

Empleo de un estabilizante iónico de suelos como agente reductor del contenido de cemento en el desarrollo de bases de suelo-cemento. J. Rivera, G. Botasso, A. Porro, A. Poletti, O. Hansen. (T0254)

XVIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, 26 al 28 de septiembre de 2022 en Buenos Aires, Argentina.

EMPLEO DE UN ESTABILIZANTE IÓNICO DE SUELOS COMO AGENTE REDUCTOR DEL CONTENIDO DE CEMENTO EN EL DESARROLLO DE BASES DE SUELO-CEMENTO

J. Julián Rivera¹, H. Gerardo Botasso¹, Anael R. Porro¹,
Andrés Poletti², Oscar Hansen²

1 LEMaC Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP – CIC PBA, Avenida 60 y 124, La Plata – Bs. As. (CP: 1900), Te. 0221-4890413, jjulianrivera@hotmail.com.ar

2 CON-AID Argentina, Chingolo 480 Of. 22 - Complejo Milberg Office, Tigre - Bs. As. (CP: 1648), Te. 011-47478686, tecnico@conaid.com.ar

RESUMEN

En diversas obras viales llevadas adelante en Argentina y otros países, se realiza la aplicación de ciertos estabilizantes químicos en la constitución de bases de suelo-cemento, con el propósito de dotarlos de mayor respuesta estructural, o una misma respuesta a menores contenidos de cemento. Puntualmente, se trata de productos que cuentan con ciertas características específicas y que han sido desarrollados para la estabilización de suelos de elevada plasticidad, dada la reducción de costos que se genera. Esta situación, lleva en 2011 a una empresa local a la idea de analizar si un estabilizante químico de su producción, dado que dicho producto posee sustancias de conocida afinidad con el cemento que llevan a reacciones puzolánicas, permitiría potenciar desde el punto de vista estructural los contenidos de cemento utilizados en mezclas de suelo-cemento. Por ello, acude al LEMaC, para que se realice un acompañamiento en el proceso de desarrollo de los diversos estudios experimentales hasta llegar a procedimientos y resultados definitivos; y en busca de darle un mayor soporte técnico al trabajo. Estos procesos se basan en la evaluación de las respuestas estructurales esperables por medio de variadas metodologías disponibles y adaptadas *ad-hoc*. En el presente trabajo se vuelca una descripción inicial de los alcances de la tecnología, ejemplos de los estudios que se han ido realizando desde el 2011 hasta la actualidad, una breve descripción del proceso de aplicación en obra y la discusión en cuanto a cómo se podría proseguir en las investigaciones para un mayor y mejor uso de estas tecnologías en los años venideros.

INTRODUCCIÓN

El concepto de las mezclas de “suelo-cemento” es un tanto más amplio de lo que puede interpretarse desde un principio; esto puede percibirse cuando se observan, por ejemplo, tablas como las expuestas por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), la *Federal Highway Administration* (FHWA) (Figura 1) o la *US Air Force* (Figura 2), en las que se establecen ante diversos parámetros el rango de aplicación de diversas metodologías de estabilización, entre las que se encuentran aquellas que emplean cemento (NAP, 2009).

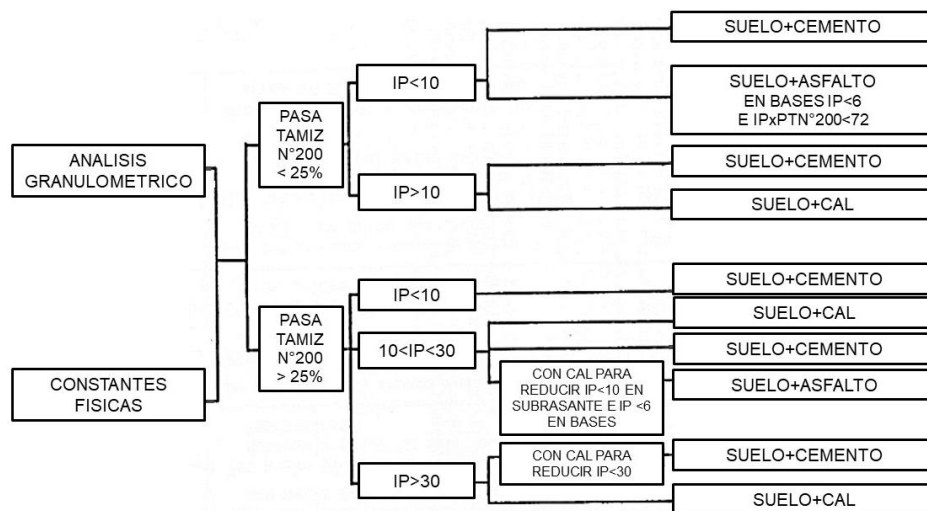


Figura 1. Clasificación de las estabilizaciones según FHWA. Fuente: adaptación propia.

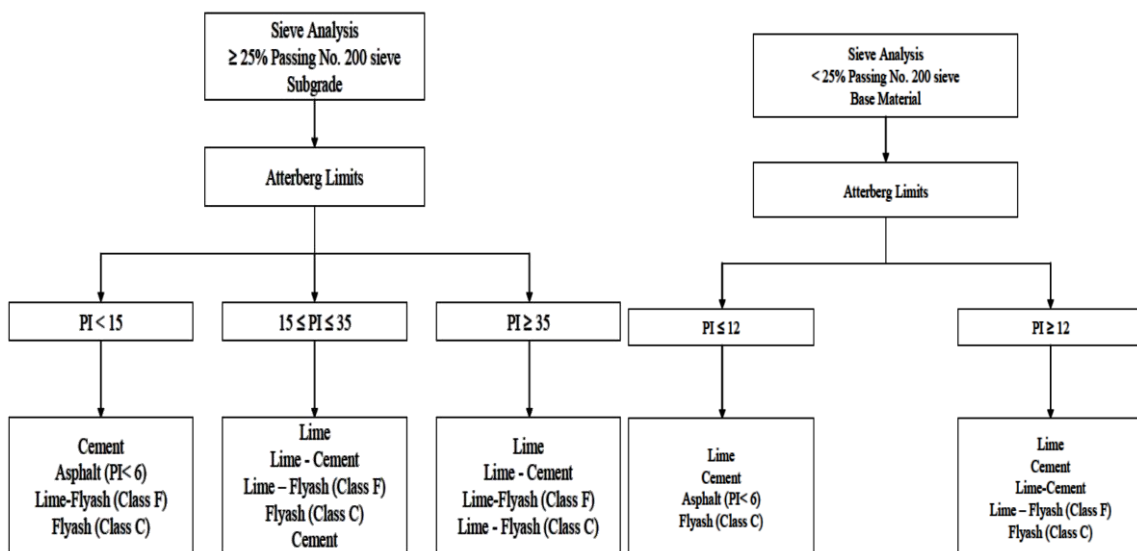


Figura 2. Árbol de decisión para la estabilización de suelos y bases. Fuente: NAP, 2009.

Por eso, al menos tres niveles de diferentes aplicaciones que pueden ser consideradas como bases de suelo-cemento (o como “capas” de suelo-cemento, pues no se trataría solo de aquel material inmediatamente por debajo a la capa de rodamiento) pueden ser identificables (Thenoux, 2020).

El Nivel A se registra bajo el concepto de lo que la Guía AASHTO93 (AASHTO, 1993), por ejemplo, denomina como “base tratada con cemento”. Estas capas, en rigor, se constituyen

de estabilizaciones granulométricas con un bajo porcentaje de material fino (específicamente, bajo % de pasa tamiz N° 200 o de 74 μm de abertura). A estas capas así constituidas, en función de su respuesta estructural, determinada por ejemplo mediante su resistencia a compresión confinada a 7 días de edad y con valores por encima de los 2,5 MPa, se le pueden otorgar coeficientes de aporte estructural de entre 0,20 1/pulg a 0,25 1/pulg.

En el otro extremo, se ubica un Nivel C de identificación de este tipo de bases en las cuales se aplican contenidos de cemento sobre suelos con una plasticidad marcada, lográndose un producto estabilizado tal que aún puede ser considerado como un material granular (o "suelto"). Este tipo de aplicaciones no resulta tan habitual en Argentina, como sí lo es en varios países del resto de Latinoamérica, debido a que a nivel local se da el uso difundido de la cal y/o de productos iónicos como estabilizantes en estos casos, con menores costos de obra implicados con estos materiales (Rivera, 2020).

El Nivel B, intermedio, es aquel que resulta de especial interés del presente artículo, y que involucra soluciones que pueden rondar una resistencia a compresión confinada a los 7 días a partir del entorno de los 1,5 MPa (Thenoux, 2020; IECA, 2013). Aunque el rango de materiales que puede involucrarse en dicho nivel es más amplio aun, se puede considerar que involucran a suelos con Índices de Plasticidad (IP) $\leq 10\%$ y porcentajes de Pasa Tamiz N°200 (PTN°200) $\leq 70\%$. Si bien estos límites pueden ser ampliamente discutidos, para orientar un poco más al lector en cuanto a las características de este material, cabe señalar que se trata de estabilizaciones a las cuales se les podría asignar un coeficiente de aporte estructural de entre 0,12 1/pulg a 0,16 1/pulg (Rivera et al., 2018); lo cual marca una diferencia notoria con el material mencionado para el primer nivel (es decir, nivel A).

En relación a este último comentario, también resulta discutible que sean aplicables directamente estos conceptos provenientes de la Guía AASHTO93 en este tipo de aplicaciones, debiéndose analizar, según algunos autores, directamente mediante criterios mecanicistas ante situaciones admisibles y no de deterioro ante cargas repetidas (Thenoux, 2020); pudiéndose por ejemplo considerar los módulos de respuesta mediante el concepto de módulo resiliente o módulo dinámico en función del contenido de cemento según se trate (Rivera, 2020).

Más allá de que los autores del presente trabajo consideren adecuada esa apreciación, resulta visible también de que se está abordando una solución tecnológica de un grado intermedio, con aplicaciones en obras de solicitaciones intermedias (al menos en los casos a los cuales se apunta) y con una ingeniería de gestión y diseño que también posee una escala de orden intermedio. Dicho en otras palabras, la escala de ingeniería que requieren muchas de las obras que involucran este tipo de soluciones (vías urbanas de tránsito bajo o intermedio, caminos rurales para vehículos de porte limitado, etc.), salvo en casos puntuales en que se materializan para un volumen de obra significativo, justifica el empleo aun en estos casos de criterios de la Guía AASHTO93, admitiéndose un grado de incertidumbre posiblemente elevado, pero admisible a los efectos prácticos.

De aquí en más en este artículo se hace referencia como "base de suelo-cemento" a aquellas relacionadas con el tercer nivel descripto (Nivel B), sin mayores aclaraciones al respecto.

LAS EXPERIENCIAS REALIZADAS EN EL LEMaC

En el año 2011, debido a antecedentes de larga data en cuanto a que el uso combinado de suelo-cemento-aditivo puede llevar a una optimización de las bases de suelo-cemento (Kézdi, 1973; Laguros, 1962), desde la empresa Con-Aid Argentina (CON-AID) se entabla contacto

con el LEMaC Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP – CIC PBA (LEMaC) para encarar una serie de estudios que analicen el empleo en dichas aplicaciones, bajo el concepto de “aditivo”, de un producto estabilizante químico específico de su producción. Se constituirían así lo que de acá en más se denominan como bases “suelo-cemento-estabilizante”.

Los trabajos realizados en esos primeros estudios sobre un suelo A-4(8) (Límite Líquido de 33 %, IP de 3 % y PTN^o200 de 88,5 %) y un cemento CPC-40 (según normas IRAM), y empleándose las adaptaciones a las sistemáticas de ensayo que actualmente se encuentran en la Guía LEMaC de Procedimientos– Edición 2019 (Rivera & Botasso, 2019) bajo el código de procedimiento LEMaC-B07/12, permiten obtener los resultados preliminares de Resistencia a Compresión Inconfinada (RCI) a los 7 días que se observan en la Tabla 1 (Rivera et al., 2011).

Estos resultados se consideran absolutamente preliminares. La dosis de estabilizante se menciona de acuerdo al sistema de dosificación establecido por CON-AID, mediante el cual se expresa con X cm³ de producto por cada 1 litro de agua a una disolución que es empleada luego en la proporción de 10 cm³ por cada 1 kg de suelo seco a ser tratado. Las dosis de cemento se expresan como porcentaje en peso por encima respecto del 100 % en peso de suelo seco.

A partir de esa experiencia, se ajustan diversos aspectos de interés y se genera un primer estudio ratificatorio, obteniéndose los resultados de la Tabla 2 de RCI a los 7 días (Hansen et al., 2012). El suelo empleado también clasifica como A-4(7) (Límite Líquido de 37 %, IP de 1 % y PTN^o200 de 71,8 %) y el cemento utilizado presenta contenidos de *filler* que le permiten clasificar según las Normas IRAM como un CPF-40.

Tabla 1. Resultados primera experiencia. Fuente: Rivera et al., 2011.

Muestra	RCI (kg/cm ²)
Suelo-cemento 8 %	22,7
Suelo-cemento 5 % + 3,0 cm ³ estabilizante	13,6
Suelo-cemento 6 % + 3,0 cm ³ estabilizante	22,7

Tabla 2. Resultados primera experiencia ratificatoria. Fuente: Hansen et al., 2012.

Muestra	RCI (kg/cm ²)
Suelo-cemento 4 %	6,1
Suelo-cemento 6 %	12,8
Suelo-cemento 8 %	17,3
Suelo-cemento 4 % + 4,0 cm ³ estabilizante	6,4
Suelo-cemento 6 % + 4,0 cm ³ estabilizante	16,1
Suelo-cemento 8 % + 4,0 cm ³ estabilizante	21,7

En las experiencias citadas se decide realizar la mezcla del suelo con el cemento-estabilizante de manera simultánea para simplificar las operaciones en obra (adicionándose el estabilizante directamente en el agua de riego) y acotar los plazos a los habituales para una mezcla de suelo-cemento. En experiencias posteriores esta metodología de análisis se ve ratificada, pues se obtiene con la misma mejores resultados que cuando se efectúa una mezcla inicial con el estabilizante y luego de 48 horas con el cemento. Específicamente, como ejemplo de entre otras experiencias realizadas, se obtienen aportes estructurales al menos un 10 % superiores con la mezcla simultánea al realizarse el estudio sobre un suelo A-4(0), con un

cemento que clasifica según la Norma IRAM como un CPC-40 y cuando se emplea una adición de 3,0 cm³ de producto (Porro et al., 2018).

Por otro lado, se puede señalar que el rango de dosificación del estabilizante iónico en mezclas combinadas con cemento, es similar al empleado por CON-AID para mezclas de solo suelo más estabilizante iónico. Aunque, si bien de determina en Porro et al. (2018) que el aumento de la dosificación del estabilizante no es una variable preponderante, puede ser necesario en algunos casos complementar los ensayos con alguna serie con mayor dotación del mismo.

Hasta la fecha, de varios estudios realizados, se puede observar que, desde la solo evaluación de la resistencia a compresión inconfiada, podría reducirse la dotación de cemento utilizada hasta un máximo del 40 % (Porro et al., 2018).

En estas experiencias, también puede constatarse una tendencia a la modificación de los resultados del ensayo Proctor, específicamente en la Densidad Seca Máxima al incrementarse el contenido de cemento, con una tendencia a aumentar en los sistemas suelo-cemento-estabilizante (Porro, et al., 2018) versus la disminución que en la mayoría de los casos se registra en los sistemas suelo-cemento. Estos resultados son analizados más adelante en este documento, pero vale la pena ya destacar que se trata de un efecto fundamental a favor de las mezclas suelo-cemento-estabilizante.

También cabe señalar en esta sección que resultados obtenidos en experiencias posteriores con esos mismos suelo, cemento y dotación de estabilizante permiten observar, ante diversos contenidos de cemento, los coeficientes de aporte estructural que podrían asignarse a la capa por medio de su RCI a los 7 días o el Valor Soporte Relativo embebido (VSR) a esa misma edad. La Figura 2 muestra lo señalado y es construida con parte de los resultados obtenidos en una experiencia, volcados en la Tabla 3. En dicha figura se ve un grado de incongruencia de los resultados obtenidos para el 3 % de cemento por una vía o la otra, lo cual demuestra que existiría en el entorno de esas adiciones una zona de indefiniciones en cuanto a la sistemática de ensayo clásica que podría emplearse para su análisis (Rivera et al., 2018).

Tabla 3. Coeficientes estructurales obtenidos entre RCI y VSR. Fuente: Rivera et al., 2018.

Caso	RCI (KPa)	VSR (%)	Coef. Ap. Estr. (1/pulg)
suelo + 3 cm ³ estabilizante +1,5 % cemento		21,3	0,073
suelo + 3 cm ³ estabilizante +3 % cemento		56,1	0,120
suelo + 3 cm ³ estabilizante +3 % cemento	118,4		0,102
suelo + 3 cm ³ estabilizante +4 % cemento	490,4		0,109
suelo + 3 cm ³ estabilizante +5 % cemento	1167,0		0,122
suelo + 3 cm ³ estabilizante +7 % cemento	2569,4		0,148
suelo + 1,5 % cemento		19,9	0,070
suelo + 3 % cemento		54,6	0,119
suelo + 3 % cemento	256,6		0,105
suelo + 4 % cemento	470,7		0,109
suelo + 5 % cemento	843,4		0,116
suelo + 7 % cemento	2000,6		0,136

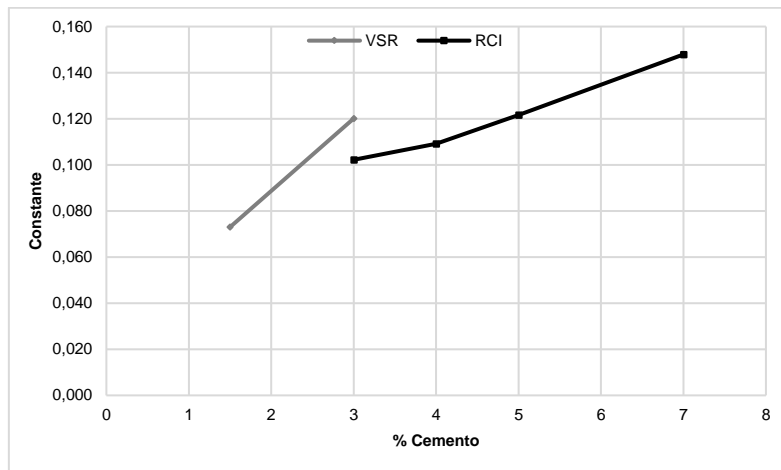


Figura 2. Coeficientes de aporte estructural asignables a capa de suelo-cemento-estabilizante. Fuente: Rivera et al., 2018.

Este entorno de indefinición, según lo observado para los suelos analizados, estaría en un porcentaje de cemento de entre el 3 % y 4 %. Es decir, porcentajes menores al 3 % podrían evaluarse como capas no cementadas y con porcentajes mayores al 4 %, como las capas de suelo cemento ya conocidas.

PROCESO DE APLICACIÓN EN OBRA Y ALGUNOS REGISTROS

El proceso de obra para las capas suelo-cemento-estabilizante no difiere significativamente del utilizado en las capas de suelo-cemento. La operatoria, básicamente, contempla sobre la capa de suelo a ser tratada, ya roturada a tamaños menores a los 25 mm, la distribución de un espesor homogéneo del contenido de cemento, como se observa en la Figura 3.



Figura 3. Distribución del contenido de cemento por encima de la capa de suelo roturada. Fuente: elaboración propia

Paso seguido, se procede a la incorporación del estabilizante, como ya fuera expresado, mediante su aditivación en el agua de riego. La distribución se realiza mediante un camión regador como el que se ve en la Figura 4. La dotación de estabilizante es fija por unidad de volumen a estabilizar; la cantidad de agua con que se aplica es función del contenido de

humedad a incorporar para alcanzar la humedad óptima, a partir del Proctor calculado con suelo-cemento-estabilizante.



Figura 4. Distribución del estabilizante con el agua de riego. Fuente: elaboración propia

Se procede luego al mezclado de los materiales mediante rastra de disco, equipos *pulvimixer* o, preferentemente, una recicladora (o también conocida como reclamadora) como la de la Figura 5. Se realiza luego la compactación de la capa que, por presentar alto contenido de finos, contempla generalmente una primera etapa de compactación con rodillo pata de cabra (Figura 6) y una segunda etapa de compactación con rodillo liso; combinada con recortes con motoniveladora y sellados, hasta lograr una adecuada lisura superficial de la capa (Figura 7). Los tiempos límites en la compactación de mezclas suelo-cemento-estabilizante son los mismos que para las tradicionales de suelo-cemento.



Figura 5. Mezclado mediante recicladora. Fuente: elaboración propia

En el mejorado de caminos rurales con este tipo de estabilizaciones, se busca siempre alcanzar el aporte estructural con el menor porcentaje de cemento posible (en el caso del ejemplo aquí ilustrado, entre el 2 % y 2,5 %) para su mayor compatibilidad con el mantenimiento rutinario de este tipo de obra.



Figura 6. Distribución superficial con motoniveladora y primera etapa de compactación con rodillo pata de cabra. Fuente: elaboración propia



Figura 7. Adecuada lisura superficial de terminación. Fuente: elaboración propia

Las imágenes volcadas para ilustrar el proceso de obra pertenecen al tratamiento de una sección del “Camino S425-Monte Cristo-Capilla de Los Remedios”, realizado por las empresas Vawa-Afema en marzo de 2021, como ensayo de campo para la Dirección de Vialidad de la Provincia de Córdoba.

Como terminación y protección de la base, en dicha obra se aplica un riego de imprimación con Emulsión de Rotura Lenta a razón de 1 l/m² (Figura 8) y se grancea con una generosa capa de arena gruesa de río sucia. Al corto plazo se logra el acabado superficial que se observa en la Figura 9. La posibilidad de terminar la estabilización con un tratamiento como éste, tiene la múltiple ventaja del curado, la protección y la posibilidad de demarcación horizontal. En este trabajo se construyen también otras dos secciones con la misma base estabilizada y otros tipos de recubrimiento superficiales.



Figura 8. Aplicación de riego de imprimación de rotura lenta. Fuente: elaboración propia



Figura 9. Terminación superficial de la capa de protección. Fuente: elaboración propia

Al ser liberada al tránsito, la capa registra con el tiempo indicios de consolidación posterior por el tránsito, que se reflejan en una fisuración en bloques perpendiculares de tamaño intermedio y baja severidad (Figura 10). Se hace notar que en este tipo de suelo en particular (loess) se producen también este tipo fisuras en sectores no estabilizados, aunque en un grado bastante menor.

Las densidades efectuadas a la capa de suelo-cemento-estabilizante presentan un leve incremento del coeficiente de compactación (en el entorno del 2 % al 3 %) luego de 3 meses de operación del tramo con un nivel elevado de tránsito pesado. Esto podría también ser un factor preponderante para las fisuras de la Figura 10, lo que implicaría una posible consolidación diferida en este tipo de capas, lo cual se aborda en el punto siguiente de discusión.



Figura 10. Fisuras de baja severidad por consolidación posterior. Fuente: elaboración propia

Otras obras que se realizaron con mezclas suelo-cemento-estabilizante son la estabilización de calzadas urbanas, como las de los municipios de Pilar y Escobar, por ejemplo. La protección superficial se decide en estos casos realizarla directamente mediante la distribución de piedra partida de Tamaño Máximo 20 mm, la cual se hinca en parte sobre los centímetros superficiales de la capa de suelo-cemento-estabilizante. La obra de la fotografía se ejecuta en julio del 2019, con 4 % de cemento más estabilizante CON-AID, generándose el tratamiento en aproximadamente 20 cm de espesor mediante recicladora. Se trata, ésta en particular, de una vía de alto tránsito liviano y algo de tránsito pesado. En la Figura 11 se observa una imagen tomada durante el mezclado con recicladora, en la Figura 12 una obra con las condiciones típicas una vez terminada la distribución superficial de la piedra partida en julio de 2019, y en la Figura 13 se observa la imagen de la misma sección de obra en junio de 2021, es decir con 2 años de operación. Al tratarse esta una vía de alto tránsito liviano y algo de tránsito pesado, se observa que a pesar la buena conformación y transitabilidad actuales, existe un desgaste superficial mayor que cuando, por ejemplo, se recubre este tipo de estabilizaciones cementadas con algún tratamiento bituminoso. En la misma obra, pero en calzadas con un tránsito menor y/o más liviano, se observa una superficie mucho más cerrada aun, con el material pétreo aun bien hincado en la mezcla suelo-cemento-estabilizante luego de 2 años. En la Figura 14 se muestra un detalle de esta última situación. Se hace mención a estas diferencias de estado superficial por la importancia de un apropiado diseño de este tipo de estabilizaciones según su uso, que contempla no solo lo estructural, sino también lo superficial.



Figura 11. Mezclado mediante recicladora Fuente: elaboración propia



Figura 12. Obra con piedra partida distribuida superficialmente, recién terminada en junio de 2019. Fuente: elaboración propia



Figura 13. Obra con piedra partida distribuida superficialmente, en junio de 2021 después de 2 años de operación. Fuente: elaboración propia



Figura 14. Hincado del agregado a 2 años de operación. Fuente: elaboración propia

El dejar a la capa descubierta luego de su materialización por periodos prolongados, ha demostrado ser una opción positiva, como se puede observar en las imágenes de obra que se han volcado. Esto se ha corroborado por CON-AID también a nivel de laboratorio, por ejemplo, en ensayos realizados en conjunto con la empresa Vial Andes 7 para un proyecto en el mejorado de caminos vecinales de la localidad de Roque Pérez. Para dicha obra las RCI sobre probetas con 4 % de cemento, 3,5 cm³ de CON-AID y suelos tipo A-2 o A-4, han arrojado incrementos de casi un 20 % cuando se las analiza a 28 días de edad, respecto de los 7 días. Lo señalado, por ambas vías de análisis, plantean entonces otro aspecto complementario que requiere de un análisis en específico; lo cual también se aborda en el siguiente punto de discusión.

DISCUSIÓN

Lo expresado en cuanto al sistema de diseño en laboratorio y aplicación en obra, responde más a la lógica de no modificar en gran modo lo establecido para la solución convencional de suelo-cemento que a la del “nuevo” concepto de suelo-cemento-estabilizante. Esto se debe, en gran parte, a que los responsables de las reparticiones viales que deben aprobar o no la aplicación de soluciones innovadoras, como es el caso en cuestión, ante la ausencia de herramientas y procedimientos adecuados en tales casos imponen, como es lógico que sea, que las metodologías de ensayos y estudio no se aparten de lo normalizado (normas IRAM, DNV, DVBA, etc.) y especificado; o al menos no lo haga de manera marcada (Rivera, 2020). Es así como, con el paso del tiempo, se instrumentan procedimientos de análisis como los incluidos en la Guía de Procedimientos LEMaC (versiones 2016 y 2019) o en directivas emanadas para algún producto en particular desde las autoridades de ciertas reparticiones (notas a sus inspectores de autoridades de DNV, OCCOVI, DPVs, etc.). Esto último pone de manifiesto, en cierto modo, la necesidad de adaptar y acelerar los sistemas de normalización; para que, si no pueden anticipar las necesidades de obra, al menos puedan acompañarlas. Incluso, ciertos proyectos incorporan en los últimos años la posibilidad de incluir soluciones innovadoras, siempre y cuando cumplan con algunos requisitos básicos adecuadamente seleccionados y cuenten con estudios específicos por parte de una entidad reconocida. Esto puede observarse, por ejemplo, en ciertos pliegos de obra de reparticiones viales que involucran, en relación a la aplicación específica del presente artículo, rubros que llevan a la posibilidad del empleo de suelo-cemento-estabilizante, suelo-cemento o suelo-estabilizante

de manera indistinta, siempre y cuando se cumplan ciertos requisitos de respuesta estructural a una edad de 7 días; estableciéndose que se debe presentar en la propuesta la correspondiente documentación que pruebe dicha respuesta y que establezca los adecuados procesos constructivos y sistemáticas de análisis en laboratorio (que suelen involucrar algunos ajustes a los procedimientos de análisis y ensayos normalizados para capas que no emplean estabilizante). Estas iniciativas resultan de auxilio en las etapas iniciales de la introducción de un nuevo producto, pero deben ser superadas (o al menos ratificadas) una vez que sus aplicaciones toman un grado mínimo de difusión.

Si bien este tipo de iniciativas se toman como positivas, en la práctica no resultan suficientes por ciertos aspectos técnicos que las capas de suelo-cemento-estabilizante involucran, y que son el motivo principal de exposición del presente apartado.

Esto se debe a lo que explica Thenoux (2020) de que a las etapas propias de una estabilización suelo-cemento de “intercambio catiónico” y “floculación y aglomeración”, en el caso del suelo-cemento-estabilizante se suman de modo un tanto diferente las de “hidratación del cemento”, con mayor incidencia al largo plazo que en el suelo-cemento (Figura 15 izq.), y de “reacción puzolánica” (Figura 15 der.).

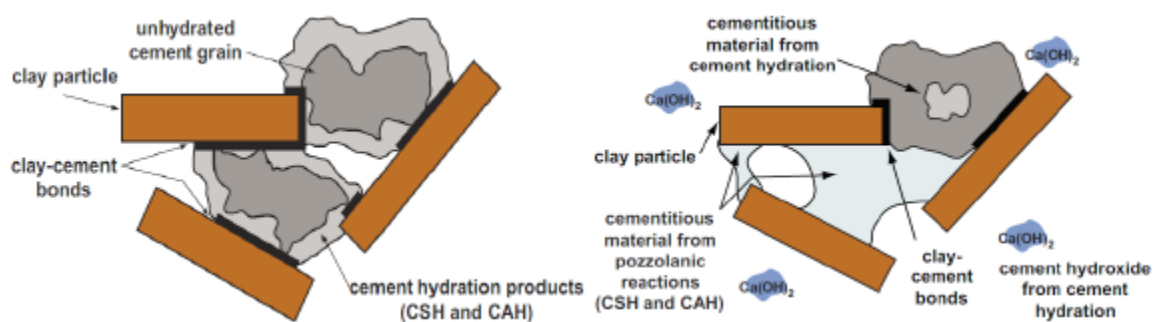


Figura 15. Hidratación del cemento (izq.) y reacción puzolánica (der.) en suelo-cemento-estabilizante. Fuente: Thenoux, 2020.

La reacción de hidratación del grano de cemento es un proceso lento desde su superficie hacia el centro, el que puede permanecer por bastante tiempo seco (Afrin, 2017). En las capas de suelo-cemento-estabilizante el proceso de hidratación no es simple de analizar, involucrándose series complejas de reacciones químicas no del todo conocidas hasta el momento; sin embargo, se sabe que ese proceso se ve afectado por:

- La presencia de materias extrañas o impurezas
- La relación agua-cemento
- La temperatura de curado
- La presencia del estabilizante y sus características
- La superficie específica de la mezcla

Estos aspectos se ponen de manifiesto, por ejemplo, al observar la evolución en el tiempo de la RCI típicas entre un suelo-cemento y un suelo-cemento-estabilizante (Kézdi, 1973), como se puede observar en la Figura 16. En dicha figura puede verse claramente como, para un suelo dado y un contenido del 5 % de cemento, aunque en la capa de suelo-cemento-estabilizante se logran RCI finales mayores, a la edad de análisis habitualmente establecida en las normas y pliegos ésta se encuentra por debajo de las del suelo-cemento. No bien lo manifestado por Kézdi (1973), en las experiencias realizadas por los autores del presente

trabajo, a la edad de 7 días ya se registran en los sistemas suelo-cemento-estabilizante RCI mayores que en los de suelo-cemento, aunque con diferencias a favor no tan notorias como la evolución en el tiempo muestra en la Figura 16.

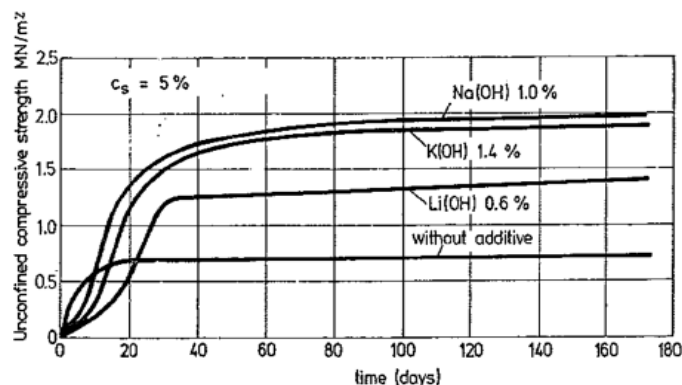


Figura 16. Incremento de la RCI en un suelo-cemento (*without additive*) y en diversos sistemas suelo-cemento-estabilizante ($Na(OH)$ 1,0 %, $K(OH)$ 1,4 % y $Li(OH)$ 0,6 %). Fuente: Kézdi, 1973.

Cabe señalar que los estabilizadores mencionados ahí (todos hidróxidos) son higroscópicos por un lado y su disolución en agua es altamente exotérmica. Un aspecto que posiblemente se manifieste de manera diferente con aditivos radicalmente opuestos en su comportamiento en presencia de agua, como es el caso de los que actualmente se elaboran y comercializan en Argentina como los de más reconocida calidad, entre los que se encuentra CON-AID.

Por otro lado, también existen indicios que para el nivel de bases de suelo-cemento motivo de esta publicación (explicado en el apartado introductorio), a bajos niveles de cemento es probable que las edades de adquisición de los mayores aportes estructurales se vean diferidos en el tiempo aún más que en las definidas por AASHTO como “bases tratadas con cemento”. En la Figura 17 se observan indicios de lo señalado, en un ejemplo de aplicación en el cual las curvas de tendencias de disminución del IP se tornan asintóticas para los contenidos de cemento más elevados y presentan mayores pendientes en los casos de los contenidos más bajos. La existencia de una variación del IP en el tiempo guarda relación con las etapas de adquisición de aporte estructural (Afrin, 2017) señalados en el párrafo anterior.

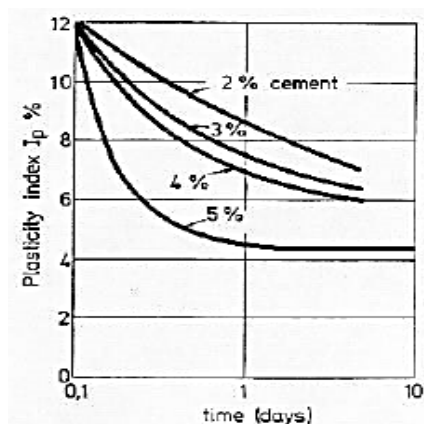


Figura 17. Variación del IP en el tiempo ante diversos contenidos de cemento en un sistema suelo-cemento. Fuente: Kézdi, 1973.

Lo señalado se ratifica al observar las curvas de la Figura 18, asociadas al estudio; más allá de que existen varios análisis que también señalan que la resistencia a los 7 días es “muy pequeña” si se la compara con la que se obtendría a los 90 o incluso 180 días, alcanzándose en rigor recién al año resistencias que pueden considerarse como “Estabilizadas” (IECA, 2009).

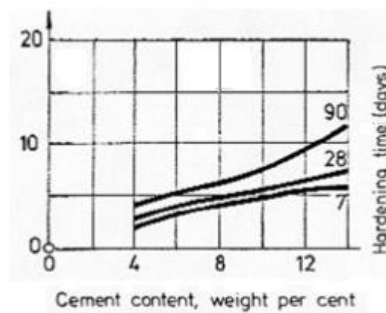


Figura 18. Incremento en el tiempo del RCI en suelo-cemento con un suelo A-4. Fuente: Kézdi, 1973.

A estos efectos se les debería adicionar las tendencias en cuanto a la modificación de la Densidad Seca Máxima que se señalan se registran en los ensayos Proctor realizados, y que no necesariamente se logran de manera instantánea en obra; es más, es sabido que las mezclas suelo-estabilizante llevan en obra amplios periodos de consolidación, incluso ante el paso del tránsito para el que han sido previstas (Rivera, 2020). En tal sentido, cabe señalar que en suelo-cemento un 5 % en menos de la Densidad Seca respecto de la Densidad Seca Máxima puede llevar a entornos de disminución de la RCI de aproximadamente el 25 % (IECA, 2009).

En resumen, de acuerdo a las experiencias de los autores del presente trabajo, por un lado, se encuentra en mezclas suelo-cemento-estabilizante el aumento de la Densidad Seca Máxima, por otro lado, se registra la dificultad de lograr altos porcentajes de densidad en campo inicial en cualquier mezcla suelo-cemento (con o sin estabilizante) y, por un tercer lado, existen antecedentes del efecto de consolidación en el tiempo de mezclas suelo-estabilizante (con o sin cemento).

En las mezclas suelo-cemento-estabilizante corresponde profundizar, entonces, cómo se obtiene una resultante de estos aspectos en pugna, en vistas a generar mayor volumen de antecedentes al respecto.

No obstante, todo lo expuesto permite deducir que la edad de referencia de 7 días para el análisis de los resultados de ensayos de laboratorio para caracterizar a las mezclas suelo-cemento-estabilizante de forma definitiva resultan exiguos (lo cual no quiere decir que no sirvan a manera de referencia, por ejemplo, para establecer la apertura al tránsito de un tramo); mucho más si luego esos resultados son utilizados como identificatorios de la respuesta estructural esperable para la capa, y que es utilizada en el diseño estructural de la vía. A partir de esto, se deduce que pliegos de obra actuales, como los ya mencionados, si bien contemplan por primera vez de manera acorde y abierta el empleo de este tipo de soluciones, no conforman del todo los aspectos técnicos, pues siguen estableciéndose como parámetro fundamental, por ejemplo, una RCI de los 7 días de edad. Nuevamente, no se observa que esto esté mal, pero sí que es insuficiente como para permitir detectar los reales

beneficios de una capa suelo-cemento-estabilizante y su consideración estructural en el tiempo, que si se observan en los ejemplos de obra citados.

Esto no debería resultar en un inconveniente a los plazos habituales de obra, pues debido a las características enunciadas, que las capas suelo-cemento-estabilizante no sería problema se liberen al tránsito sin capa de cobertura a partir de esos 7 días, como si lo es en el caso de las “bases tratadas con cemento” de AASHTO; aunque resultaría conveniente, al menos tentativamente, tender a la colocación de la capa de rodamiento de cobertura como mínimo a los 28 días. Estas medidas, además de servir en todos los casos para asegurar la adecuada adquisición del aporte estructural máximo esperable, resultaría fundamental para lograr una adecuada terminación en el caso de tenerse contemplado contar con una capa de rodamiento final tipo tratamiento bituminoso; o alguna otra que pueda reflejar tempranamente la consolidación “adicional” esperable.

Es importante destacar también que para este segmento de aplicaciones (Nivel B), se encuentra la problemática complementaria de que en muchos casos son vías de comunicación en las que no puede interrumpirse el tránsito, lo que trae aparejado no solo inconvenientes a la hora de estabilizar todo el ancho de la calzada, sino que también resulta en muchos casos imposible no permitir su circulación hasta al menos se completen los 7 días de curado que establecen las especificaciones. Esto también debe tenerse en cuenta a la hora de la adecuación del diseño realizado en laboratorio.

ONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las capas de suelo-cemento-estabilizante son una opción adecuada cuando se las considera en el nivel de exigencia que les corresponde.

Químicamente, en estas capas hay un incremento en la reacción secundaria del cemento (puzolánica) respecto de las capas suelo-cemento. Además, físicamente se modifica la reología del material fresco, mejorándose su capacidad de densificación en el tiempo (notar que ya desde un comienzo hay un cambio de tendencia en la Densidad Seca Máxima en comparación con bases sin estabilizante). Esto hace que se demore más en alcanzar la resistencia, pero que la capa se fisure menos y luego supere la resistencia para un determinado porcentaje de cemento de una capa suelo-cemento, si no lo hizo ya a la edad de 7 días, generándose en un plazo mayor diferencias relativas marcadas a favor.

En concreto, se cuenta con incrementos en las Densidades Secas Máximas, capacidades de densificación en el tiempo, mayores Resistencias a Compresión Inconfinada a plazos amplios y menor potencial de fisuración, todo esto en diferentes grados según los materiales en particular aplicados, cuando se trata de sistemas estabilizante-suelo-cemento de manera comparada con los suelo-cemento.

Si bien en las experiencias propias narradas se han utilizado diferentes tipos de cementos, la sugerencia sería la utilización de cementos sin mayores adiciones, para no reducir el contenido de *clinker* (solo la componente del *clinker* estaría contribuyendo a la hidratación del cemento).

Existen estudios que permiten predecir la posibilidad de disminuir los contenidos de cemento o, al menos, esperar un incremento de aporte estructural ante un mismo contenido; sin embargo, esto debe ratificarse, por ahora, en cada caso en particular.

Existe una tendencia en los proyectos viales a contemplar con diversos elementos su inclusión, lo cual es un avance, pero que no sería suficiente, pues sería necesario pensar en nuevos plazos de referencia en los análisis de su implementación.

REFERENCIAS

- AASHTO (1993). Guide for design of pavement structures 1993. American Association of State Highway and Transportation Officials, ISBN 1-56051-055-2, EEUU.
- Afrin, H. (2017). A review on different types soil stabilization techniques. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, vol. 3, n. 2, pp. 19-24. Doi: 10.11648.j.ijitet20170302.123.
- Hansen, O., Poletti, A., Botasso, G., Rivera, J. (2012). Con-Aid Super® en estabilizaciones de suelo-cemento, experiencias de laboratorio. CON-AID Argentina S.A., 8 p.
- IECA (2009). Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, ISBN 978-84-89702-23-3.
- IECA (2013). Estabilización de suelos con cemento. Guía Técnica, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.
- Kézdi, Á. (1973). Stabilisierte Erdstraßen: mit 50 Tabellen. Verlagfür Bauwesen, VEB.
- Laguros, G. (1962). Effect of chemicals on soil-cement stabilization. Iowa State University. Digital Repository. Retrospective Theses and Dissertations.
- NAP (2009). Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials. The National Academies Press, Washington. <https://doi.org/10.17226/22999>.
- Porro, A., Villanueva, M., Sosa, G., Rivera, J. (2018). Desarrollo de metodología de evaluación de aptitud en bases viales de suelo, cemento y estabilizante químico. *Revista Tesis de Becarios LEMaC*, n. 12, pp. 5-9.
- Rivera, J. (2020). Algunas experiencias en el empleo de residuos de procesos en capas de rodamiento de caminos rurales y recomendaciones que surgen de las mismas. *Revista Vial*, n 135, pp. 38-43.
- Rivera, J., & Botasso, H. (2019). Guía de metodologías y procedimientos para uso vial desarrollados en el LEMaC. edUTecNe, Universidad Tecnológica Nacional, ISBN 978-987-4998-27-9, 2° Edición.
- Rivera, J., Botasso, G., Poletti, A. & Hansen, O. (2011). Estudio de comportamiento del aditivo químico de suelo con-aid súper® en distintos tipos de suelos y ante incorporación de otros materiales de estabilización. Universidad Tecnológica Nacional, 1ª ed. - Buenos Aires. ISBN 978-950-42-0135-9. p. 38.
- Rivera, J., Porro, A., Poletti, A. & Hansen, O. (2018). Economía en calles sin pavimentar de suelo-cemento por uso de agente estabilizante. *Revista Argentina de Ingeniería*, del Consejo Federal de Decanos de Ingeniería, año 6, vol. 12, pp. 41-46.
- Thenoux, G. (2020). Ingeniería de caminos de bajo volumen de tránsito. CAF Banco de Desarrollo de América Latina.