

“UTILIZACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES EN LA OBRA VIAL, EXPERIENCIAS DEL LEMaC”

Ing. Gerardo Botasso
Director del LEMaC
Investigador Categoría B
Prof. UTN - Experto PNUD

Ing. Julián Rivera
Responsable Área
Estudios del Transporte

Téc. Enrique Fensel
Responsable Area
Medio Ambiente y Obras Civiles

RESUMEN

La falta de políticas de deposición final de residuos industriales en condiciones ambientales aptas seguidas en décadas anteriores hace que nos encontremos en la actualidad con una amplia diversidad de elementos para ser tratados e incorporados a la actividad vial.

Teniendo en cuenta la procedencia y características del residuo a utilizar, es que se fijan los destinos de los mismos, ya sea en subbases, bases o carpetas de rodamiento.

En el presente resumen se destacan algunos de los trabajos realizados por el LEMaC:

Factibilidad y ejecución en la utilización de barros contaminados y estabilizados, del proceso de oléfinas, en bases y subbases de pavimentos de hormigón.

El uso de mezclas asfálticas en frío para fijar un residuo contaminante (Arcillas Agotadas). El mismo se originó en el requerimiento de poder utilizar como parte de dichas mezclas una arcilla que era obtenida como elemento contaminante luego de su utilización como purificadora de productos derivados del petróleo. Se estudiaron las características de las muestras de estas arcillas contaminadas, por medio de análisis químicos y ensayos de lixiviación, realizándose mezclas asfálticas en frío adicionando las arcillas a fin de analizar la posibilidad de fijarlas en este medio.

Fijación de residuos contaminantes en asfaltos modificados. Trata sobre la utilización de un asfalto modificado con caucho y asfaltita en un microaglomerado discontinuo en caliente comparando la acción del mismo con la de un asfalto modificado con polímeros (SBS). Se destaca la importancia de la utilización del polvo de caucho del desecho de neumáticos, después de la separación del caucho de los neumáticos es molido finamente hasta un tamaño específico, se toma el polvo de caucho y se lo trata químicamente para mejorar sus características adherentes y entonces se lo combina con el grado de asfaltita.

Incorporación de Residuos Industriales en Mezclas Asfálticas. La incorporación de residuos industriales a mezclas asfálticas nace de la necesidad de dar un destino a la gran masa de barros producto de la destilación del petróleo. Los barros decantados en piletas recuperadoras tienen un gran número de contaminantes, en general, hidrocarburos. Estos barros resultantes, tratados con un equipo que permite la remoción de solventes orgánicos (en su mayoría hidrocarburos livianos que pasan a ser recuperados) por evaporación a través de un calentamiento indirecto de la muestra, pasan a ser alrededor de un 50% del peso original, son acumulados al aire libre sin tener un destino cierto. El presente trabajo consiste en la utilización de estos barros en una mezcla asfáltica en caliente.

LEMaC – Investigaciones Viales
Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La Plata
Calle 60 y 124 (1900) La Plata. Te/Fax: +54-221-4890413
e-mail: lemac@frlp.utn.edu.ar

TEMARIO

- **INTRODUCCIÓN A LA TEMÁTICA**
- **CONCEPTOS FUNDAMENTALES RELACIONADOS**
 - Los riesgos
 - La emisión
 - La reducción
- **ESTABILIZACIÓN Y SOLIDIFICACIÓN DE RESIDUOS TÓXICOS**
 - Mecanismos desarrollados en la estabilización
 - Materiales comúnmente utilizados en estabilizaciones
- **FORMAS DE CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA**
 - Ensayos de extracción y lixiviación
 - Ensayos químicos
 - Ensayos de propiedades físicas, técnicas y durabilidad
- **EXPERIENCIAS DEL LEMaC**
 - Barros contaminados
 - Arcillas agotadas
 - Caucho de molienda de neumáticos
 - Escoria de alto horno
 - Maderas
- **METODOLOGÍA GENERAL RECOMENDADA**
- **CONCLUSIONES**

INTRODUCCION A LA TEMATICA

Conceptualmente, en el LEMaC, entendemos al residuo como ***todo aquel objeto móvil sin empleo conocido y permanentemente descartado.***

A los residuos que se convierten en tóxicos en nuestro país la legislación los ha denominado peligrosos, con el propósito de alertar al habitante sobre los riesgos que conlleva convivir con estos. Son así residuos peligrosos ***aquellos residuos que ponen en riesgo en forma directa o indirecta la salud y/o el medioambiente.***

Analizando en Argentina el nivel de producción de residuos, se llega a la conclusión de que cada día se generan en más cantidad y que las prácticas de eliminación son inadecuadas, quedando por solucionar no sólo la producción actual de residuos, sino la inacción que en algunos ámbitos se ha registrado durante años.

CONCEPTOS FUNDAMENTALES RELACIONADOS

La falta de políticas medioambientales bien definidas en la Argentina, por lo menos hasta hace unos 15 años, llevó a la generación de áreas de depósitos de residuos peligrosos sin contar con las barreras necesarias. Este hecho nos llevo a tomar como primeros propósitos de nuestros trabajos:

- La recuperación de terrenos de depósito mediante extracción del residuo
- El tratamiento inmediato del residuo generado

Al trabajar con residuos se deben destacar tres características fundamentales asociadas al trato de los mismos, ellas son:

- Los riesgos
- La emisión
- La reducción

Los riesgos

Normalmente la sociedad no es consciente del alto potencial contaminante de los depósitos de residuos. Esto se debe fundamentalmente a dos razones importantes, la primera es la falta de conocimiento de su existencia y la segunda el desconocimiento en cuanto a las formas de propagación que el residuo posee. Por otro lado sí es consciente de la contaminación ambiental generada por vehículos, pesticidas, etc, de acción directa en valores medibles atmosféricos.

Las razones que determinan que un residuo sea o no peligroso son fundamentalmente las determinaciones de laboratorio en donde uno obtiene la composición de ese residuo y compara sus valores con listas de materiales no deseables que las reglamentaciones proteccionistas y leyes poseen. Haciendo una adecuada recopilación de antecedentes que dieron origen al residuo se puede orientar la búsqueda de componentes contaminantes.

En nuestro país se sigue el criterio establecido por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos para establecer la toxicidad de un residuo. Con algunas modificaciones la técnica propuesta es la de **LIXIVIACION**, para simular la migración de contaminantes en distintos medios. Se conoce como **test de toxicidad** sometiendo a una muestra a condiciones de molienda, temperatura y presión en una solución acuosa ácida. Al observar los elementos transferidos, si se superan ciertos

límites fijados, el residuo o muestra es considerado tóxico. Cualquier programa regulador serio tendrá clasificado de distintas formas los contaminantes, como puede ser por su origen o sus características químicas, o también según la velocidad de migración de las sustancias tóxicas. Se observarán reglamentaciones sobre el traslado y manipuleo de los residuos. De acuerdo al tratamiento que se asigne es muy posible que para ello tenga que ser trasladado desde el lugar de generación hasta el lugar de tratamiento. Cuando el residuo circula debe hacerlo bajo condiciones de seguridad especiales y de acuerdo a las normas de la jurisdicción a la que pertenece la vía de circulación sea carretera, ferrocarril, aérea, etc. Es por ello que se evitan problemas cuando se hace un tratamiento en el lugar de generación.

La emisión

La emisión de contaminantes al medio es inevitable. Esta se puede producir en cualquiera de los tres estados de la materia.

En la generalidad de los casos analizados en nuestro Centro se trató de residuos sólidos depositados en el terreno natural sin ningún tipo de protección. Este tipo de residuo se puede propagar en el terreno natural y las napas de aguas subyacentes. Los lixiviados de los residuos se pueden dar por precipitaciones, por flujo superficial de aguas o por ascensos de napas freáticas. De esta forma el agua es absorbida por el residuo sólido al igual que el terreno circundante, hasta que se agote la capacidad de absorción del terreno. Cuando el suelo y los residuos quedan saturados, el agua atraviesa dichas capas y realiza un proceso de reparto. La concentración del contaminante en el agua o en otro líquido derramado (con variaciones de pH), depende de la cantidad de material lixiviado del residuo, de la capacidad de traslado de su masa, de la proporción existente entre la profundidad de la columna de líquido y la drenabilidad del terreno, la solubilidad de la sustancia contaminante, tiempo de contacto, etc.

Los mecanismos de transporte se darán de acuerdo a la naturaleza del contaminante y al medio que lo lixivia. Entre otros se citan:

Mecánicos: soluciones, disoluciones, advección, estratificación por densidad flujos fracturados.

Químicos: Sorción, reacción de oxidación y reducción, precipitación, etc.

Procesos biológicos: Degradación, absorción biológica, etc.

Desde el punto de vista de la hidráulica de suelos se formarán circulaciones de acuerdo a redes de flujo de cada suelo.

La reducción

A los residuos para disminuir su acción contaminante se les puede aplicar algunas de las siguientes técnicas:

- Minimización o reducción
- Desviación
- Prevención
- Reciclaje o reutilización.

Estos criterios aplicados a una política de gestión sirven para establecer ordenes de prioridades en el tratamiento del residuo. Las técnicas utilizadas para la reducción en

general de un residuo podrán desarrollarse in situ al momento de ser generado, con tratamiento posterior en otro lugar o sumándolos como adición activa, o no, de un proceso.

La secuencia de trabajo en la reducción de un residuo puede ser la siguiente:

Reducción en origen ⇒ Reciclaje ⇒ Tratamiento ⇒ Eliminación completa

La información necesaria básica para comenzar la reducción y poder llegar a la eliminación puede llegar a ser la siguiente:

- Causas de producción del residuo
- Volumen de generación
- Características físicas
- Características químicas
- Existencia de algún método de reducción parcial
- Costos de los tratamientos

Las técnicas más usuales que en nuestro país se desarrollan para tratar un residuo contaminante son:

- Procesos físico-químicos: Incluyen stripping por aire, por vapor, adsorción por carbón, procesos por membranas, etc..
- Métodos biológicos: sistemas de tratamiento en lechadas, en fase sólida, biorrecuperación, etc.
- Estabilización y solidificación: encapsulamientos, inhibiciones en fases aglutinantes y dispersantes.

ESTABILIZACIÓN Y SOLIDIFICACIÓN DE RESIDUOS TÓXICOS

La estabilización involucra un proceso de **solidificación** y es el proceso que utiliza aditivos (reactivos) para reducir la naturaleza peligrosa de un residuo, transformando el residuo y sus constituyentes peligrosos en un bloque.

La solidificación es el proceso en el que se añade cantidad suficiente de material solidificante, incluidos sólidos, a los materiales peligrosos para originar una masa solidificada.

Ambos procesos actúan para:

- minimizar la velocidad de migración de los contaminantes al medio ambiente.
- reducir el nivel de toxicidad.
- mejorar el manejo y las características físicas del residuo.
- disminuir la superficie a través de la cual puede tener lugar la transferencia o pérdida de contaminantes.
- limitar la solubilidad de cualquier contaminante presente en el residuo.
- reducir la toxicidad de los contaminantes.
- aumentar la resistencia.
- disminuir la compresibilidad.
- disminuir la permeabilidad del residuo.

El potencial de pérdida de contaminantes de una masa estabilizada se determina generalmente mediante los ensayos de lixiviado. **La lixiviación** es el proceso por el cual los contaminantes se transfieren de una matriz estabilizada a un medio líquido como el agua.

Mecanismos desarrollados en la estabilización

Para lograr la estabilización se utilizan una o más de las siguientes técnicas:

- **Macroencapsulación:** es el mecanismo por el cual los constituyentes del residuo peligroso quedan atrapados físicamente en una matriz estructural de mayor tamaño, es decir, los constituyentes del residuo peligroso se retienen en los poros discontinuos del material estabilizante. Los contaminantes así estabilizados pueden aparecer en el medio ambiente si no se conserva la integridad de la masa, pues ésta puede descomponerse con el tiempo debido a las tensiones medioambientales: ciclos repetitivos de humectación y desecación o congelación y deshielo, penetración de fluidos de percolación y tensiones físicas de carga, quedando los compuestos atrapados libres para migrar.

El grado de macroencapsulación aumenta según el tipo y la energía por unidad de masa de la mezcla. Los estudios en laboratorio deben realizarse simulando las condiciones de mezcla en campo.

- **Microencapsulación:** en éste caso los constituyentes del residuo peligroso quedan atrapados en el interior de la estructura cristalina de la matriz solidificada a nivel microscópico, así si los materiales estabilizados se degradan a partículas de tamaño relativamente pequeño, la mayor parte del residuo peligroso permanece atrapado. Sin embargo al no estar el residuo alterado o ligado químicamente, la velocidad de liberación del contaminante de la masa estabilizada puede aumentar al disminuir el tamaño de partícula y quedar expuesta una superficie mayor.

Para los estudios de laboratorio sucede lo mismo que en el caso de la macroencapsulación.

- **Absorción:** es el proceso por el cual los contaminantes son tomados por el sorbente de manera similar a como una esponja toma el agua. La absorción precisa de un material sólido (absorbente) que empape o absorba los líquidos libres del residuo.

Este proceso se emplea principalmente para eliminar los líquidos libres de manera que se mejoren las características de manejo del residuo, es decir para solidificar el residuo.

Como los líquidos pueden escurrir del material al someter a la masa a tensiones de consolidación se utiliza la absorción como una medida temporal, para mejorar las características de manejo.

Los absorbentes más comunes son suelo y la cal.

- **Adsorción:** fenómeno por el cual los contaminantes quedan ligados (adsorbidos) de manera electroquímica a los agentes de estabilización de la matriz teniendo menor probabilidad de quedar libres en el medio ambiente. En este caso se necesita una fuerza físico-química adicional para resorber el material de la superficie de adsorción, por ello este tratamiento se considera más permanente.

- **Precipitación:** algunos procesos de estabilización precipitan los contaminantes del residuo dando lugar a una forma más estable de los constituyentes dentro del residuo. Los precipitados, tales como hidróxidos, sulfuros, silicatos, carbonatos y

fosfatos quedan así contenidos en la masa estabilizada como parte de la estructura del material.

En la evaluación de la eficacia de la estabilización deben considerarse adecuadamente las condiciones medioambientales presentes y futuras.

- **Detoxificación:** es cualquier mecanismo que modifica un constituyente químico en otro (u otra forma del mismo constituyente) no tóxico o menos tóxico.

Materiales comúnmente utilizados en estabilizaciones

El término **aglomerante** se utiliza para aquellos reactivos que aumentan la resistencia asociada a la estabilización. El término **sorbente** se utiliza para aquellos reactivos que principalmente retienen los contaminantes en la matriz estabilizada

En el mercado están disponibles una amplia gama de sorbentes y aglomerantes, incluidos algunos reactivos patentados. Por lo tanto se describirán aquellos no patentados:

- **Cemento:** se mezcla con el residuo y en caso de que el residuo no tenga agua suficiente se añade agua para su hidratación. Esta hidratación origina una estructura cristalina, de aluminosilicato cálcico, formando una masa dura, monolítica de aspecto rocoso.

Este tipo de estabilización se adapta mejor a residuos inorgánicos, fundamentalmente los que contienen metales pesados. Como resultado del elevado pH del cemento, los metales son retenidos como hidróxidos insolubles o carbonatos en la estructura endurecida.

Los estudios demuestran que el plomo, cobre, zinc, estaño y cadmio probablemente se unen a la matriz por fijación química, formando compuestos insolubles, mientras que el mercurio es retenido de manera predominante por microencapsulación física.

Los contaminantes orgánicos interfieren el proceso de hidratación y no son fáciles de estabilizar, para mejorar esto se pueden incorporar junto con el cemento otros aditivos como arcillas modificadas orgánicamente o naturales, vermiculita y silicatos de sodio solubles. Además los contaminantes orgánicos reducen la resistencia final y la formación de la estructura cristalina originando un material más amorfo.

Ventajas de la estabilización con cemento: su tecnología, manejo, mezcla, fraguado y endurecimiento son bien conocidas. Costo, equipo y personal accesibles. La estabilización con cemento puede llevarse a cabo con el agua suficiente para que el material sea bombeable. El sistema tiene capacidad para admitir variaciones en la composición química del residuo.

Desventaja: la sensibilidad del cemento a la presencia de ciertos contaminantes que pueden retardar o inhibir la hidratación adecuada, el fraguado y endurecimiento del material.

También se utilizan cementos con adiciones, tal es el caso de los cementos puzolánicos.

- **Cal:** se utiliza para la estabilización de lodos, la que al reaccionar con los materiales presentes en el residuo puede dar lugar a silicato cálcico, alúmina cálcica o aluminosilicato cálcico hidratados, materiales que se forman a partir de la reacción del calcio de la cal y los aluminosilicatos del residuo. Puede realizarse una estabilización adicional con el uso de otros ingredientes en menor cantidad. Se

recomienda para contaminantes inorgánicos y lodos metálicos. También se utilizan cales modificadas, silicatos solubles, etc.

- **Polímeros orgánicos termoestables y termoplásticos:** se mezcla un monómero, como la urea folmaldehído que actúa como catalizador, para formar un material polímero, formándose una masa tipo esponja que retiene en la matriz partículas sólidas del residuo peligroso (macroencapsulación). Este proceso deja, sin embargo, algunos residuos sin retener, en especial residuos líquidos, por lo que el producto del residuo final debe dejarse secar y conservar en contenedores.

Ventajas: el material obtenido es de baja densidad, se requieren pequeñas cantidades de aditivos para solidificar los residuos, por lo que esta técnica tiene mayor aplicación de residuos orgánicos, no volátiles, líquidos. Utilizándose también para solidificar residuos de baja radioactividad antes de su eliminación definitiva.

Desventajas: no son aplicables a la recuperación de terrenos debido a su coste, peligro de incendio, producción de agua a partir de la matriz del residuo y volatilización de compuestos orgánicos.

Los materiales termoplásticos se combinan con asfalto, parafina, betún, polietileno, polipropileno y azufre, fundidos con los residuos a altas temperaturas.

- **Vitrificación:** se obtiene un residuo estructuralmente más estable con un potencial de migración de contaminantes al medio reducido. Puede ser desarrollada in situ o en planta.

FORMAS DE CARACTERIZACION TECNOLÓGICA

La evaluación de la eficacia de la estabilización necesita valorar las propiedades físicas, técnicas y químicas del material estabilizado, para ello se utilizan una gran cantidad de ensayos de laboratorio entre los que citamos:

- **Ensayos de extracción y lixiviación** (estos términos se usan indistintamente): proceso por el que los contaminantes son transferidos de una matriz sólida o estabilizada al lixivante.

El fluido al cual son lixiviados los contaminantes se denomina **lixivante**, luego de que éste se haya contaminado se denomina **lixiviado**. La capacidad de un material estabilizado para lixiviar contaminantes se denomina **lixiviabilidad**.

Al circular el lixivante, los contaminantes de la muestra pasan de la masa estabilizada al lixivante pudiendo disolverse en el lixivante, ser lavados de la superficie del material estabilizado o difundirse desde la masa estabilizada al lixivante, por lo que la lixivabilidad depende de las propiedades físicas y químicas, tanto del material estabilizado como del lixivante. Los principales factores que afectan este fenómeno son la alcalinidad del producto estabilizado, la relación superficie-volumen del residuo y la tortuosidad, la medida de la longitud del camino para la difusión.

El método de ensayo afecta a la lixivabilidad de la muestra a través de las siguientes **variables:**

- Relación lixivante residuo
- Superficie del residuo (por ejemplo triturar la masa estabilizada a pequeñas partículas)

- Tipo de lixiviante (por ejemplo agua destilada, ácido acético, lluvia ácida simulada)
- pH del lixiviante
- Tiempo de contacto
- Tiempo de agitación
- Número de reposiciones con lixiviante nuevo
- Recipiente de extracción
- Temperatura

Ensayo de toxicidad, procedimiento de extracción (EP): se utiliza para generar un extracto líquido a partir de residuos sólidos. Un residuo se considera EP tóxico si su extracto presenta alguno de los ocho metales legislados y seis pesticidas en concentraciones superiores al nivel umbral especificado en la normativa federal.

Aquí el bloque monolítico solidificado se tritura para que atraviese un tamiz de 9,5 mm. Se utiliza una solución de lixiviación de ácido acético 0,004M (pH = 5) en una relación líquido-sólido de 16:1. La extracción se realiza durante 24h con agitación, luego se realizan análisis químicos del extracto filtrado para determinar la concentración de los constituyentes orgánicos e inorgánicos contaminantes. Este ensayo se utiliza para clasificar los materiales como peligrosos o no peligrosos, no como un ensayo de diseño.

Características de toxicidad, procedimiento de lixiviación (TCLP): se debe triturar el material estabilizado hasta obtener partículas menores a 9,5mm, y luego se lo debe mezclar con el líquido de extracción de ácido acético débil, con una relación en peso líquido-sólido de 20:1, y se agita en extractor rotativo durante 18h a 30rpm y 22 °C. Después de ello se filtra la muestra través de un filtro de fibra de vidrio de 0,6-0,8 micras y se denomina al filtrado como extracto TCLP, el que se analiza en busca de una amplia variedad de constituyentes de residuos peligrosos, entre ellos compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, metales y plaguicidas. Este ensayo se adoptó en sustitución del ensayo EP para determinar si un residuo cumple con los estándares de tratamiento tecnológicos para ser eliminado en el terreno, también se utiliza para evaluar la eficacia de la estabilización.

Para detectar la presencia de compuestos orgánicos volátiles en el extracto se utilizan procedimientos especiales: un recipiente de extracción con cabezal de vacío, un contenedor cilíndrico con cierre hermético en cada extremo.

Hay que tener en cuenta que con los ensayos EP y TCLP se obtienen concentraciones para componentes específicos, estos datos se comparan a veces con 100 veces los estándares del agua potable para determinar si la muestra supera o suspende el TCLP. El factor 100 es para considerar la dilución en el medio.

- **Ensayos químicos:** El tipo de análisis y el procedimiento analítico a menudo se especifican en el procedimiento de lixiviación citando los Métodos Estándar (Standard Methods) o los protocolos de la EPA Estados Unidos. Estos ensayos se

reducen al análisis del fluido extractado o a la identificación de los contaminantes en el residuo.

Los distintos métodos de ensayos químicos son:

- Análisis de residuo total
- Metales por espectrometría de plasma acoplado inductivamente o absorción atómica
- Compuestos orgánicos por cromatografía de gases (CG) y espectrometría de masas (MS)
- Carbono orgánico total
- Pérdida al fuego
- pH
- Transformación de Fourier del espectro de infrarrojos (FTIR)
- Calorimetría de exploración diferencial y análisis gravimétrico térmico

- Ensayos de propiedades físicas, técnicas y durabilidad:

De propiedades físicas:

Contenido en humedad: *determina la cantidad de agua o líquido presente en una cantidad dada de material. Se determina el peso húmedo de una muestra pequeña, de pocos gramos, se deja secar por 24h a 105 °C y se pesa nuevamente. Luego se obtiene el contenido de humedad en porcentaje dividiendo el peso de agua por el peso de la masa seca.*

Densidad másica seca y húmeda (peso unitario): *el peso unitario másico se determina midiendo y pesando las muestras estabilizadas. Se calcula como el peso de sólidos más el fluido de los poros por unidad de volumen de material. El peso unitario seco se determina a partir del peso de sólidos tras secado en horno por unidad de volumen, las unidades son: gr/cm^3 .*

Peso específico: *mide la relación masa-volumen del componente sólido individual del material de tres fases, y es la densidad de sólidos dividida por la densidad del agua. El método para determinarlo es de difícil ejecución y generalmente no puede aplicarse a un material solidificado que contenga distintos materiales, cada uno de ellos con un peso específico distinto.*

Límites de Atterberg: *miden el índice de plasticidad de los suelos.*

Granulometría: *es importante para el diseño de alternativas de estabilización. Se utilizan tamices para la fracción gruesa. Para la fracción fina (partículas entre 0,0074 mm a micras) se usan métodos gravitacionales que emplean hidrómetros (las partículas mayores se depositan más rápido en el agua y el hidrómetro permite medir las diferencias de tamaño). No se aplica al material estabilizado pues éste generalmente es un monolito.*

Índice de cono en laboratorio: *se realiza sobre el material estabilizado inmediatamente después de la mezcla de los reactivos y antes del fraguado. Habla sobre la resistencia de los materiales en la mezcla e interviene en la toma de decisiones acerca del manejo de los materiales y la capacidad para resistir el tránsito durante la construcción. Se deja caer un cono desde una altura (ambos estandarizados) sobre el material y se mide la distancia de penetración.*

Penetrómetro de campo: *permite valorar las propiedades de la mezcla del lodo estabilizado antes de su curación. Es un cilindro estandarizado que se empuja*

sobre el material para medir su resistencia a la penetración, obteniendo la resistencia a la compresión libre en kg/cm^2 . Se puede realizar en campo.

Examen de microestructura: mediante: difracción de rayos x y microscopía: óptica electrónica y dispersiva. Se utiliza para conocer mejor la naturaleza de los procesos de estabilización.

Formación de sobrenadante durante curación y velocidad de fraguado: caracterizan el comportamiento de los residuos tratados en las primeras horas tras la mezcla. Se utilizan preferentemente para materiales tipo hormigón y no se adaptan a materiales tipo suelo. Informan sobre la aceptabilidad de la mezcla. Se coloca una muestra recién mezclada en un vaso graduado de un litro de capacidad, y al sedimentar los sólidos y el sobrenadante quedar flotando, se pueden medir las cantidades de cada uno de ellos. El tiempo de fraguado puede medirse con una aguja Vicat: midiendo la penetración a diferentes tiempos.

De propiedades técnicas:

Ensayo de resistencia a compresión libre: determina la resistencia de los materiales cohesivos, los comprendidos entre las arcillas ligeras y el hormigón. Un cilindro de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura se carga axialmente, midiendo esta carga y su deformación, pudiendo calcularse así la tensión aplicada y la deformación resultante.

Consolidación: evalúa el asentamiento del residuo estabilizado. Se aplica una carga axial y se impide la deformación lateral, midiendo los tiempos de deformación para cada carga aplicada. Se realiza el diagrama de consolidación.

Conductividad hidráulica: a veces se la denomina permeabilidad. Se utiliza para obtener información sobre la velocidad a la que los compuestos químicos presentes en el residuo tratado migran al medio. Se utiliza el ensayo de permeabilidad triaxial, la muestra se encapsula en una membrana flexible que permite que la muestra se contraiga o expanda bajo las tensiones aplicadas en confinamiento.

De propiedades de durabilidad: Estos ensayos evalúan el rendimiento de la masa estabilizada a largo plazo, para resistir ciclos repetitivos de erosión.

Durabilidad Húmedo-seco (ASTM D4843): son doce ciclos de humectación-deseccación, de cinco horas bajo el agua y 24 h en horno bajo condiciones de secado a baja temperatura ($71\text{ }^\circ\text{C}$), cada uno. Evaluando luego la variación de volumen, contenido de humedad y pérdida de peso. Después de los doce ciclos se determina la pérdida total de peso de la muestra, o bien se determina el número de ciclos que provocan la disgregación si la muestra no permanece intacta al completarse los doce ciclos.

Durabilidad Hielo-deshielo (ASTM D4842): condiciones de erosión de congelación y deshielo. Las muestras se someten a doce ciclos, cada uno consta de un período de congelación de 24 h a $-20\text{ }^\circ\text{C}$ y otro de deshielo de 24 h en agua. El rendimiento se evalúa igual que en el ensayo anterior.

EXPERIENCIAS DEL LEMaC

Barros contaminados

Los barros contaminados son residuos con metales pesados y con presencia de hidrocarburos. En algunos casos tratados biológicamente inmediatamente después de retirados de la planta con adición de cal y expuesto por capas a la acción de los agentes atmosféricos, presión, temperatura y humedad.

Aparecen como principales metales el Cobalto, el Níquel y el Plomo, desde el punto de vista de la concentración, e hidrocarburos. Proviene de distintos procesos de plantas de la Industria Petroquímica.

Las técnicas utilizadas para la reducción del residuo se desarrollaron in situ al momento de ser generado, de tal forma que el residuo que utilizamos ha pasado por un proceso de reducción de su acción contaminante por medio de acciones biológicas y químicas.

La técnica utilizada por el LEMaC incluye distintos procesos, entre los cuales podemos encontrar el de *estabilización y solidificación* (encapsulamientos, inhibiciones en fases aglutinantes y dispersantes, macroencapsulación, absorción, detoxificación).

Se han trabajado en tres casos con barros contaminados procedentes de distintos procesos. Las zonas del Gran La Plata, Neuquén y Mendoza presentan importantes polos petroquímicos o áreas de explotación petrolera, las cuales generan gran cantidad de barros en forma directa o por rebalce.

En general el Cemento Pórtland Normal, la cal hidráulica hidratada y el suelo seleccionado tipo A-4 o de menor calidad, son adecuados materiales para desarrollar los procesos de detoxificación, sorción y macro y microencapsulación.

En función del contenido de hidrocarburos será el rendimiento del cemento, por lo cual a importantes concentraciones conviene tratar primeramente con cal.

La cal siempre es conveniente incorporarla en dos etapas, a efectos de aprovechar su poder de secado y de corrección de plasticidad.

El cemento permite desarrollar macroencapsulaciones, lo cual trae aparejado combinaciones de los metales pesados con él. El suelo utilizado muchas veces es del grupo A-5 y A-6, pudiendo elevar su capacidad dado los contenidos de cal utilizados.

La importancia de los tiempos de curado y la no sollicitación temprana son fundamentales en el desarrollo de los parámetros resistentes y de la estructura de solidificación.

Arcillas agotadas

Este trabajo se originó en el requerimiento de poder utilizar como parte de mezclas asfálticas de granulometría continua con emulsiones sin modificar y modificadas con polímeros, una arcilla proveniente como elemento contaminante luego de su utilización como purificadora de productos derivados del petróleo (lechos percoladores).

Las arcillas activadas son usadas con mucha frecuencia en procesos de purificación, catálisis de condensación, deshidratación y/o en reacciones de isomerización.

De manera particular las arcillas activadas con tratamientos ácidos y de forma granulada, para aprovechar su capacidad de absorción, se usan en los procesos de purificación de algunos combustibles como kerosene, combustibles de turbinas de jet y otros derivados del petróleo.

Estas arcillas activadas, cuya base son las montmorillonitas de calcio y o sodio por ser las que mas fácilmente pueden ser activas en medio ácido, tienen puesta en servicio una vida útil limitada que es función de la contaminación de los productos tratados, se agotan absorbiendo gran cantidad de hidrocarburos.

Una vez agotadas, éstas se constituyen en un residuo contaminante, que es necesario eliminar o fijar a fin de contribuir al mantenimiento ecológico del medio en que se generan.

En el laboratorio se estudiaron las características de muestras de estas arcillas contaminadas por medio de análisis químicos y ensayos de lixiviación; realizándose mezclas asfálticas en frío adicionando las arcillas a fin de analizar la posibilidad de fijarlas en este medio.

Para desarrollar el trabajo se partió de dos premisas principales: tratar de utilizar el residuo tal cual se lo obtenía y evitar generar un costo adicional en su proceso para fijarlo; pudiendo esta última ser considerada como variable a fin de producir una fijación segura de la arcilla agotada.

Como primer paso se caracterizó la arcilla agotada desde un punto de vista físico para poder prever su comportamiento en el medio de fijación; además se realizó un ensayo de lixiviación de los componentes contaminantes presentes en el material.

Conocido el material y ante los límites que ponían sus características se realizaron algunas experiencias en distintos medios de fijación como: mezclas asfálticas y mezclas en hormigones de cemento portland.

En alguna de ellas se modificó las características originales del material (reducción del contenido de humedad).

Los resultados obtenidos indicaron que el medio en que se debía continuar con los ensayos era una mezcla asfáltica en frío; pues no solo favorecía en el tratamiento del material sino que además resultaba un excelente medio de aislamiento para evitar o disminuir la lixiviación de los contaminantes. Las mezclas en frío son de gran importancia para evitar la formación de familias de hidrocarburos y eliminar los riesgos de operación que se puedan generar en una usina asfáltica en caliente.

El asfalto resulta así el agente aglutinante, que posee una gran compatibilidad con residuos hidrocarbonados. Es conveniente la utilización de mezclas cerradas a efectos de poder garantizar una adecuada estanqueidad.

Se optó por una mezcla asfáltica semidensa, clasificada por la reglamentación española como SF25 (SF: semidensa y 25: tamaño máximo del agregado en mm), con emulsión catiónica superestable.

Caucho de molienda de neumáticos

En este caso se trata sobre la utilización de un asfalto modificado con caucho y asfaltita, utilizado en un microaglomerado discontinuo en caliente, comparando su acción en el mismo con la de un asfalto modificado con SBS, reduciendo a su vez un importante contaminante.

Los agentes modificadores utilizados en los asfaltos, modifican el comportamiento reológico de los mismos. Se puede decir que un asfalto modificado es un ligante

hidrocarbonado resultante de la interacción física y/o química de los polímeros con un betún asfáltico.

Un asfalto puede modificarse con rellenos minerales, cauchos, plásticos o hidrocarburos naturales.

Para esta aplicación, los neumáticos son pulverizados o triturados en polvos de caucho y añadidos directamente al asfalto caliente. La creencia común es que los polvos de caucho serían un aditivo útil para el asfalto, aumentando la elasticidad del asfalto y reduciendo sus problemas de rutina. Sin embargo, los polvos de caucho han sido difíciles de usar pues son altamente inestables en el asfalto. Hay también otros problemas, tales como la variabilidad de ambos, el caucho y el asfalto, haciendo la realización del pavimento poco fiable. Adicionalmente los polvos de caucho modificadores de asfalto no son 100% reciclables.

La asfaltita es un asfalto natural de consistencia sólida. En nuestro país hay un yacimiento de este tipo. Es muy rica en asfaltenos.

La combinación de asfaltita y polvo de caucho en un solo producto, es comercializada por empresas nacionales e internacionales. El proceso de fabricación de polvo de caucho incluye separar el neumático en sus componentes: caucho, acero y tejido. Después de la separación el caucho es molido más finamente hasta un tamaño específico. Se toma el polvo de caucho y se lo trata químicamente para mejorar sus características adherentes, y entonces se lo combina con el grado de asfaltita.

El producto asfaltiflex que se utilizó como modificador en este trabajo es una mezcla de un 32% de Asfaltita y 68% de Caucho.

Con el propósito de poder observar la acción real que ejerce el Caucho al ser incorporado el asfalto se decide la ejecución de una serie de ensayos sobre asfaltos aditivados con 6 y 10 % de asfaltiflex y otros aditivados con 1,92 y 3,2 % de Asfaltita, que son los contenidos de este producto en las aditivaciones realizadas de Asfaltiflex en los porcentajes ya mencionados.

Con el propósito de poder estudiar el comportamiento de estos asfaltos se decide utilizarlos en la dosificación de un microaglomerado discontinuo en caliente.

Las especificaciones no hacen referencia a asfaltos modificados con mezcla de caucho y asfaltita. Vemos que estos no encuadran fácilmente en ninguna de las clasificaciones de la normativa europea sobre asfaltos modificados con polímeros. A los efectos de poder realizar el estudio del comportamiento de estos se decide elegir al asfalto modificado con un 6% de Asfaltiflex por ser el que más se aproximaría a la categoría BM3 y el aditivado con el 10% para ver la influencia del cambio de concentración de este, en mezcla del tipo microaglomerado discontinuo.

Escoria de Alto Horno

Siendo las escorias siderúrgicas productos resultantes de procesos de obtención del arrabio y el acero es que son consideradas una materia prima no natural de bajo costo. Las escorias se forman por la fusión de las impurezas del mineral de hierro junto con la adición de fundentes de caliza y dolomita y las cenizas de coque. El proceso lento de enfriamiento de la Escoria Enfriada al Aire hace que sus componentes vayan formando distintas fases cristalinas y alveolares constituyendo una estructura termodinámica más estable pero perdiendo sus propiedades de aglomerante hidráulico. Se distribuye en capas no mayores de 15 cm de espesor,

luego de enfriada se retira y se tritura hasta el tamaño buscado. En el uso de este tipo de materiales es aconsejable mantener un acopio en un tiempo prudencial mayor a los ocho meses, para asegurar la finalización de cualquier tipo de proceso que haya quedado inconcluso, por otro lado es importante conocer químicamente los porcentajes de los elementos constitutivos con el fin de encuadrarse dentro de las normas.

Para su inclusión en hormigones de escoria enfriada al aire es importante determinar el tenor de agua a incorporar para llevar la escoria al estado de saturado superficie seca dado que la misma se encuentra en un estado natural de humedad.

Unos de los aspectos a tener en cuenta en la escoria es controlar el contenido de sulfuro de hierro dado que con una excesiva presencia de este y en determinadas condiciones puede convertirse en sulfato y atacar al hormigón y afectar a la durabilidad, a su vez puede presentar una coloración no adecuada.

Maderas

Este trabajo trata sobre el aprovechamiento en la obra vial de lodos provenientes de plantas de tratamiento primario de efluentes provenientes de maderas de pino y eucalipto. Este residuo se genera a partir de uno de los procesos de la madera que es sometida a un precalentamiento a 90 °C y una extrucción en un tornillo cónico, los efluentes que se generan de la extrucción son entonces compuestos por resinas naturales de la madera, agua y fibras de la madera que atraviesan la salida. Estos efluentes se utilizan luego para lavar la madera de ingreso al proceso, por lo que en el camino arrastran otros elementos contaminantes como arenas, piedras pequeñas, etc.

Los efluentes son tratados con Sulfato de Aluminio y cal, a un pH entre 9 y 10. Los flocs generados son bombeados a un filtro prensa y de cuyos barros son los que trata el presente trabajo, las aguas filtradas son tratadas en un tratamiento biológico. Se utiliza como agente estabilizante la cal incorporada y una matriz cementante que permita reducir la compresibilidad de la materia orgánica.

METODOLOGÍA GENERAL RECOMENDADA

Se refleja en un procedimiento general, la forma de caracterizar, su factibilidad y uso de los residuos teniendo en cuenta los parámetros viales y ambientales y la aplicación para cada caso particular la procedencia y características del mismo.

- Caracterización del residuo y de los materiales.

Se detallan los distintos ensayos a realizar para la caracterización de los tipos de residuos y los materiales intervinientes

FÍSICAS	QUÍMICAS
L.L. (Límite Líquido) L.P. (Límite Plástico) I.P. (Índice de Plasticidad) P.T.# 200 Clasificación HRB Densidad Seca Máxima Humedad óptima Valor Soporte Relativo Hinchamiento Absorción Absorción por capilaridad Viscosidad PUV Resistencia inconfiada Durabilidad por ciclos de humedecimiento y secado Granulometría Pérdida de peso Peso específico aparente Desgaste Los Angeles Índice de Lajas Part. Con dos o más caras de fractura Coef. De pulido acelerado Equivalente arena Residuo por evaporación Viscosidad Saybolt Furol Residuo s/tamiz 0,850 mm Penetración Oliensis Densidad aparente Marshall Estabilidad Marshall Fluencia Relación estabilidad fluencia Densidad Rice Vacíos	Lixiviado método TCLP(EPA 1311) <ul style="list-style-type: none"> • Cobre • Plomo • Cinc • Cromo • Cadmio • Cobalto • Plata • Níquel Hidrocarburos Totales (%) Grasas + Aceites + Hidrocarburos (%) Determinación de Conductividad Determinación de pH Capacidad de Intercambio (HO) ₂ Ca Cal Útil Vial Caracterización química del Cemento Caracterización química del asfalto Caracterización química de la cal Residuo seco total Extraíbles con éter Ácidos grasos Ácido abiético Ácido dihidro abiético Ácidos resínicos DQO DBO Sólidos en suspensión

- Dosificación de las mezclas

Mediante técnicas de pastones de prueba se realizan distintas dosificaciones. Normalmente se decide realizar distintas variantes de mezclas de forma tal de obtener diferentes mezclas para lograr el mayor número de capas posibles en el paquete estructural, o el mayor contenido de residuo en las distintas capas componentes del paquete estructural, teniendo en cuenta las limitaciones lógicas

impuestas por los parámetros viales y ambientales. Dependiendo del tipo de estabilización se siguen los parámetros habitualmente recomendados para cada caso en el área vial.

En el caso de mezclas con suelo el porcentaje interviniente se determina con respecto al componente seco. El porcentaje de cemento y cal es sobre el total de la mezcla de suelo seleccionado/residuo en estado seco.

La elección de los porcentajes de residuo y suelo, radica en la utilización de la mayor cantidad posible de residuo que mezclado con suelo nos permita una mezcla trabajable en obra, asociada a ésta un porcentaje de cemento que nos garantice resistencia aceptable a la edad de 7 días, a la vez de encapsular al residuo y garantizar durabilidad.

Las mezclas se pueden estabilizar por la aplicación de una cierta energía de compactación. Esta energía, normalizada en la obra vial, la expresa el ensayo proctor standart, con un valor aproximado de 6 kg.cm/cm^3 . Recordemos que en la caracterización del residuo tenemos los valores de P.U.V. y el peso específico, que son orientadores en las dosificaciones. A su vez, variando el contenido de humedad, logramos variar la compactación, para esa misma energía.

En los suelos estabilizados con cemento será necesario verificar las características del suelo para cuantificar la acción cementante del cemento portland normal utilizado. En la estabilización con asfalto la impermeabilidad y el módulo serán factores fundamentales.

Por todo lo expuesto se recomienda seleccionar técnicas de dosificación que consideren:

- Resistencia
- Relación de modular resiliente
- Parámetros estructurales (coeficientes)
- Comportamiento a fatiga

- Paquetes Estructurales

En el diseño de los paquetes estructurales es fundamental conservar los criterios de:

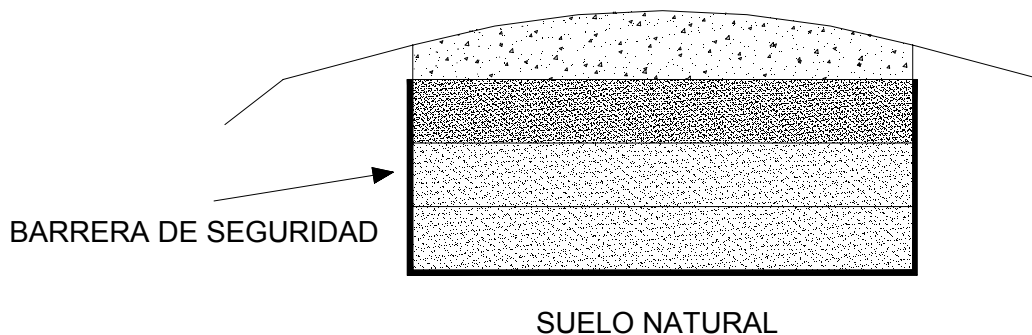
- Drenaje del paquete estructural
- Relaciones modulares

Se utiliza el software del método AASTHO con niveles de confiabilidades altos (95%). A efectos de garantizar espesores y tensiones adecuados se han realizado :

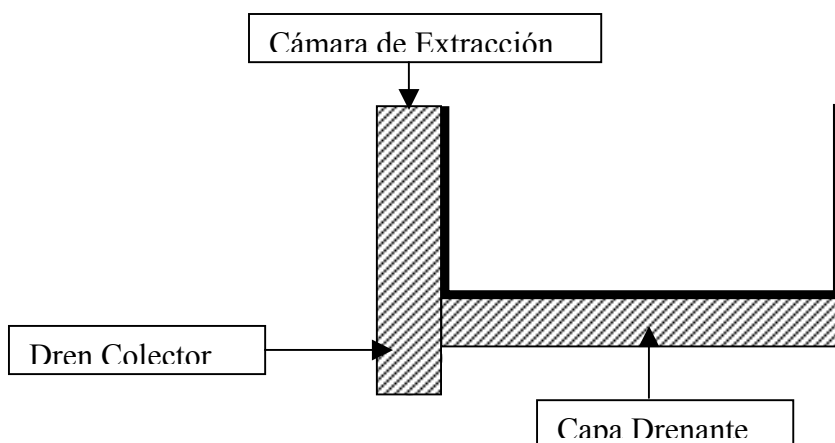
Subbases y bases con cementos y asfaltos

- Hormigones
- Capas de rodadura de hormigón y mezclas asfálticas

En general los bajos valores de los lixiviados han permitido realizar sólo sellos asfálticos con el objeto de actuar como barrera impermeable.



También se plantean en los tramos ejecutados bases tipo dren y drenes colectores a efectos de obtener el agua filtrante y los correspondientes lixiviados.



- Técnicas Constructivas

Los procesos constructivos habituales en la obra vial deben ser considerados a la hora de pensar en su inclusión en la misma, por lo que el residuo debe ser trabajable con motoniveladora, pulvimixer, rotomixer, reclamadora, etc.

En todos los casos debe tenerse en cuenta el depósito del residuo al costado de la vía a ejecutar, como la protección o lavado inmediato de los equipos luego de cada intervención de los mismos. Las técnicas e instrumental de protección del personal es un factor muy importante atendiendo a las recomendaciones toxicológicas. El LEMaC ha desarrollado un trabajo sobre la protección contra ruidos y contaminantes del personal, asociado a estas prácticas. Es importante tener en cuenta los factores climáticos y evitar los días de trabajo en que se desarrollen vientos y se aproximen lluvias, dado que estos agentes climáticos pueden contaminar el entorno de la obra. Es conveniente contar con films de polietileno adecuados a efectos de proteger la zona de trabajo.

- Monitoreo

Se deberá prever, junto con los organismos de política ambiental correspondientes, un plan de jornadas de monitoreo en las distintas instancias de las estabilizaciones, sean éstas en obra o en planta. Los valores de obra deberán ser cotejados con los de referencia obtenidos en Laboratorio y se deberá contar con Especificaciones Ambientales que respondan a las leyes y normativas vigentes en el país.

- Ecuación Técnicoeconómica

Hay distintos tratamientos de un residuo con el objeto de reducirlos como por ejemplo la incineración, vitrificación, biodegradación, etc. la alternativa de incorporarlo a una obra vial tiene un buen posicionamiento frente a los demás tratamientos. Esto lleva a analizar si el residuo:

- Deteriora las propiedades viales de las mezclas
- No tiene efectos de cambio (inertes)
- Ejerce una acción favorable sobre la mezcla

En este último caso se debe considerar en el análisis el valor comercial que muchos residuos pueden tener, lo que ha llevado en algunos casos a agotar rápidamente el stock de los insumos.

CONCLUSIONES

En las transferencias realizadas se ha observado que la obra vial es una importante receptora de residuos generados en la industria.

La dosificación en laboratorio de las posibles mezclas deberá cumplir con los parámetros viales (con una mayor confiabilidad que en las que se usen los insumos clásicos) y ambientales.

A la vez se debe pensar, que sean viables los procesos constructivos, el monitoreo y la factibilidad económica. Los tramos ejecutados deberán cumplir con las exigencias planteadas en los Pliegos de Especificaciones, los cuales incluyen las Especificaciones Ambientales.