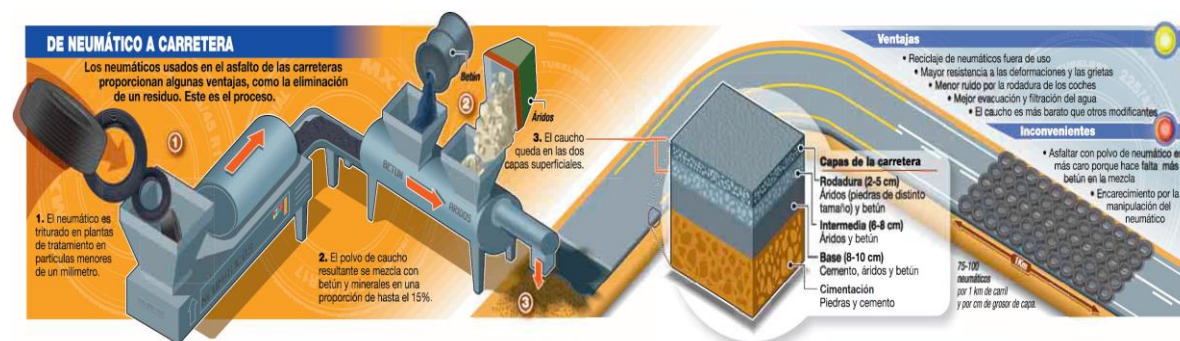
4.3 Llantas

Otros residuos utilizados estabilizan las cenizas procedentes de los procesos industriales, tales como las plantas de fundición, lodos, celulosa, plásticos y neumáticos usados. En México entre 25 y 30 millones los neumáticos son desechados cada año (SEMARNAT, 2005), los cuales se acumulan con cientos de millones que ya existen; el problema es que no hay lugares adecuados para su disposición, por lo que el mayor vertedero es Ciudad Juárez, Chihuahua. Esto es

debido a la falta de un programa de reciclaje que puede causar daño al ambiente y un problema de salud pública grave. Los desechos de los neumáticos se consideran una fuente de riesgo ambiental y de salud en todo el mundo, el riesgo de un incendio o simplemente apilar, implica 500 años de contaminación, ya que es el tiempo que tardan en degradarse (CEMEX, 2012) y, por lo tanto, crean un riesgo de un aumento de las emisiones de diversas sustancias peligrosas.

La solución a este problema ha sido su incorporación en procesos tales como la construcción de carreteras, no como un combustible para las mezclas de asfalto de calefacción, sino como un componente de la mezcla de caucho en el asfalto bituminoso. Prácticas de todo el mundo están incorporando alto porcentaje de los neumáticos en las mezclas asfálticas con buenos resultados (Gallego et al., 2009). En México, la experiencia sobre este tema es casi nula, sin embargo, las empresas dedicadas al desarrollo de concreto están involucradas en proyectos de residuos como el uso de las llantas. Un neumático se podría utilizar al incorporarse en el concreto asfáltico mediante la eliminación de metal y elementos de cuerda de los neumáticos e incorpóralos como material del suelo, como otro agregado a la mezcla. Al hacer esto, los neumáticos como producto de combustión se reducen, ayudando a minimizar las emisiones de carbono. Además, se evitan los focos infecciosos por no tener un lugar para la reproducción de los mosquitos que causan enfermedades como la malaria y el dengue.

Las ventajas de este uso se evalúan en el ahorro energético y construcciones sostenibles en términos prácticos, en comparación con la producción del concreto tradicional. El concreto producido, por sus características, es utilizado en pavimento para tráfico ligero como estacionamientos, capas para suelos de nivelación o en calles para proyectos residenciales, carreteras con poco tráfico, aceras, andadores de parques, entre otros. Debido a que contiene material de caucho que es más susceptible a ser bajo en agentes químicos como ácidos, soluciones de hidrocarburos (como gasolina) y similares. Figura 4.



Fuente: CEMEX 2012.

Figura 4. Procesamiento incorporación llantas a carpeta asfáltica.

Otros residuos utilizados son escorias de fundición y residuos procedentes de la producción de acero, cenizas, lodos, algún tipo de plástico y celulosa. En el caso de lodos, debido a su granulometría se pueden utilizar mezclando con otros

materiales como un material puzolánico para la construcción de un terraplén. Algunos autores como Ramírez y García (2013) explican que mezclas con 0,5% de cenizas, 0,5% de lodos y 1% de cal, logran los mismos resultados que en un uso convencional de 2% de cal en la estabilización de terraplenes en una sección de prueba, pero esto no se aplica como una práctica regular. Además, ponen de relieve la importancia de la técnica de compactación, lo que podría influir fácilmente en los resultados de la utilización de estos residuos como estabilizadores.

4.4 Consideraciones en el uso de residuos y sub-productos

4.4.1 Generales

Las razones por las que un país empieza a experimentar un incremento en el manejo de estos materiales son:

- Disminución de materiales naturales de alta calidad.
- Necesidad por conservar los recursos naturales
- Prohibición y limitación del número de sitios para la disposición de sitios de rellenos.
- Las políticas a ser implementadas generalizadas a programas de Desarrollo Sustentable.
- El bajo costo de estos materiales comparado con el de los materiales naturales es el mayor factor en Polonia, y en un menor grado en Italia, esto explica el por qué se ha incrementado el uso de residuos y sub-productos industriales para la construcción de terraplenes en estos países.

Sin embargo, aunque pareciera que se fomenta esta práctica, existen legislaciones que restringen el uso de este tipo de materiales. La Administración Federal Suiza es extremadamente reacia a autorizar el reciclado de residuos en la construcción industrial, dado que eso resultaría en la pérdida de la trazabilidad del producto. De hecho, donde las condiciones de uso para las actividades iniciales de construcción son adecuadamente determinadas y controladas, éstas se hacen más difíciles de llevar a cabo y son menos consistentes durante los procesos de demolición y las acciones de reciclado que le preceden. Pare ellos, esta actividad resultaría en la dispersión sin control en el ambiente de materiales nocivos. Las regulaciones suizas son extremadamente estrictas y dejan muy poca flexibilidad para el reciclado de residuos y sub-productos industriales, inclusive si pudieran tener algún potencial uso de acuerdo a sus cualidades técnicas.

4.4.2 Ambientales

El análisis del ciclo de vida (ACV) es una herramienta que hace posible evaluar el impacto ambiental de un producto, proceso o actividad a través de la identificación de flujos de energía y materiales, evaluar su consumo, emisiones generadas y la valoración de las posibles mejoras al medio ambiente. El análisis abarca el ciclo de vida completo; es decir, desde la producción de materias primas, fabricación, transporte, distribución, uso, reuso, mantenimiento, reciclado de materiales y disposición final o confinamiento (Stripple, 2001). El ACV permite estudiar los subsistemas que interactúan en un sistema más complejo de una manera simplificada, haciéndolo una de las herramientas más importantes para la toma de decisiones en materia medioambiental; sin embargo, por el alcance que tiene, no las analiza a detalle, para ello se utilizan otras herramientas de la ecoeficiencia.

El ACV es la técnica para identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto. Es la recopilación y evaluación sistemática de procedimientos, entradas y salidas en materia y energía (Figura 5) y de los impactos ambientales potenciales atribuibles de manera directa al desempeño de los productos a lo largo de su vida útil y no útil (Astrup et al., 1998).



Fuente: Modificado de Remmen, 2007.

Figura 5. Ciclo de vida de un producto.

Esta cadena es conocida también como “desde la cuna a la tumba” y en el contexto de la reutilización o reciclado de residuos y subproductos industriales es útil porque da el sistema desde el cual típicamente comienza la extracción de materiales de los recursos naturales, así como la explotación y generación de energía que forman parte del ciclo. Las demás partes que la componen son el diseño y producción, el empaque y distribución, el uso del producto y el mantenimiento, y en su disposición la posibilidad de su reuso o de reciclado (total o parcial).

Debe Incluir factores como el uso y tipo de maquinaria en la obra de construcción, las horas de trabajo, el tipo y uso de transporte utilizado para las diferentes actividades, esto para conocer los gastos energéticos por combustible en este rubro, y las emisiones en la extracción y en actividades como el tipo de carpeta empleada.

5 Diagnóstico para México y materiales de uso potencial

Es obvio que, en lo que respecta a la obtención de materiales para la construcción de carreteras, el proceso involucra una gran explotación de material y, en ciertos casos, por ejemplo con los materiales pétreos para las capas de pavimento, los recursos naturales que son extraídos cuando no cumplen con las especificaciones para la conformación de las capas del pavimento, hacen no apta su utilización en las mezclas asfálticas, generando una mayor acumulación de residuos. Otro caso de desecho de material en la construcción de carreteras, se presenta en las rehabilitaciones de superficie o de las capas del pavimento; en estos casos, el material se retira y se vierte en lugares lejos de los sitios de mantenimiento o remodelación. Algo similar ocurre cuando el extendido de cemento asfáltico en la superficie del pavimento no cumple con los requerimientos específicos (vertido de temperatura, etc.) y tiene que ser retirado y dispuesto en lugares fuera del sitio de construcción.

A lo anterior se puede sumar que, la producción de cemento para los pavimentos de concreto, implica una gran generación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (CO_2) y una alta producción de residuos peligrosos (RP). Es sabido que la reincorporación de materiales que ya involucraron un proceso de transformación a un proceso productivo, ya sea el mismo que lo generó como subproducto o a otro proceso distinto, baja los consumos energéticos para la transformación de éste en un producto útil (Ortiz-Ripoll, 2005). La incuestionable importancia que la red carretera representa para el desarrollo y comunicación del país, alienta y reta a la reducción y reincorporación de los materiales considerados residuos y subproductos en la ingeniería de la construcción de carreteras, con el objetivo de disminuir la presión que se ejerce sobre los recursos naturales por la extracción, consumo y desperdicio de materiales utilizados en la producción de bienes y servicios del Sector Transporte.

Con base en lo previamente expuesto, el presente trabajo plantea la factibilidad de fortalecer el conocimiento científico y tecnológico en México para lograr la prevención y el manejo integral seguro y ambientalmente efectivo, económicamente viable y socialmente aceptable de los residuos y subproductos industriales. Esto último llevando a cabo un análisis de los residuos producidos por toda la industria, determinando cuáles podrían reciclarse y usarse en la construcción de carreteras. Este análisis abrirá la posibilidad de investigar el comportamiento físico y químico de estos nuevos materiales que conducirán a generar la legislación y políticas de uso apropiadas para México en cuanto al uso de residuos.

Considerar todos los impactos ambientales e integrarlos al proceso de construcción, mantenimiento y operación de los proyectos carreteros ayuda a

visualizar medidas de mitigación en los mismos que, analizándolos en un proceso aislado, pueden llegar a omitirse. El análisis de los proyectos que actualmente se desarrollan a nivel mundial, empleando herramientas informáticas para las evaluaciones ambientales, está ayudando a generar bases de datos y a ajustar la metodología a ser más precisas en el manejo de residuos y sub-productos industriales en donde son generados y, así, poder tener la información en un primer plano necesaria para los objetivos que se plantean. Existe aún un gran campo de mejora para dichas herramientas; sin embargo, lo generado a la fecha representa un gran avance en materia ambiental y el marco jurídico.

Muy particularmente, en el caso de asfaltos reciclados (RAP) es factible técnica y económicamente el uso de material RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) en la fabricación de nuevas mezclas asfálticas para pavimentos flexibles y así reducir el uso de materiales en trabajos de mantenimiento y rehabilitación de caminos.

Existe también la factibilidad técnica de hacer uso de material proveniente de la demolición de la construcción dado que los datos para su evaluación de desempeño estructural en el uso de material RAP, para evita el uso de material virgen y la sobreexplotación de reservas naturales, da como resultado que mitiga el manejo y acomodo los desechos productos de fresado y demolición de mezclas asfálticas.

6 Conclusiones

En México es técnica y económicamente factible utilizar productos y sub-productos industriales en la construcción de caminos, evitando el uso de material virgen y la sobreexplotación de las reservas naturales, la mitigación de gestión de residuos y el almacenamiento de residuos resultantes de sus mismas actividades de construcción o de otros procesos generadores.

Mayormente, estos materiales son utilizados como sustituyentes de otros materiales en carpetas (solo, mezclado o después de un tratamiento) y como material de relleno y la construcción de otras adyacentes (por ejemplo, muros de contención).

Los materiales con el mayor potencial para ser utilizado en la infraestructura de transporte en México, de manera más extensa, son subproductos de demolición y construcción industrial, reciclaje de concreto y pavimento, por lo que se puede decir que ya tienen una base en aplicaciones experimentales. También se podrían utilizar neumáticos, con éxito considerable, como componente en concreto y asfalto bituminoso. Fundición de escoria y residuos procedentes de la producción de acero, algunas cenizas, lodos, plásticos y celulosa tienen una perspectiva mucho menos para ser utilizado.

El pavimento asfáltico recuperado (RAP) se utiliza en mantenimiento de carreteras como parte de las políticas ambientales y para mejorar rendimiento en carretera. Obteniéndose beneficios no solo en el manejo y gestión adecuada del material recuperado, sino también es las emisiones de carbono que el empleo de este material RAP genera y evita los residuos que van a los rellenos sanitarios y vertederos. Las mezclas con alto contenido de RAP (70 % y por encima) podrían, seguro, disminuir cerca de hasta el 14% de las emisiones de carbono en comparación con una mezcla sin ningún RAP.

Además, las alternativas a la demolición y construcciones con subproductos se han buscado y evaluado para su uso en las construcciones de carreteras secundarias como terraplén o material sub-rasante bajo especificaciones de carreteras mexicanas.

Existen ya regulaciones y políticas que impulsan el desarrollo de nuevas técnicas y prácticas para los residuos y subproductos para incorporarlas en el proceso productivo y los proyectos de carreteras, como una solución para los problemas de gestión de residuos o para reducir los costes y el impacto ambiental; también hay una gran brecha entre lo que otros países están haciendo y lo que México está empezando a realizar en esta materia.

Una gran área de oportunidad para mejorar la práctica del país se está desarrollando con el diagnóstico, como el presente trabajo, para fomentar su

práctica en los proyectos de carreteras. Se trata del empleo de sub-productos de la construcción y de demolición, utilizando pruebas de caracterización geotécnica de los materiales, para predecir comportamientos estructurales.

Desde una perspectiva de ingeniería de pavimentos, los materiales recuperados deben ser utilizados de una manera tal que el rendimiento esperado del pavimento no se vea comprometido. Los residuos y subproductos, sin embargo, son materiales muy diferentes y también sus propiedades y, por lo tanto, también dónde pueden ser utilizados dentro de los pavimentos.

La experiencia y el conocimiento sobre el uso de estos materiales varían de un material a otro, así como de un lugar a otro (país, estado, región). Para recuperar estos materiales para su uso potencial, ingenieros, investigadores, generadores y reguladores deben estar al tanto de las propiedades de los materiales, la forma en que se pueden utilizar y cuáles limitaciones pueden ser asociadas con su uso.

Bibliografía

Agrela S., F.; Jiménez R., J. R.; López A., M.; Ayuso M., J.; Caballero R., Al. Caracterización y posibilidades de reutilización en obras de infraestructura de los RCD's sin selección en origen y procedentes de todas las tipologías de obra. (1995).

Alison Smith, Keith Brown, Steve Ogilvie, Katheryn Rushton y Judith Bates de AEA Technology. Environment. "Waste management options and climate change". Reporte final a la Dirección General de Ambiente de la Comisión Europea. (2010).

Anderson, M. y Murphy, T., 2004. Laboratory mix design using RAP: Determining aggregate properties. Asphalt Magazine. Pp. 22-25. (2004).

ASTM D1856-95a Standard Test Method for Recovery of Asphalt From Solution by Abson Method. PA 19428-2959, United States. (2003). ASTM website (www.astm.org).

ASTM D2172-05 Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures. PA 19428-2959, United States. (2003). ASTM website (www.astm.org).

Astrup et al., Astrup, A. J., et al. *"Life Cycle Assessment (LCA). A guide to approaches, experiences and information sources"*. European Environment Agency. Serie: Environmental issues series no. 6. Copenhagen, Dinamarca (1998).

CALTRANS. California Department of Transportation. Asphalt Rubber Usage Guide. (2006).

Catalán, H., y Sánchez, L. Prospectiva del consumo de energía y su impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El caso de México. Economía Informa. No. 360. (2009).

CEMEX. Cementos Mexicanos. Tecnología de la construcción: proyectos especiales. (2012).

Cortinas, C. Documento: Manejo Adecuado de Residuos Sólidos. (2010).

Díaz Derbez, O, Fonseca-Rodríguez, C., De la Mora, R. "Cemento Asfáltico Recuperado y Empleado en el Diseño de Mezclas Asfálticas Reciclados en Monterrey". Publicado y presentado en el Seminario Mexicano del Asfalto. AMAAC, San Luis Potosí, México. (2010).

Dirección General de Regulación Ambiental. Secretaria de Medio ambiente Distrito Federal. Plan de Manejo de Residuos Sólidos para trámites de Impacto Ambiental. (2007).

Directiva 75/442/CEE del consejo de 15 de julio relativa a los residuos (Directiva Marco de Residuos). ()

EAPA. Asociación Europea de Pavimentos Asfálticos. Best Available Techniques (BAT) for the production of asphalt paving mixes. Bruselas. (2007).

Federal Highway Administration. Recycled material in European highway environments. Uses, technologies, and policies. International Technology Exchange Program. (2000).

Federal Highway Administration. User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction. (1998).

Fonseca Rodríguez, C., y Villalobos-Dávila, R. "Evaluación del Cemento Asfáltico Recuperado de una mezcla Asfáltica para su Caracterización en RAP". Publicado y presentado en el Sexto Congreso Mexicano del Asfalto. AMAAC, Cancún, México. (2009).

http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/cd_compendio08/

http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/08_residuos/cap8_2.html

http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_2008/index_informe_2008.html

<http://enlinea.guadalajara.gob.mx/2encuentro/ponencias.html>

http://www.elecoloquista.com.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=32&Itemid=40

http://www.epa.gov/espanol/desechos_solidos_faq.htm

<http://www.semarnat.gob.mx/eventos/anteriores/experienciasresiduos/Paginas/ArticulosyResumenes.aspx>

<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/398/basurto.html>

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003. Última reforma publicada DOF (2007).

Lhamas C. G.; La construcción y los aspectos ambientales. <http://imcyc.com/revista/2000/nov2000/ambientales.htm>

NOM--083-SEMARNAT-2003 Norma Oficial Mexicana que contiene las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. (2003).

OECD. Strategic Waste Prevention. Reference Manual. ENV/EPOC/PPC (2000) 5/FINAL. (2000).

OMS, Organización Mundial de la Salud. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre Actualización mundial 2005. (2007).

Ortiz-Ripoll, J. Criterios para una valoración medioambiental de la sustitución del filler de recuperación de los áridos en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente. Revista Rutas. No. 107. (2005).

Pavement Recycling Executive Summary and Report, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-SA-95-060, Washington, DC. (1995).

Public Works Research Institute. Technical manual for the use of recycled materials generated by other industries in construction projects. (2005).

Publicación Técnica No. 351. Revisión del estado del arte sobre las metodologías para la evaluación de ecoeficiencia en procesos productivos del Sector Transporte. López Domínguez, M. G., Mendoza S., J. F. y Téllez G., R. (2011).

Publicación Técnica No.373. Algunas Acciones Implementadas en México por el Cambio Climático y su Perspectiva Futura. López Domínguez, M. G., Téllez Gutiérrez, R. (2013)

Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario Oficial de la Federación. (2006).

Rivera M., C. y Gutiérrez P., C. Análisis de impacto ambiental por la inadecuada disposición de residuos de la construcción y demolición en el Valle de México y propuestas de solución. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Vol. 1. Num. 4. (2008)

Schimmoller, V.E. "Recycled Materials in European Highway Environments: Uses, Technologies, and Policies" FHWA-PL-00-025, Office of International Programs, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA. (2000)

Secretaría de Energía (SENER), Programa sectorial de energía y Prospectiva de petrolíferos 2004-2013, México. (2008).

SEMARNAT 2008. Informe de la situación del Medio Ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, México. (2006).

Stripple, H. *Life Cycle Assessment of Road: A Pilot Study for Inventory Analysis*. Report IVL Swedish Environmental Research Institute. Second Revised Edition. Suecia (2001).

The European Asphalt Pavement Association (EAPA), "Industry Statement on the Recycling of Asphalt Mixes and Use of Waste of Asphalt Pavements", Committee on Health, Safety and Environment, Bruselas, Bélgica.(2005).

Torres Hernández, R. Javier. Programa Estatal ante el Cambio Climático. Problemática Presente en el Estado de Querétaro. Departamento de Protección Ambiental. SEDESU. Presentado en el 8avo Congreso de Educación Ambiental. (2011).



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>