

Aprovechamiento de residuos de procesos como material para capas de pavimentos

Utilization of process waste as material for pavement layers

Fecha de entrega: 24 de julio 2025

Fecha de aceptación: 2 de septiembre 2025

Julián Rivera¹, Ignacio Zapata Ferrero¹, Luis Delbono¹, Luis Aguayo², Valentina Fuentes² y Álvaro González²

¹ LEMaC Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP – CIC PBA Calle 60 y 124, B1923 La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina, jrivera@frlp.utn.edu.ar (<https://orcid.org/0000-0001-7391-4469>), izapata@frlp.utn.edu.ar (<https://orcid.org/0000-0002-8779-4645>), hdelbono@frlp.utn.edu.ar (<https://orcid.org/0000-0002-2601-3470>)

² Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macúl, Región Metropolitana de Santiago, Chile, laaguayo@uc.cl, vtfuentes@uc.cl, algonzav@uc.cl (<https://orcid.org/0000-0002-0353-8581>)

El artículo aborda, a partir de experiencias propias de los autores, el uso de residuos de procesos industriales y no industriales en obras viales, con énfasis en su aplicación en vías de bajo volumen de tránsito. Se presentan varios casos de estudio sobre el mejoramiento de suelos de subrasante, estabilización y capas de cobertura, con diferentes residuos; como escoria de alto horno, catalizadores agotados, barbijos triturados, lignina, entre otros. El artículo destaca la importancia de realizar mediciones y ensayos adecuados para evaluar la compatibilidad y eficacia de los materiales. Además, resalta la necesidad de considerar factores ambientales y logísticos en el uso de residuos. Finalmente, que la alternativa puede ser una solución viable y sostenible, especialmente si se optimizan los recursos locales y se minimizan las distancias de transporte.

Palabras clave: reutilización de residuos, estabilización, asfalto modificado

Based on the authors' own experiences, this article addresses the use of industrial and non-industrial process waste in roadworks, with an emphasis on its application on low-traffic roads. Several case studies are presented on the improvement of subgrade soils, stabilization, and cover layers, using various waste materials, such as blast furnace slag, spent catalysts, crushed chin straps, lignin, among others. The article highlights the importance of conducting appropriate measurements and testing to evaluate the compatibility and effectiveness of materials. It also emphasizes the need to consider environmental and logistical factors when using waste. Finally, it emphasizes that this alternative can be a viable and sustainable solution, especially if local resources are optimized and transportation distances are minimized.

Keywords: waste reuse, stabilization, modified asphalt

Introducción

El empleo de residuos en la obra vial posee un amplio espectro de características que pueden llevar a numerosas consideraciones. A fin de acotar la temática, en el presente artículo se analizan solo aquellos casos en los que el residuo proviene de algún proceso. Por otro lado, debido a condicionantes que puede introducir el análisis en vías con solicitaciones de tránsito de importancia, se aborda la temática solo para vías de bajo volumen de tránsito; comprendiéndolas como aquellas que no superan una

solicitud de tránsito dada, de acuerdo con el paso de ejes por sobre el pavimento (AASHTO, 1993). Lo mencionado se suele implementar por medio de un eje representativo, al cual el resto de las configuraciones se transforman de manera equivalente en cuanto a su poder destructivo sobre el pavimento (existen otros criterios, como el de espectro de carga). De manera mayoritaria, en la región ese eje es del tipo simple dual y con una carga total de 80 kN. Así, un pavimento en una vía de bajo volumen de tránsito no superaría la solicitud de 1.000.000 de ejes equivalentes

durante su vida útil, o que, al ser tratada superficialmente, pero no pavimentada, no superaría los 100.000 ejes equivalentes (AASHTO, 1993; NCHRP, 2004).

Por lo expresado, existe un alcance limitado de las recomendaciones que surjan del artículo; no obstante, los conceptos involucrados son de utilidad para otros tipos de vialidades.

Existen modos de clasificar a los residuos en la actualidad. En función de esa clasificación será la manera de agruparlos e identificarlos. Como la finalidad de este artículo no es la de profundizar en dicho aspecto, se instrumenta una clasificación básica, para simplificar la exposición de ideas. Se recomienda a los interesados en un análisis más acabado, recurrir a fuentes que aborden el tema de manera específica.

Así, se puede agrupar a los residuos de interés bajo dos categorías. Una de ellas es la de residuos de construcción y demolición (RCD) que involucra por ejemplo el hormigón triturado, o el material recuperado de pavimento asfáltico (RAP). La otra categoría abarca aquellos residuos provenientes de algún proceso (RP) no necesariamente “productivo” ni “industrial”, cuenten con algún tratamiento posterior a ese proceso o no; como puede ser la lignina que es un biopolímero natural presente en las paredes celulares de las plantas y que proviene de procesos de la industria forestal. Sin querer ser exhaustivo, el artículo apunta justamente a este último grupo de residuos; no obstante, se citan algunos ejemplos en los cuales se utilizan en forma combinada con RCD.

Metodología

A los efectos de este artículo se consideran aquí las determinaciones sobre los materiales que buscan establecer las características de los desarrollos y sus aplicaciones en cuanto a sus aspectos tecnológicos (compatibilidad entre materiales, no existencia de cambios volumétricos, baja erosionabilidad) y de respuesta estructural. Como un ejemplo de la última, para los materiales granulares (no ligados) su valoración directa en laboratorio se puede obtener con el ensayo de módulo resiliente (Figura 1(a)) y en obra con un *light weight deflectometer* (Figura 1(b)); demostrando que se trata de equipos que se corresponden con las disponibilidades de recursos de centros de referencia.

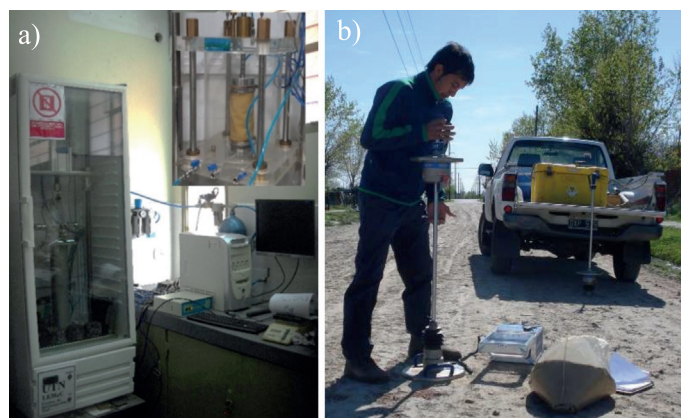


Figura 1: a) Equipo de módulo resiliente y b) *light weight deflectometer* del LEMaC

En cambio, de manera indirecta estas respuestas pueden obtenerse con el ensayo de valor soporte relativo (VSR) en el laboratorio (Figura 2(a)) o en obra con el VSR in situ (Figura 2(b)) o con el penetrómetro dinámico de cono (DCP) (Figura 2(c)); consistentes posiblemente con disponibilidades menores.

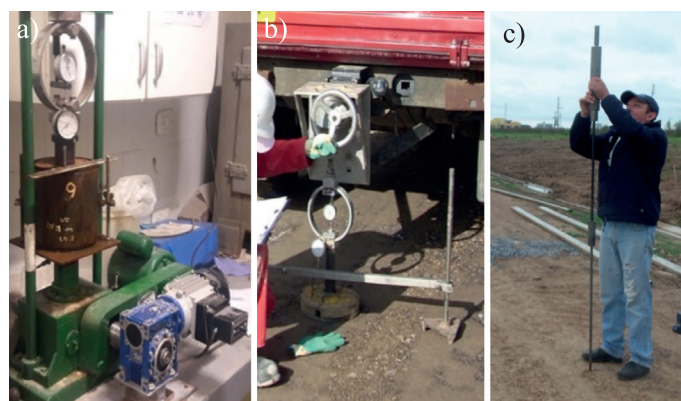


Figura 2: a) VSR en laboratorio, b) VSR in situ y c) DCP

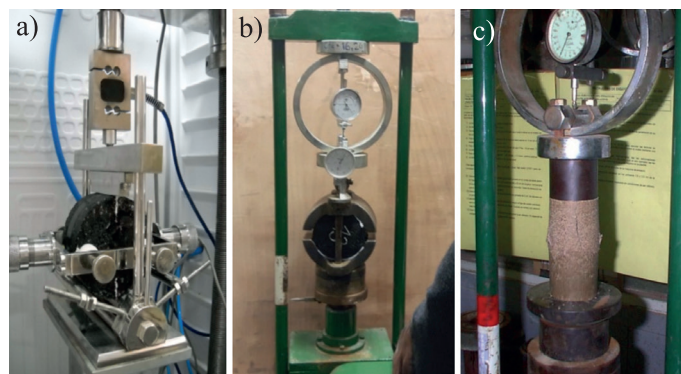


Figura 3: a) Módulo dinámico, b) Marshall y c) RCI

Algo similar sucede con los materiales ligados, en los que la medición directa de las respuestas estructurales puede

realizarse con un equipo de ensayo de laboratorio para determinar módulo dinámico como se muestra en la Figura 3(a); y la indirecta con ensayos Marshall en materiales con ligantes asfálticos (Figura 3(b)) y de resistencia a compresión no confinada (RCI) en materiales con ligantes hidráulicos (Figura 3(c)).

Algo análogo sucede con todas aquellas caracterizaciones relacionadas con los aspectos tecnológicos citados. Por todo esto, resulta necesario analizar para la escala del problema la escala de la sistemática de medición; y ver de este modo si se realizan en laboratorios menores o centros de referencia.

Como aplicación de lo mencionado, se cita la aplicación de una serie de residuos en busca del mejoramiento y estabilización de suelos de subrasante y capas de cobertura, como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Residuos utilizados, objetivo de mejoramiento y metodología implementado para obtención de resultados comparables

Residuo	Mejoramiento	Metodología
Residuo del lavado de arenas	Mejoramiento de los suelos de subrasante	Parámetros de compactación (Proctor) y VSR
Desgomado de soja	Mejoramiento de los suelos de subrasante	Ensayo adaptado por LEMaC (erosionabilidad)
Escoria de alto horno	Estabilización de los suelos de subrasante	Parámetros de compactación (Proctor) y VSR
Catalizadores agotados	Estabilización de los suelos de subrasante	Determinación de RCI
Barbijos triturados	Estabilización de los suelos de subrasante	VSR
Arcilla agotada de un lecho percolador	Capas de coberturas	Procedimiento Marshall modificado adaptado por el LEMaC
RAP de aceite	Capas de coberturas	Procedimiento Marshall modificado adaptado por el LEMaC
Lignina como modificador de asfalto	Capas de coberturas	Diseño Marshall tradicional / Ensayo tensile strength ratio (TSR)

El mejoramiento y estabilización de suelos de subrasante se refiere a técnicas aplicadas para mejorar las propiedades de los suelos donde se construyen carreteras u otras infraestructuras. Estas técnicas son fundamentales en ingeniería civil, especialmente en proyectos de infraestructura vial, para garantizar que el suelo soporte las

cargas y condiciones ambientales a las que estará expuesto.

Por otra parte, la capa de cobertura, o capa de rodadura, en contacto directo con el tránsito vehicular, tiene un papel crucial en el rendimiento, la seguridad y la durabilidad de una carretera o vía.

Resultados

Residuo de lavado de arenas

Como caso de mejora de los suelos arcillosos, se cita aquel en el que se incorpora a un suelo A-7-5 de la zona de Olavarría (provincia de Buenos Aires), un material fino residual proveniente del lavado de arenas de trituración graníticas de una cantera de la zona (Loza Panozo *et al.*, 2020). Ese residuo es en cantera un pasivo ambiental, por lo cual el encontrar un destino como el citado resulta sumamente atractivo (Figura 4). Por ello, se estudia de modo sencillo cómo ante incrementos del contenido del residuo en su mezcla con el suelo plástico, se modifican los parámetros de compactación adoptables en obra y luego, mediante el ensayo de VSR, la respuesta estructural esperable, Tabla 2; con un contenido óptimo del residuo del 10 %. Se observa cómo partiendo de una baja aptitud vial del suelo solo, representada por un VSR de 2.5 %, se alcanzan valores de respuestas aceptables para una subrasante mejorada de VSR del 7.1 %. También cabe analizar cómo porcentajes mayores de empleo del residuo vuelven a dar por resultado VSR por debajo de ese máximo, lo cual ratifica lo expresado en cuanto a la necesidad de medir para posibilitar la instrumentación de alternativas óptimas de empleo.



Figura 4: Residuo del lavado de arenas

Tabla 2. Resultados de VSR de la mezcla vs % residuo del lavado de arenas

Residuo, %	VSR, %	D. seca máx., g/cm ³
0	2.5	1.764
5	5.3	1.776
10	7.1	1.788
20	6.2	1.798
30	5.3	1.790

Desgomado de soja

Este material, residual de la extracción del aceite de soja, es distribuido diluido en un 60% de agua, Figura 5, generándose lo que se da a llamar como la Dosis Oficial (D) de aplicación; que implica 11.4 g de residuo cada 1000 g de peso de suelo seco tratado. Esta dosis y su doble (Dx2) se analizan como paliativos de polvo para un suelo arenoso A-2-4; para lo cual se usa un ensayo adaptado por el LEMaC de uno desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, Figura 6 (LEMaC, 2019).



Figura 5: Distribución en obra de la dilución de desgomado de soja



Figura 6: Equipo adaptado por el LEMaC para el control de paliativos de polvo

Mediante este análisis se establece que el empleo de la Dosis Oficial disminuye la erosionabilidad del material por debajo de un 50 %, y que no es de utilidad incrementarla a los efectos de mejores resultados; tal cual puede observarse de los resultados de la Tabla 3.

Tabla 3: Pérdida por erosión vs dosis de desgomado de soja

Situación	Pérdida por erosión, g
A (Patrón)	26.8
A+D (Patrón más aditivo)	10.9
A+D x 2 (Patrón más el doble de aditivo)	11.0

Escoria de alto horno

Este material presenta una granulometría que pasa el 100 % el Tamiz de 1”, en aproximadamente el 97 % el Tamiz de ¾”, en un 25 % el Tamiz de ½” y no registra pasante en el Tamiz N° 4; por lo cual permite generar una adecuada curva granulométrica al ser mezclado en un 60% con el suelo de la subrasante. Se obtiene así un material que presenta a una densidad seca máxima de 1.904 g/cm³ y una humedad óptima del 18% y un VSR del 97%, lo cual se ubica por encima del 80% establecido por DNV para una base de pavimentos de este tipo de material (DNV, 1998). A lo establecido, se debe agregar, complementariamente, un incremento a registrarse en el tiempo en la capa tratada debido al efecto cementante retardado que este tipo de residuos suele presentar.

Catalizadores agotados

Por medio de las determinaciones de RCI en diversas mezclas con contenido de catalizadores agotados, se desprende que este residuo puede ser empleado en una proporción del 25% mezclado con un suelo natural plástico, más un 7% de cemento; porcentaje levemente por debajo del habitual debido a que el residuo debe ser tratado con materiales hidráulicos para contar con su aprobación para el traslado desde la planta en la cual se genera. De este modo se trata de un aprovechamiento doble, es decir, del residuo en sí y del material con el cual tiene que ser tratado por razones ambientales.

Barbijos triturados

Mediante la técnica de uso de barbijos triturados se establecieron los contenidos óptimos a ser utilizados a partir de los resultados de VSR obtenidos en tres tipologías de suelos volcados en la Tabla 4 (Rivera *et al.*, 2022). A manera de ejemplo, se llegó a establecer que una capa de suelo estabilizada en los espesores habituales podía llegar a incorporar entre 1.500.000 y 2.000.000 de barbijos por cuadra.

Tabla 4: Resultados de estabilización de tres suelos con barbijos triturados

Porcentaje barbijos, %	VSR no embebido, %		
	A-2-4	A-4	A-6
0.00	20.2	19.9	9.8
0.50	24.0	20.2	9.9
1.00	24.9	20.8	10.0
1.50	34.2	29.5	10.5
2.00	48.3	25.4	15.7
2.50	34.4	20.1	13.0
3.00	34.4	17.7	11.1

Arcilla agotada de un lecho percolador

Utilizada en mezclas asfálticas en frío en un porcentaje óptimo de aproximadamente un 10%, lo que permite reducir en un 1% el contenido de residuo asfáltico necesario de la correspondiente emulsión asfáltica empleada por su contenido de hidrocarburos; alcanzándose una estabilidad ante el ensayo Marshall de aproximadamente 4.5 kN, más que aceptable para la finalidad buscada.

RAP más residuo aceitoso

Los residuos de RAP se utilizan como capa de cobertura en diversos municipios de la provincia de Buenos Aires (Rivera *et al.*, 2020). En estos casos se ha establecido como una opción óptima su mezclado en la tolva de una terminadora, más el aporte de calor con la plancha del sinfin en la salida de ésta, generándose una mezcla que se compacta a aproximadamente 60°C.

Mediante esta experiencia se analiza la incorporación al RAP de aceite usado en motores industriales, aceite comestible usado de la industria alimenticia y el desgomado de soja. Se arriba a los coeficientes estructurales considerables mediante la guía AASHTO93 para el diseño de los pavimentos (AASHTO, 1993), a partir de ensayos Marshall adaptados a las circunstancias, que se muestran en

Tabla 5: Coeficientes estructurales alcanzados en mezclas de RAP y residuos aceitosos

Dosificación	Coefficiente de aporte estructural, 1/pulg
100 % RAP	0.18
100 % RAP + 1% aceite usado de autos	0.23
100 % RAP + 1% aceite comestible usado	0.20
100 % RAP + 3% desgomado de soja	0.19

la Tabla 5. A manera de ejemplo comparativo, cabe señalar que un tratamiento superficial simple en aproximadamente 25 mm de espesor presentaría un coeficiente de aporte estructural asociado de 0.16 1/pulg.

Lignina como modificador de asfalto

Como se observa en la Tabla 6 la resistencia húmeda aumenta con la incorporación de lignina residual a una mezcla asfáltica, mientras la resistencia seca disminuyó. Cabe decir que ambas mezclas tienen distinto porcentaje de asfalto en donde la muestra original (patrón) contiene 5.1%. Por otra parte, la muestra de asfalto modificada con asfalto más lignina posee un 6.0%, pero al mismo tiempo es importante recalcar de que el porcentaje propio de asfalto en la mezcla modificada corresponde a un 4.8% y la lignina a un 1.2%. Como resultado comparativo entre la situación de uso de asfalto original se presentan los resultados de cálculo de la relación de resistencia a la tensión TSR (Segura *et al.*, 2023) según la información presentada en la Tabla 6.

- TSR con asfalto original: 65
- TSR con asfalto modificado con lignina: 73

Tabla 6: Resultados asfalto original y asfalto modificado con lignina

Mezcla	Stm (R.H.)	Std (R.S.)
Original	745	1145
Modificada	790	1085

Conclusiones

Como conclusiones de los diversos aspectos volcados en el presente artículo, se mencionan las siguientes:

- Debe analizarse la compatibilidad y conveniencia de empleo de un residuo para cada tipo de solución en particular a desarrollarse; porque ciertos residuos solo pueden ser utilizados de manera combinada con ciertos materiales para ciertas finalidades en específico. En resumen, no se deben generalizar conclusiones de un caso a la totalidad de las circunstancias dables de presentarse.
- Las soluciones óptimas van en utilizar en mayor grado materiales locales y residuos de actividades cercanas,



- para de ese modo disminuir al máximo las distancias de transporte implicadas y facilitar la posibilidad de arribar a adecuadas ecuaciones técnico-económicas.
- El volumen de producción del residuo debe ser acorde a la disponibilidad lógica de su almacenamiento y a las capacidades existentes en cuanto a su ritmo de empleo.
 - Desde el punto de vista vial, es necesario diseñar en función de mediciones que se realicen adaptadas a las problemáticas, por lo que pueden verse implicados ensayos del tipo convencional o no.
 - La utilización de residuos requiere del análisis adicional de requisitos ambientales que pueden ser de diversa índole e importancia, de acuerdo con las características propias del residuo, la necesidad de su traslado y la aplicación en particular que se prevea.
 - El desarrollo de la totalidad de las tareas que implican iniciativas como las abordadas puede ser realizado por la instancia que tenga injerencia en las obras, pero es posible que en muchas oportunidades se requiera además diversos grados de intervención de algún centro de referencia en la temática.

NCHRP (2004). Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. National Cooperative Highway Research Program 1-47A Report. Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, USA

Rivera, J., Zapata, I. y Battista, N. (2022). Mejora de suelos finos viales con residuo de barbijos triturados. *Carreteras* 236(4), 73-75

Rivera, J., Barbeito, S. y Porro, A. (2020). Empleo de RAP y residuos aceitosos como pavimento a bajas temperaturas para bajo tránsito. *Revista Vial* 133, 18-20

Segura, A., Botasso, G., Raggiotti, B., Zapata, I. y Rebollo, O. (2023). Valoración inicial de mezclas asfálticas retardante de fisuras reflejas elaboradas con asfaltos con alta incorporación de NFU. *Obras y Proyectos* 34, 18-28

Referencias

AASHTO (1993). Guide for design of pavement pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington DC, USA

DNV (1998). Pliego de especificaciones técnicas generales. Dirección Nacional de Vialidad de Argentina.

LEMaC (2019). Guía de metodologías y procedimientos para uso vial desarrollados en el LEMaC – Centro de Investigaciones Viales. Editorial edUTecNe, Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional de Argentina.

Loza Panozo, J., Brizuela, L. y de Abajo Freire, N. (2020). Análisis de suelos estabilizados con filler residuo de trituración de rocas de la zona de Olavarría. Exposición tesis de Becarios de Investigación 2019 – LEMaC, , Universidad Tecnológica Nacional, La Plata, Argentina, Número 14, 13-18