

REPARACIÓN DE CAMINOS FORESTALES
COMPARACIÓN DE NUEVAS TÉCNICAS CON LAS SOLUCIONES TRADICIONALES

Miguel López-Bachiller Fernández
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
miguel@firmesecologicossoltec.com
Firmes Ecológicos Soltec, s.a.
www.firmesecologicossoltec.com

INDICE

1. Introducción. Presentación del trabajo
2. Objetivos de la investigación
3. Metodología científica
4. Estado del conocimiento:
 - 4.1 Características de los caminos
 - A. Cargas que pueden soportar,
 - B. Comodidad en la rodadura,
 - C. Consideraciones estéticas,
 - D. Otras características relacionadas con el trazado en planta y en alzado.
 - 4.2 Causas que producen deterioros
5. Soluciones tradicionales
 - 5.1 Definición y características de las mismas
 - 5.2 Criterios de selección del tipo de reparación: materiales, espesores
 - 5.2.1 Estudio detallado de estas soluciones
 - 5.2.1.1 Empleo de materiales locales. Mejora de cada una de las características base de los caminos
 - 5.2.1.2 Empleo de materiales de aportación que no están dentro de la obra
 - 5.2.1.3 Forma de llevar a cabo estas soluciones
 - 5.3 Costes de las reparaciones
 - 5.4 Durabilidad

6. Otras alternativas: las estabilizaciones
 - 6.1 Características y definición de estabilizaciones. Conglomerantes más utilizados. Empleo óptimo de cada uno. Diferencias entre uno y otro. Otros conglomerantes.
 - 6.2 Comportamiento de los suelos estabilizados en cuanto a las características que debe cumplir un camino.
 - 6.3 Costes
 - 6.4 Durabilidad
7. Cálculo de coste a largo plazo
8. Un caso de aplicación práctica
 - Descripción del problema
 - Soluciones adoptadas
 - Ejecución del trabajo
 - Ensayos efectuados
 - Resultados
9. Conclusiones y futuras líneas de actuación
10. Fuentes bibliográficas y de información

1. Introducción. Presentación del trabajo

La red de caminos o vías rurales de comunicación supone una longitud superior a la red de carreteras tanto en España (1) (2), en los países desarrollados como también en aquellos en vías de desarrollo (3).

En nuestro entorno económico y social, esta red permite la comunicación de infinidad de pequeños núcleos, y también da servicio a un gran número de actividades que no serían posibles sin la misma, desde las puramente económicas como son la explotación de los bosques o de terrenos agrícolas, hasta otras más relacionadas con el ocio como el senderismo o el turismo rural (Fig 1).

También permite el mantenimiento y la conservación de nuestros bosques, dando acceso de manera permanente a extensas zonas a las que no se puede llegar por otros medios que no sean aéreos, permitiendo la vigilancia, el mantenimiento y la explotación de estas superficies.

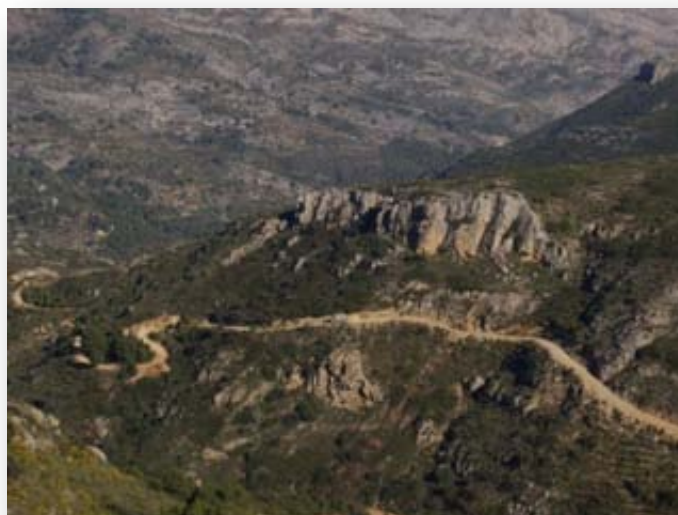


Fig. 1 Camino para mantenimiento forestal en Castell de Cabra (Alicante)

Pero no ocurre lo mismo en otros puntos de nuestro planeta: en muchos lugares los caminos son la única conexión de un gran número de personas con el resto de la civilización (4) (3).

Para un correcto mantenimiento de la red de caminos, igual que en el resto de las redes, es necesaria una buena planificación y una inversión mínima en estas labores. Se considera necesario invertir en ello un 2% de su valor patrimonial (5).

El mantenimiento de estos caminos se ha llevado a cabo hasta la fecha con presupuestos muy pequeños, siendo necesario con mucha frecuencia tener que volver a gastar dinero en el mismo camino una vez transcurrido un periodo demasiado corto: parece que no han terminado de arreglar el camino cuando ya está otra vez estropeado y hay que volver a arreglarlo. En algunos casos se llega a unos métodos de mantenimiento acordes con la forma de vida

y la población que habita en cada tramo del camino (6). Esta forma nos lleva a recordar las antiguas casillas de peones camineros, ya desaparecidas casi por completo, en las que vivía la familia del peón que se encargaba del mantenimiento de un tramo determinado de carretera.

Las reparaciones de bajo costo con frecuencia llevan consigo una vida útil muy corta. Reparaciones más costosas, que no más caras, llevan consigo una mayor durabilidad, de manera que se puede calcular el dinero invertido por superficie, o por longitud, de camino en un periodo prolongado (7).

Las características de los firmes de estos caminos no son las mismas que las de las carreteras mediante las que se accede a ellos. Con frecuencia, además de permitir el paso del tráfico de la zona, deben conservar el aspecto de rústico o forestal (fig 2), no siendo posible cubrirlos con capas asfálticas o de hormigón, que aunque le prolonguen el periodo de vida útil, cambian el



Fig. 2 Camino peatonal en Rascafría (Madrid)

aspecto de los mismos.

En muchos casos incluso se pretende que sigan teniendo apariencia de caminos, como puede ser el objetivo de la Philipstown Dirt Road Association (8).

En otros, la conversión o no en caminos pavimentados ha de hacerse después de tomar en

consideración tanto los presupuestos, como el tráfico e incluso la opinión de los usuarios que los utilizan (9).

Los trabajos que se han estudiado sobre este tema van desde la planificación de los caminos hasta diferentes técnicas para su construcción y mantenimiento. Se han tomado en cuenta varias de las ponencias del congreso que se celebra cada cuatro años en Estados Unidos sobre carreteras de baja intensidad organizado por el Transportation Research Board, del que la novena edición tuvo lugar en Junio 2007 en Austin (Texas, EEUU).

La planificación pasa por obtener un inventario de la red, una clasificación de los caminos según uno o varios criterios y una optimización de los recursos que es necesario poner a disposición para un correcto mantenimiento.

La optimización de recursos pasa por realizar unos tramos de prueba con varias soluciones y control de las mismas varios años después de su puesta en servicio (10), de manera que pueda comprobarse con datos reales cuántas veces es mejor un sistema de conservación que otro (Fig 3).

Como medida adicional de bajo coste, se contrasta que en otros países el bombeo que se da al firme es el doble del que estamos habituados (4 % frente al 2 % en nuestro territorio) habiendo comprobado que el funcionamiento con bombes más altos es mucho más duradero.

Tal es la importancia del mantenimiento de estas vías de comunicación que se estudian otras medidas para prolongar su vida útil como la de dotar a los vehículos pesados que circulan por ellas de dispositivos capaces de bajar la presión de las ruedas desde la cabina con el objetivo de minimizar la presión de las ruedas sobre el camino (11).



Fig. 3 Reparación tradicional de limpieza de bordes y cunetas

2. Objetivos de la investigación

El objetivo de este trabajo es estudiar las soluciones que se han proyectado y ejecutado a lo largo del tiempo en diversos ambientes socio-económicos para la reparación y mantenimiento de los caminos, así como otro tipo de soluciones alternativas que pudiera haber y proponer un método sencillo para llevar a cabo la reparación que sea necesario llevar a cabo con las técnicas más convenientes en cada caso en nuestro país y época.

El estudio de las soluciones pasa por ver qué características de los caminos son las que se deterioran y cómo actuar sobre ellas. Una vez fijadas estas características, se verá cómo diferentes métodos de reparación tienen repercusiones diferentes.

En definitiva, se trata de proponer un nuevo planteamiento para la construcción, reparación y mantenimiento de caminos en los que el objetivo no sea otro que mantener un nivel de servicio determinado (fig 4). Para ello puede que sea necesario redefinir este concepto, "nivel de servicio", para los usuarios de caminos (Present serviceability Index, PSI) (9).

3. Metodología científica

La metodología a seguir pasa por una búsqueda exhaustiva de las investigaciones que se han llevado a cabo sobre este tema, tanto en España como en el resto del mundo.

Una vez analizados los problemas que afectan a los caminos, ver cuáles son las soluciones que se han aportado, cómo han funcionado y qué elementos, circunstancias o soluciones todavía no están suficientemente estudiadas.



Fig. 4. Típico camino pendiente de reparación en Ademuz (Valencia)

Con estos datos, se propondrá un abanico nuevo de soluciones y ver cómo poder comprobar que son correctas o aplicar las experiencias existentes en carreteras y aeropuertos con estas soluciones para el caso de los caminos.

Se terminará el trabajo con un estudio sobre un caso concreto, problemas que existían, soluciones adoptadas y funcionamiento de las mismas y un estudio de costes sobre la solución adoptada.

4. Estado del conocimiento.

Fue la introducción de la rueda (Fig 5) y la aparición de los vehículos de tracción animal, que puede fecharse en el cuarto milenio antes de nuestra era, lo que dio lugar al verdadero inicio de un transporte por caminos que podría considerarse como antecesor del actual. Se desarrollan vehículos ligeros y rápidos tirados por caballos para el transporte de personas, especialmente con fines militares, y vehículos lentos para cargas pesadas tirados por bueyes, porque los primitivos atelajes no permitían una eficaz utilización de la fuerza de los caballos.



Fig. 5 Estado de algunos caminos en la fecha de la aparición de los vehículos a motor

Para poder obtener el mejor rendimiento posible de estos vehículos fue preciso contar con una adecuada superficie de rodadura (Fig. 6), que los caminos para peatones y animales no ofrecían (12). Vemos que el problema no es nuevo (Fig 7).

Una innovación importante fue el transporte por canales, pero su escaso desarrollo permite afirmar que en España no existió la "Época de los canales", al menos como se entiende esta expresión en la historia de los transportes europeos y de los Estados Unidos (13).



Fig. 6 Algunas soluciones de la época

La **definición** del diccionario de la Real Academia de la Lengua dice lo siguiente: (14)

camino.

(Del celtolat. *camminus*, voz de or. hisp.; cf. celtíbero *camanon*).

1. m. Tierra hollada por donde se transita habitualmente.
2. m. Vía que se construye para transitar.
3. m. Jornada de un lugar a otro.
4. m. Dirección que ha de seguirse para llegar a algún lugar.
5. m. Modo de comportamiento moral.
6. m. Adecuación al fin que se persigue.
7. m. Medio o arbitrio para hacer o conseguir algo.
8. m. Cada uno de los viajes que hacía el aguador o el conductor de otras cosas.

La verdad es que ninguna de las acepciones tiene desperdicio, pero no tenemos más remedio que quedarnos con alguna de ellas para el propósito que nos ocupa. Preferiblemente la segunda: Vía que se construye para transitar.

Esta definición abarca gran diversidad de caminos, carreteras o vías de alta capacidad, por lo que no define exactamente el objeto de este trabajo.

Ahondando más, pueden definirse los caminos rurales como aquellas vías de transporte cuya finalidad principal es la de facilitar la circulación de vehículos y maquinaria para el transporte de bienes o personas para uso comercial y también social o recreativo (15).



Fig. 7 Calzada romana del Puerto del Pico en Ávila. Un buen ejemplo de durabilidad

Sigue faltando algo. Quizá sea mejor acompañar la definición de "camino" de sus características comunes: secciones estrechas, rara vez por encima de los 5,0 metros, siendo 3,5 lo más frecuente, cuya superficie normalmente está formada por tierra de la mejor calidad dentro de la disponible en la zona: zahorra, a ser posible con algo de cohesión pero rara vez protegido por capas asfálticas, aun en su versión más rudimentaria y económica, que habitualmente discurre por encima de la tierra, no habiéndose gastado mucho esfuerzo o recursos en mejorar la rasante, ni longitudinal ni transversal, adaptándose al terreno.

La diferencia fundamental con las carreteras es que en éstas se debe permitir la circulación de vehículos a unas velocidades mínimas determinadas (16).

Para la construcción de los caminos no es necesario aportar material alguno. Suele darse el nombre de pistas a aquellos caminos que se han formado por el paso de vehículos o incluso una máquina tipo bulldozer y caminos a aquellos en los que se ha aportado algo de material, bien del propio entorno o de una cantera o procedencia externa (17).

4.1 Características (Cualidades) de los caminos:

Ya a principios del siglo XX había cierta preocupación por la calidad de los caminos, o, dicho de otra forma, por los inconvenientes que tenía el circular por alguno de ellos (18).

En el siglo XVIII se recuperó el concepto de obras públicas que los romanos habían perfilado siglos antes. Fue entonces cuando se empezaron a construir sistemáticamente los caminos pavimentados que darían lugar a las futuras carreteras tal y como las tenemos conceptuadas hoy día (12).

En un artículo publicado en la ROP en Julio de 1907 se hace mención a que la supresión del polvo en los caminos había llegado a ser una verdadera necesidad, tanto desde el punto de vista higiénico como del económico, y se proponen varias medidas y se cuentan algunas experiencias de cómo en el resto del mundo, Estados Unidos y Francia, se comenzó a dar solución a este problema.

El problema del polvo y del barro sigue vigente como lo demuestran diversos estudios sobre cómo se produce y las diferentes formas que existen para evitar tales efectos (19) (20) (21).

La emisión de polvo suelto en el camino se relaciona también con la contaminación del entorno y con la pérdida de materiales en el camino, que entran en los cauces de las aguas de la zona de la que se trate, contaminando

dichas aguas, de ahí el interés que tiene el control de la erosión en los caminos (22).

Los tiempos han cambiado y las prestaciones que debe dar un camino se han modificado también (mayores cargas, menores tiempos de recorrido, mayor suavidad en la rodadura, labores de mantenimiento menos costosas) (fig 8), aunque no en lo sustancial: servir de comunicación entre dos lugares de una manera más o menos cómoda, adaptando el concepto de comodidad a cada una de las diferentes épocas.



Fig. 8 Camino forestal casi intransitable formado a partir sólo del suelo de la zona

4.1.1 Cargas que pueden soportar

Podríamos dividir los caminos en aquellos que soportan una cierta actividad económica relacionada con el espacio que atraviesan, como puede ser la explotación de bosques, o la agricultura por la que entran o salen mercancías en vehículos pesados (camiones), y aquellos que no soportan el paso de camiones más que los necesarios para la reparación del propio camino y por lo tanto los vehículos que circulan por encima son ligeros (peso inferior a 2.000 kg/vehículo).

La resistencia a las cargas es una característica que se puede medir con los aparatos de los que se dispone actualmente en los laboratorios homologados, de los que hay un buen número.

Es por lo tanto un parámetro del que se puede dar un valor objetivo.

4.1.2 Comodidad en la rodadura

Esta característica determina la calidad del camino para cualquier tipo de usuarios: tanto aquellos que transitan por el camino simplemente por disfrute, como aquellos otros que lo utilizan para transportar cargas o para acceder a zonas por motivos de trabajo (vigilancia) o estancia (vivienda habitual u ocasional) (Fig 10).

Podría compararse, en un tramo determinado, para evaluar la mejora con una actuación, la velocidad de desplazamiento de un vehículo tipo, pero sería necesario efectuar la medición antes y después de la reparación con un mismo vehículo e incluso con un mismo conductor. Para que la medición pudiera calificarse de objetiva, podría llevarse a cabo la misma con una muestra suficientemente grande de vehículos y conductores, por ejemplo 100, lo que hace que este sea un método inviable en la práctica, ya que el coste de la medición de este parámetro puede llegar a ser del mismo orden de magnitud que el de la reparación efectuada.

Para este cometido se ha empleado en algunas ocasiones el IRI, que a pesar de todas las imprecisiones e inconvenientes que tiene el realizar el ensayo en caminos, no deja de ser un elemento que puede servir de comparación entre dos soluciones tomadas (23).



Fig. 9 La estética prima en el tratamiento del firme de este aparcamiento de coches en un Hipódromo

4.1.3 Estética

El desarrollo de nuestra sociedad nos permite disponer de tiempo para el disfrute de zonas de nuestro territorio que hace pocos años ni imaginábamos. Cada vez más, los usuarios piden espacios "naturales" sin alterar (fig 9), lo que implica caminos con aspecto de que la mano del hombre no los ha contaminado.

Existen incluso asociaciones con el ánimo de disfrutar de este tipo de vías y procurar su mantenimiento tal y como están, como es el caso de la citada anteriormente Philipstown Dirt Road Association (8) o la Asociación de Amigos de los caminos (24) entre otras muchas.

Eso por supuesto no quiere decir que sean incómodos o estén mal trazados, sino que habitualmente se traduce en que no han sido asfaltados, en ninguna de sus variantes.

En el ámbito de la construcción actualmente tampoco se cuenta con parámetros objetivos para cuantificar la bondad o no de la estética en una obra determinada, ni siquiera para comparar el resultado entre el antes y el después de la reparación.

Parece prudente o razonable, pensar que algunos aspectos paisajísticos, por lo menos no han bajado de categoría después de la reparación, o, si se prefiere, proyectar la reparación con elementos que no disminuyan la condición estética de la obra.

Como ejemplo fácil de entender y de aplicar podría citarse el hecho de que si un camino determinado no tiene asfalto en ninguna de sus variantes (aglomerado asfáltico en caliente, o en frío o riegos asfálticos), debiera dejarse la obra una vez reparada también sin asfalto.

Esto, que puede parecer tan sencillo, puede complicarse hasta el infinito, en cuanto que, por ejemplo, se tengan en cuenta aspectos inherentes a los suelos, como por ejemplo el tono rosáceo de algunos suelos calizos: considerar en el proyecto si se debería mantener o no dicho tono rosáceo, tal y como ha ocurrido en alguna obra concreta.

4.1.4 Características relacionadas con el trazado en planta o en alzado

Las condiciones que debe cumplir un camino en cuanto al trazado están relacionadas con los vehículos que tienen que transitar por ellos.

De cualquier forma, las pendientes longitudinales suelen limitarse al 12 ó 15 %, aunque existe un gran número de caminos con pendientes hasta un 20 y 22 %. En cuanto a los radios de curvatura, el radio mínimo lo marca el radio del camión o carroceta que tenga que circular por ellos en los servicios contra incendios o en las labores de explotaciones madereras o agrícolas.

La forma del perfil transversal sí que condiciona la durabilidad del firme. Generalmente en nuestro entorno se habla de un bombeo con

caídas del 2 % hacia cada lado (25) mientras que en otras publicaciones se habla de mantener el 4 % para conseguir mayores duraciones del firme (17) (9), aunque un bombeo excesivo puede dar origen a problemas en zonas con heladas frecuentes y también inducir a los usuarios a circular sólo por el centro de la calzada.

A la hora de reparar un camino, sólo el mantenimiento o no de la anchura del mismo puede ser un factor suficiente para determinar la forma de repararlos.

Se dispone de parámetros objetivos que puedan dar idea de la calidad de una obra determinada, tales como los radios de las curvas, los Kv de los cambios de rasante y las pendientes, aunque las limitaciones de estos parámetros no pueden copiarse de los de las carreteras, teniendo éstos últimos muchas más restricciones.



Fig. 10 Camino muy deteriorado por lluvias, tráfico y una falta de mantenimiento

La pérdida de cualquiera de estas características es lo que hace que el camino pierda su condición de tal y deba ser reparado.

Independiente mente de las causas vistas más arriba, parece que la creación de un inventario de

los caminos, clasificados según

la funcionalidad, el estado de conservación del mismo, el diseño y el tráfico que soportan, es muy importante a la hora de fijar una prioridad y un método para su mantenimiento (1).

4.2 Causas que producen deterioros en los caminos

Los enemigos de los caminos son los mismos que los de cualquier otra carretera: el tráfico y el agua junto con el resto de la climatología (26) (22).

Por supuesto que cualquier combinación de los dos supone un deterioro mayor.

Además de los efectos de pérdida de capacidad soporte en el suelo, el agua en los caminos tiene otro efecto muy destructivo también debido a la falta de protección de éstos: la erosión. Este efecto se agudiza en cuanto que la pendiente supera el 8 o el 10 %, tanto en suelos granulares como suelos finos.

5 Soluciones tradicionales

5.1 Definición y características de las mismas



Fig. 11 Típica reparación de bajo presupuesto: tapar los baches

Las soluciones han de estar encaminadas a paliar los defectos antes mencionados:

- Falta de capacidad de soporte (Fig 12)
- Falta de comodidad en la rodadura por presencia de baches, cárcavas u otros defectos superficiales (Fig 11), lo que también afecta a un
- Deterioro de la estética del camino.
- Deterioro en el trazado en planta o alzado.



Fig. 12 Reparación importante con aportación de material para el firme

No hablaremos aquí de las soluciones de cambios en el trazado, ya sea en planta o en alzado por no ser objeto de este estudio, aunque como se verá más adelante, las soluciones adoptadas sí tendrán influencia en la anchura total que quede después de la reparación.

Las reparaciones que se están llevando a cabo actualmente podrían definirse de manera resumida como aportación de materiales en general no plásticos o poco plásticos, con granulometría bien graduada, sobre los caminos actuales, con escarificado o no del camino actual.

Los espesores de estas reparaciones vienen condicionados fundamentalmente por el coste, siendo habitual proyectar incremento de espesores por debajo de los 10 cm.

Incluso en muchos casos simplemente se trata de un reperfilado a veces incluso sin escarificación previa del suelo existente (17) (26).

Las soluciones que se están aplicando para mejorar los dos defectos anteriormente mencionados tienen que cumplir con las siguientes condiciones:

- Fáciles de aplicar, empleando maquinaria que sea fácil de encontrar en el mercado
- Fáciles de controlar: que los laboratorios existentes en cualquier zona conozcan y utilicen habitualmente
- Con apoyo en la normativa vigente suficiente para cualquier administración
- Técnicas disponibles por contratistas locales aunque sean poco tecnificados
- Los materiales que se vayan a utilizar deben estar relativamente cerca del punto de empleo para minimizar costes y posibles deterioros de caminos colindantes.

5.2 Criterios de selección del tipo de reparación: materiales y espesores

Desde el gabinete hay una forma sencilla de calcular en cuánto hemos mejorado la resistencia a las cargas aportando un mejor material: Se puede calcular el módulo de elasticidad o las deflexiones de dos paquetes diferentes.

Algunas publicaciones incluso dan los espesores de materiales a colocar como una fórmula directa en función del CBR y del tráfico diario de la capa superior de los caminos (17).

También se puede utilizar cualquier programa multicapa de cálculo de firmes de carreteras existente en el mercado. Por su sencillez de manejo y ser un programa libre, haremos algún ejemplo con el Icafir (27), programa empleado por la Junta de Andalucía para el cálculo de explanadas y paquetes de firme, que tiene la particularidad de que a cada tipo de suelo que se coloque en cada capa le confiere siempre las mismas características en cuanto a módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson, cuyos valores se pueden conocer, pero que el usuario no tiene la posibilidad de cambiar a su conveniencia.

En la práctica, el resultado en cuanto a módulo o a deflexiones obtenido no va a coincidir con el que se mida con los ensayos habituales, pero sí nos puede dar una idea de lo que se mejora con un material respecto a otro.

Una vez establecida una explanada, calculamos mediante el programa Icafir las deflexiones y el módulo de compresibilidad de la estructura.

Si sobre esa explanada colocamos un paquete de firme, que en nuestro caso sería a base de Zahorra Natural, Zahorra Artificial o Suelo Estabilizado, el programa nos daría el número de ejes equivalentes que soportaría dicho paquete.

Las secciones de firme que podemos colocar para la reparación de caminos rurales es tan débil que no soportaría ni las condiciones mínimas de paso de tan siquiera un vehículo pesado.

Por lo tanto, lo que haremos será ver cómo varía el dato de las deflexiones teóricas y el módulo de compresibilidad con cada una de las soluciones.

5.2.1 Estudio detallado de estas soluciones:

5.2.1.1 Empleo de materiales locales.

Entendemos como materiales locales aquellos que se obtienen de un préstamo dentro del propio trazado del camino o muy cerca, como dragado de arroyos cercanos a la traza, en contraposición de aquellos materiales adquiridos en alguna cantera, ya sean éstos naturales o elaborados mediante machaqueo de rocas.

El empleo de materiales locales tiene varias partes bien diferenciadas:

Por una parte la calidad del propio material.

Por otra, la cantidad de material aportado por superficie de camino terminado.

También, la forma en que este material es aportado.

Hasta hace algunos años lo habitual era extraer pequeñas cantidades (algunas centenas o miles de metros cúbicos) de material para estas reparaciones, en el entorno del propio camino. Por eso, las características del material, en cuanto a limpieza o granulometría se relegaban a un segundo plano de importancia, siendo el dato prioritario el de la proximidad a la obra, con el objeto de reducir el coste.

De esa manera, el trabajo quedaba hecho, la obra reparada y la propiedad conforme con haber podido dar un servicio a los usuarios.

En ese momento no se tenían en cuenta ni posibles afecciones medioambientales, ni se calculaba el coste de la reparación a plazos diferentes que el inmediato.

El empleo de estos materiales da solución a los deterioros de la siguiente forma:

En cuanto a la característica A) Resistencia a las cargas que afectan al camino.

Su aportación es dudosa, y al menos no generalizable, ya que habitualmente no se piden datos de la capacidad de soporte del material aportado. En cualquier caso, las capas de nueva aportación suelen ser muy delgadas (se proyectan aportaciones de 10 cm de espesor, a veces sin especificar si se trata de espesores medios en un tramo concreto de camino o espesores mínimos que se deben aportar en cualquier punto del camino).

De cualquier forma, es raro también medir el incremento de capacidad de soporte una vez terminada la obra mediante ensayos de placa de carga, o viga Benkelmann o cualquier otro que nos de idea de dicha capacidad.

En cuanto a la característica B) Comodidad en la rodadura

En general puede decirse que queda notablemente mejorada de manera instantánea una vez terminada la obra de reparación que se trata.

Otra cosa es la durabilidad de esta reparación en cuanto a esta característica concreta. Con frecuencia la bondad de estas reparaciones no dura más de dos temporadas de lluvia.

En cuanto a la característica C) Estética

La aportación de materiales locales rara vez modifica los parámetros entre antes y después de haber efectuado la reparación.

Puede que se haga aportación de suelo sobre un camino asfaltado, aunque sea sólo con un simple tratamiento superficial, por lo que desaparece todo el asfalto visible.

En cuanto al punto D) Características relacionadas con el trazado en planta o en alzado

La aportación de materiales locales suele tener como consecuencia una disminución de la anchura disponible.

Si los bordes de las capas que se extiendan de estos materiales deben tener pendientes próximas a la relación 2/1 (horizontal/vertical), cada centímetro de incremento de espesor se traduce en la reducción de 2 centímetros por cada lado. Para una capa de 10 centímetros, la reducción con la que hay que contar es de 20 cm por cada lado, o sea, un total de 40 cm.

En principio, para un camino de ancho total de 6 metros, dejarlo en 5,60 puede ser muy importante (6,7 % de la anchura) pero no determinante. Sin embargo, en el caso de caminos muy estrechos, 2.50 ó 3.00 m, de los que hay un buen número, la reducción de 40 cm supone un 15 %, cifra más que considerable.

Más importancia que el porcentaje de la reducción, en el caso de caminos muy estrechos, el problema puede llegar a ser grave, ya que mientras que por un camino de 2,50 m de anchura es fácil transitar, por uno de 2,10 puede que no lo sea tanto, llegando incluso a ser difícil para vehículos grandes.

Por otra parte, el hacer los recrecimientos extendiendo material en más anchura que las capas de apoyo para no perder ancho de camino, puede que quede bien en la fecha de entrega de la obra, pero sin embargo al cabo de pocas lluvias el material que no tiene buen apoyo, sin duda caerá a las cunetas, aterrándolas, de manera que no sólo no se soluciona el problema a corto plazo, sino que se crea otro nuevo como es el aterramiento de las cunetas y elementos de desagüe.

Para este tipo de reparaciones es imprescindible tener en cuenta las condiciones de entorno en la fecha de la reparación (fig 13).

5.2.1.2 Empleo de materiales de aportación que no están dentro de la obra.

En algunos casos, la solución adoptada se lleva a cabo mediante la aportación de materiales cercanos a la obra, pero de calidad más o menos contrastada como puede ser la aportación de una Zahorra artificial de una cantera cercana. En otros casos el material aportado es Macadam.

Los primeros firmes de macadam estaban constituidos por piedra machacada o recién partida de tamaño seleccionado que se extendía y encajaba sobre la explanada en sucesivas tongadas que eran posteriormente recebadas. Inicialmente el encaje se confiaba a la acción del tráfico; pero pronto, con la aparición de los primeros medios mecánicos de compactación, se procedió a su apisonado durante su proceso de construcción (12). A pesar de su buen comportamiento durante muchos años, hoy día es muy difícil ver en alguna obra el empleo de Macadam.

El comportamiento de estos materiales de aportación de mejor calidad que los extraídos en la zona de la obra es ligeramente mejor habida cuenta de su mayor calidad, pero sólo en lo que se refiere a la resistencia a las cargas de las capas, ya que en el comportamiento es igual que en el caso de emplear materiales locales en cuanto a comodidad, estética y trazado.

La aportación de materiales que no están dentro de la obra tiene un grave inconveniente: Los propios camiones que acarrean hacia la obra en reparación nuevos materiales, deterioran no sólo el camino que se está reparando, sino también todos aquellos por los que se circula.

Podría afirmarse que en un buen número de ocasiones, las cargas a las que se ven sometidos tales caminos son las mayores que soportarán durante toda su vida útil.

En efecto, muchos de estos caminos tienen una capacidad de soporte muy limitada.

Si el tráfico que los transita se limita a tráfico ligero y en época seca, la durabilidad de la red de caminos es suficientemente grande: pueden pasar varios años antes de tener que efectuar ninguna reparación.

Sin embargo, si acarreamos materiales desde puntos fuera del camino que se está reparando, los camiones de transporte utilizados normalmente en las obras están preparados para circular con cargas que pueden superar las establecidas por los organismos competentes en legislación de carreteras, ya que con frecuencia estos camiones desarrollan su trabajo fuera de las

carreteras convencionales y por lo tanto, de los puntos habilitados por la policía para el pesaje de los mismos.



Fig. 13 Evitar en lo posible hacer las reparaciones de escarificado o aportación de material en época de lluvia

Muchas de estas vías están proyectadas y construidas sólo para tráfico ligero, sin contar ni con un solo vehículo pesado, (13 t por eje o más) en todo su periodo de vida.

El paso de una serie de camiones de los que se utilizan normalmente en las obras, cargados, a veces con sobrecarga ya que no tienen que salir a la carretera por ningún motivo, y si coincide con algunos días de lluvia, puede no sólo producir un blandón en un punto determinado, sino dar al traste con todo un itinerario, desde el punto de carga de los suelos hasta el punto de destino, de manera que no es extraordinario que para reparar un tramo de kilómetros se produzca un deterioro enorme en longitudes de viales muy superiores.

5.2.1.3 Forma de llevar a cabo estas soluciones.

Fundamentalmente hay dos formas:

La primera consiste en la aportación directamente al suelo, encima de la superficie existente, sea la que sea, con todos sus defectos y deterioros, tapando los huecos.

La segunda es escarificar el terreno existente, aportar el nuevo suelo, mezclar ambos en un espesor determinado, usualmente al menos 15 cm, y nivelar y compactar nuevamente toda la superficie.

El resultado de la primera forma de trabajo es que se quedan dos superficies que pueden deslizarse entre ellas y el agua puede discurrir por el contacto entre ambas, produciéndose un deterioro mucho más rápido.

El resultado de la segunda es que todo el material debe estar perfectamente unido, con las capas adheridas, con lo que se consigue un mejor funcionamiento del conjunto.

Es necesario hacer una llamada sobre la importancia de la compactación, siendo de sobra conocida la relación directa entre mayor compactación – mayor resistencia y por lo tanto mayor durabilidad (28)

5.3 Costes de las reparaciones

Para llevar a cabo una obra de reparación tradicional de un camino con tierras procedentes del mismo camino o de un lugar cercano, la maquinaria que es preciso aportar es la siguiente:

- Retroexcavadora para la extracción y carga de las tierras
- Varios camiones para el transporte de la misma
- Equipo de nivelación y compactación compuesto por Motoniveladora, rodillo y cuba de agua.

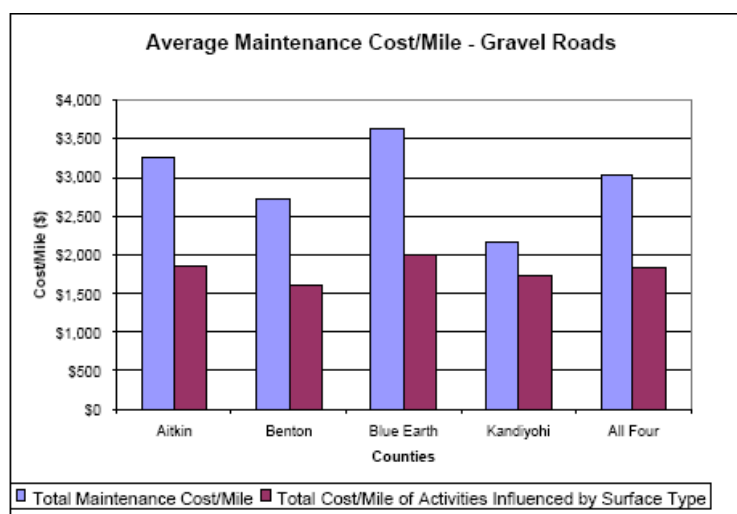


Fig. 14 Coste por milla de mantenimiento de algunos caminos en EEUU

Al ser muy delgado el espesor de la reparación, el rendimiento será muy bajo.

Calcularemos el coste por m² de camino terminado (Fig 14).

El camino tipo para el cálculo del coste será de 10 km de longitud, con un ancho de 4 m y efectuaremos una reparación con aportación de 10 cm de material procedente de la propia obra.

El coste de reparación del sitio de dónde se ha extraído el material o incluso el canon del mismo no deberían considerarse cero, especialmente en entornos en los que se ha cuidado el aspecto exterior.

Consideramos un canon de extracción y adecuación al entorno de 1,0 €/m³.

El coste obtenido es entonces:

| Coste total de la reparación tipo 1: | | |
|--------------------------------------|--|------------------|
| | | €/m ² |
| Transporte de maquinaria a la obra | | 0,15 |
| Maquinaria | | 0,5 |
| Materiales | | 0,2 |
| | | |
| Total coste | | 0,85 |

Tabla 1: Coste por m² de la reparación tipo 1

Este sería el coste de reparación tradicional.

El coste no debe considerarse aislado para cada una de las actuaciones, sino que debe tenerse en cuenta la frecuencia con la que debe repetirse esa operación.

Operaciones más costosas pero más dilatadas en el tiempo pueden ser ventajosas frente a otras más baratas, pero más frecuentes.

5.4 Durabilidad

Realmente la durabilidad es el caballo de batalla (Fig 15).

No conocemos un criterio que supongamos uniforme y claro para todos los agentes implicados en la reparación de caminos para adoptar la decisión de reparar un camino. Hemos visto caminos con una rodadura aceptable y sólo algunos baches, y, en el mismo entorno y dependiendo de la misma Administración, caminos intransitables ni siquiera con un tractor agrícola.



Fig. 15 Durabilidad.

Por eso debemos hacer la extrapolación de “iguales caminos con iguales circunstancias económicas y climatológicas” para adoptar la decisión de reparar o no.

Sólo en algunas obras nos encontramos con zonas ya reparadas con sistemas tradicionales o novedosos en donde podemos comparar si las soluciones adoptadas han sido las óptimas.

Todas las obras se proyectan para un periodo de vida fijado previamente. El periodo de vida determina el coste final de la obra, y muchas veces, también el método constructivo: normalmente, periodos más largos implican costes superiores.

Para algunos tipos de construcciones el periodo de vida se calcula a partir de modelos matemáticos. Por ejemplo, los firmes se calculan teniendo en cuenta las leyes de fatiga de los diversos materiales que los componen.

Hablar de periodos de vida del orden de días o de semanas, en el mundo de la construcción o de las Obras Públicas, no tiene sentido. Sólo empieza a tener sentido hablar de periodos a partir de algunos años: en firmes flexibles, 20

años. En firmes rígidos, 30 años. En el caso de caminos podrían hacerse planes y estudios comparativos de costes en plazos entre 5 y 10 años (9).

En estos casos el periodo de vida se deduce a partir del número de veces que la carga pasa por encima de la estructura construida. Si en un año suponemos que pasan las cargas un cierto número de veces, podemos calcular cuántos años durará en buen estado la estructura antes de llegar a su estado final.

Cuando se habla de cargas, se debe hacer teniendo en cuenta las cargas equivalentes a cargas pesadas, ya que tanto los vehículos de turismo como los camiones ligeros no tienen prácticamente influencia en el comportamiento del firme comparados con los camiones cargados. Por eso se habla habitualmente de Número equivalente de ejes.

Pero hablar de 20 ó 100 cargas por año es muy impreciso, ya que las mismas cargas no producen el mismo efecto si pasan en verano o si lo hacen justo después de un periodo de lluvia, cuando las características de la superficie de apoyo son inferiores y las deformaciones que pueden producirse, mucho mayores. No es difícil hacer una distribución de cargas a lo largo del año, teniendo en cuenta también la variación de la resistencia del terreno en cada época, dependiendo de la ubicación de la obra (9).

El hecho es que en general el deterioro de estos caminos lleva a que su reparación sea cada dos años, siempre en el supuesto de que haya presupuesto disponible para ello.

La reparación suele hacerse con la aplicación de 5 cm de material de aportación y un reperfilado ligero (ver anejo de costes). El rendimiento supuesto es de 10.000 m²/jornada, bastante alto.

Aún así, el coste se observa que es de 0,61 €/m².

6 Otras alternativas: Las estabilizaciones.

Con las soluciones tradicionales muchas veces no se ha conseguido el objetivo de una reparación permanente en el tiempo.

La mayor parte de las ocasiones, ya desde principios del siglo XX, con la aparición de los vehículos a motor, el polvo es un problema que de alguna manera es necesario atajar.

Para solucionar ese problema aparecen las primeras estabilizaciones, aunque el objetivo final es aumentar la durabilidad de la infraestructura de la que se trate (Figs 16 y 17).

6.1 Definición y características de las estabilizaciones

Las soluciones alternativas deben tener las mismas condiciones que las soluciones tradicionales:

- Fáciles de aplicar
- Fáciles de controlar
- Con apoyo en la normativa vigente suficiente para cualquier administración
- Técnicas disponibles por contratistas locales, poco tecnificados
- Los materiales que se vayan a utilizar, relativamente cerca del punto de empleo, por motivos de coste, y por motivos de no deterioro de los viales colindantes.

Las soluciones que están a nuestro alcance para conseguir esos objetivos son las estabilizaciones.

Según la RAE , **estabilizar**. (14)

1. tr. Dar a algo estabilidad.
2. tr. *Econ.* Fijar y garantizar oficialmente el valor de una moneda circulante en relación con el patrón oro o con otra moneda canjeable por el mismo metal, a fin de evitar las oscilaciones del cambio.

Siendo **estable**.
(Del lat. *stabilis*).

1. adj. Que se mantiene sin peligro de cambiar, caer o desaparecer. *Temperatura, economía estable.*
2. adj. Que permanece en un lugar durante mucho tiempo. *Inquilino estable.*
3. adj. Que mantiene o recupera el equilibrio. *Un coche muy estable.*

Estas definiciones cubren perfectamente el concepto de la unidad de trabajo que en la construcción de viales se entiende como estabilizar.



Fig. 16 Ejemplo de camino sin tratamiento contra el polvo



Fig. 17 El mismo camino con un tratamiento antipolvo

Las estabilizaciones que pueden llevarse a cabo en viales pueden ser de dos tipos:

- Mezcla del suelo existente con otro suelo, de manera que le confiera propiedades de las que el anterior carecía, también llamadas estabilizaciones mecánicas (29).
- Mezcla del suelo con un conglomerante o aditivo.

Las estabilizaciones del primer tipo tienen escasa aplicación, sobre todo una vez conocidas las ventajas de las del segundo tipo.

Hay productos "estabilizadores" de procedencia muy variada, muchos de ellos con nombre comercial protegido por una patente y utilizados muchos de ellos como agentes para disminuir la producción de polvo.

Algunos son (17) (30):

- Cloruro Cálcico
- Cloruro magnésico
- Cloruro sódico

- PennzzSupress-D
- Water Wetter
- Enviroseal (31)
- Sulfato de lignina
- Bioencimas
- Emulsiones basadas en derivados del petróleo
- Cenizas volantes
- Cal
- Cemento Portland
- Asturcon (32)
- Exim-europe (33)

y un largo etcétera.



Fig. 18 Extendido de un conglomerante antipolvo

El empleo de estos otros productos (Fig 18) tiene muchas ventajas y ciertos inconvenientes que es necesario tener en cuenta a la hora de pensar en su posible empleo como agentes estabilizadores.

La principal ventaja es mejorar la durabilidad del camino, evitando la emisión de polvo al entorno y ayudando a mantener una rodadura cómoda durante mucho tiempo.

Algunos de los inconvenientes que tiene su empleo son:

- Desconocimiento del comportamiento del conglomerante mezclado con el suelo en general, o con un suelo determinado, a largo plazo.
- Desconocimiento en el manejo de dicho conglomerante.
- Existencia o no de maquinaria idónea para dichos tratamientos.
- Desconocimiento de las dotaciones óptimas a emplear y sensibilidad del comportamiento final a la variación de las mismas.
- Posible contaminación del entorno en el caso de lixiviados

Algunos de estos conglomerantes son para mezclar con el suelo una sola vez, pero otros (Cloruros cálcico, sódico o magnésico, compuestos acrílicos) son para aplicarlos periódicamente (casi siempre una vez al año) de manera superficial como un riego después de una primera actuación en profundidad.

Habida cuenta de que el presente trabajo pretende ser generalista, no estudiar cada uno de los conglomerantes, sino sacar conclusiones de aquéllos que sean suficientemente conocidos, las condiciones que deben cumplir los mismos son las siguientes:

- Fáciles de adquirir en cualquier punto de nuestro entorno. Fácil no quiere decir barato, quiere decir que con pocas gestiones se puede obtener en el mercado normal.
- Ampliamente conocidos: Funcionamiento (cómo reacciona con los diferentes suelos), prestaciones, condiciones para su manejo.
- De calidad y homogeneidad contrastadas.
- De fácil control: contar con una batería de ensayos suficiente para poder controlar la calidad del conglomerante y del producto final obtenido.
- No contaminantes con el paso del tiempo.

Los conglomerantes que por lo tanto cumplen estas condiciones en nuestro entorno y en los que centraremos este estudio son la cal y el cemento.

La cal puede ser viva o apagada (CaO , Ca(OH)_2) (34). El efecto que ambas tienen al mezclarse con el suelo y el agua es el mismo. La cal viva es muy ávida de agua, y al entrar en contacto con el suelo húmedo, absorbe parte del agua del mismo, se hidrata y pasa a ser cal apagada, cal hidratada o hidróxido cálcico.

Las moléculas de cal apagada son las que reaccionan con el suelo produciendo la estabilización.

El cemento en principio puede ser cualquiera. Sin embargo, los cementos utilizados en estabilizaciones de suelos son aquellos de menor calor de hidratación fácilmente obtenibles en el mercado (35) (tipos IV B 32,5 ó II B 32,5).

El efecto que se consigue con cada uno de estos conglomerantes es diferente:

Con la cal (Fig 19) se consigue fundamentalmente un cambio en la composición química del suelo (36), reduciendo el índice de plasticidad y pasando a ser un material mucho más trabajable. A largo plazo (años), según el tipo de arcillas que contenga el suelo, se producen enlaces de portlandita (37), que es el mismo material que se produce con el fraguado del cemento.

Con el cemento se consiguen resistencias apreciables a corto plazo (unos pocos días) debido a los enlaces que se crean entre las partículas minerales del suelo.



Fig. 19 Repartidor de cal en polvo en un camino de Segovia

Los suelos sobre los que es conveniente aplicar uno u otro conglomerante son diferentes:

Mientras que el cemento es aconsejable para suelos de granulometría bien graduada y poco plásticos ($I_p < 12$ a 15), la cal está indicada para suelos finos y con índices de plasticidad por encima de 15 , es decir, cuanto más arcilla mejor va la cal y peor el cemento.

Puede haber suelos en los que no esté claro si emplear uno u otro conglomerante. Para salir de la duda, lo mejor es hacer los ensayos correspondientes y observar cual de las características que mejoran en cada caso es más interesante para la obra que se trate.

Para poder determinar si la estabilización es o no una técnica aplicable en una obra determinada, se observarán algunas reglas sencillas:

Como mínimo es necesario tener una identificación del suelo.

Hoy día se dispone de ensayos cuyos resultados nos dan idea de la bondad del suelo y de su empleo en una u otra zona de los viales: cimentación, núcleo o coronación.

Para determinar si el conglomerante idóneo a emplear es cal o cemento (Fig 20), el primer parámetro sobre el que nos debemos fijar es el Índice de Plasticidad (38).

Para índices de plasticidad por encima de 15, el conglomerante será preferiblemente cal. Por debajo de 12, casi seguro que cemento, y para la zona entre 10 -12 y 15 -18, podría servir cualquiera de los dos.

En segundo lugar, es necesario fijarse en la granulometría.

Materiales muy finos (pase por el tamiz 0,08 mayor que 20) suelen comportarse mejor con cal, mientras que aquellos que tengan buen esqueleto mineral suelen ser tratados con cemento.



Fig. 20 Detalle de la granulometría de un suelo estabilizado con cemento en Cantalejo

Hay suelos finos, como los limos, ya sean éstos limos arenosos o limos arcillosos, que pueden ser tratados con cal o con cemento. En esos casos, lo mejor es hacer ensayos con los dos conglomerantes y ver cuál es el que tiene un mejor comportamiento.

De la misma manera que confieren al suelo características diferentes, la forma de trabajar los materiales estabilizados con uno u otro conglomerante también son diferentes.

Algunas de estas diferencias son las que se pueden ver en la tabla siguiente:

DIFERENCIAS DE APLICACIÓN CUANDO SE USA CAL, FRENTE AL USO DE CEMENTO COMO CONGLOMERANTE EN ESTABILIZACIONES. Detalles prácticos.

| | |
|---|--|
| El proceso de fraguado del cemento comienza inmediatamente después de haber sido mezclado con el suelo y con el agua. Es fundamental estudiar y determinar el Plazo de Trabajabilidad de la mezcla. | Sin embargo, la cal no provoca ningún fraguado hidráulico. La cal produce un endurecimiento muy lento, que no tiene un valor importante hasta pasada una temporada larga (meses) desde que es mezclada con el suelo y el agua, lo cual |
|---|--|

| | |
|--|--|
| | confiere una mayor flexibilidad a la hora de organizar los trabajos. |
| La compactación del suelo con cemento ha de iniciarse cuanto antes para conseguir que esté completamente cerrado al iniciarse el fraguado, considerando el plazo de trabajabilidad indicado anteriormente. | La compactación de los suelos mezclados con cal puede demorarse un poco para favorecer la hidratación total de la cal, y el intercambio iónico suelo-cal. No obstante, conviene dejar las capas precompactadas antes del final de cada jornada de trabajo, para facilitar el curado de la mezcla y para proteger la capa frente a posibles precipitaciones. |
| El cemento seca los suelos, aproximadamente 0,5 % por cada 1,0 % de cemento, el porcentaje de agua necesario para su hidratación. | La cal viva es la que realmente seca los suelos, entre 3 y 5 % por cada 1 % de cal viva aportada. |
| Una vez compactado el suelo con cemento, debe evitarse el paso de vehículos, especialmente los pesados, para que no se rompan los enlaces que se están empezando a formar. | La formación de enlaces de cementación no empieza hasta pasados algunos días, y, además, se producen de forma muy lenta, con lo que al someter el suelo a cargas, no se produce ningún daño, aunque sí puedan producirse deformaciones plásticas. Debido a esto último, conviene restringir al máximo el tráfico y colocar, cuanto antes, la siguiente capa. |
| Una vez compactada la capa, no puede, bajo ningún concepto, volver a escarificarse ni reperfilarse. En el caso de ser necesario, debe estudiarse el tratamiento de esa capa con cemento de nuevo. | Una vez compactada la capa, puede escarificarse y reperfilarse hasta una semana después de haber sido mezclado el suelo con la cal, sin que el suelo-cal disminuya el CBR adquirido ni su trabajabilidad. No obstante, debe volver a humectarse la capa para poder compactarla adecuadamente. |
| El objetivo que se pretende con el cemento, conseguir mejorar resistencia del terreno, se alcanza al 60 % después de una semana, llegando al 100 % a los 90 días. Durante los 2 años siguientes se consiguen resistencias hasta del 200 %. | Los objetivos que se persiguen con la cal pueden ser múltiples: secar y descongelar los suelos, mejorar su capacidad de soporte, expansividad y plasticidad, se consiguen de manera inmediata, en pocas horas al 95 %, aunque siguen mejorando, según el tipo de suelo, hasta algunos años más tarde. |
| Si por cualquier circunstancia se observa que la dotación de cemento ha sido escasa y se decide rehacer el trabajo pasada una semana o más, es necesario aportar otra vez todo el cemento (o casi todo). | Si por cualquier circunstancia se observa que la dotación de cal ha sido escasa, podemos añadir lo que falte y volver a mezclar, no perdiendo el efecto de la cal ya mezclada hace una semana o más. |

| | |
|---|---|
| <p>Todo el cemento debe mezclarse con el suelo de una sola vez.</p> | <p>A veces, en el caso de suelos muy arcillosos, puede ser aconsejable el mezclar primero la mitad de la cal y luego la otra mitad, dejando un período de maduración entre medias, para que con la primera mezcla el suelo mejore, y, con la segunda, el tratamiento sea mucho más eficiente.</p> |
|---|---|

Una de las grandes ventajas del empleo de la cal y del cemento es que actualmente se dispone de un gran número de estudios sobre los puntos anteriores, con lo cual la Administración, o la propiedad del camino, puede proyectar su empleo sobre la base de que se obtendrá un producto final de características conocidas que se comportarán de una manera determinada con el uso.

No obstante, si en una zona determinada se produjera un cierto tipo de subproducto y fuera interesante su empleo en la construcción de viales, podrían llevarse a cabo todos los estudios anteriores, de manera que en la zona estudiada con los materiales de dicha zona, fuera posible proyectar su empleo con toda suerte de garantías.

Puede ser el caso del empleo de escorias de Alto Horno en la zona de Asturias, o la comentada anteriormente del alpechín en Andalucía u otros muchos puntos de España.

6.2 Comportamiento de los suelos estabilizados en cuanto a las características que debe cumplir un camino rural.

Repasamos pues en qué mejora un suelo estabilizado como paquete de firme en un camino rural, confrontándolo con las mejoras que se consiguen con las técnicas tradicionales.

A) Resistencia a las cargas que afectan al camino:

Esta característica se ve ampliamente mejorada (Fig 21). Si ampliamos el estudio de un firme tipo de un camino con el programa Icafir en las mismas condiciones que si aplicáramos una de las técnicas tradicionales de recrecimiento con suelo de la propia zona o de aportaciones externas, observamos que el comportamiento del firme queda claramente mejorado tal y como se puede ver en el anejo correspondiente de este trabajo (Anejo B y tabla 4).

La mejora aportada por el cemento puede verse en un estudio realizado para analizar la influencia de la humedad sobre la compactación de suelos (39), donde se observa que la mejora aportada por un 4 % de cemento supone un aumento de resistencia medida en términos de CBR de hasta 10 veces la que tiene el suelo natural y se analiza la importancia de conseguir la máxima densidad posible en el entorno de la humedad óptima.

B) Comodidad en la rodadura:

Al efectuar la estabilización y mezclar el suelo con el conglomerante, es necesario remover y esponjar todo el suelo, y por lo tanto también es necesario volver a nivelarlo y compactarlo., por lo que se consigue un reperfilado del camino al tiempo que la estabilización. En este reperfilado se puede aumentar ligeramente el bombeo del camino, intentando llegar al 4 % que en algunas publicaciones dan como óptimo.



Fig. 21 Notar el comportamiento del suelo después de unos días de lluvia

Si las faltas de material no son muy grandes (baches), no falta mucho volumen de suelo en un punto dado del camino, no es necesario reponer con material de aportación antes de llevar a cabo la estabilización, ahorrándonos por lo tanto una operación.

C) Estética:

El color y aspecto en general de los caminos reparados con técnicas de estabilización no difiere prácticamente nada respecto del original.

Tanto el cemento como la cal se emplean en muy pequeñas cantidades (entorno al 3 %). Ambos conglomerantes son de colores claros (blanca la cal y gris el cemento, aunque con multitud de tonalidades) y su mezcla con el suelo no varía el color del suelo.



Una vez puesto en servicio, el tráfico que circule por él desprende pequeñas cantidades de árido o arena, que cubren el camino, con lo que vuelven a teñir el camino de su color original.

Fig. 22 Deterioro producido en una carretera por la que han tenido que pasar los camiones cargados con el material para una reparación tradicional

D) Características relacionadas con el trazado en planta o en alzado.

La estabilización se lleva a cabo sobre la plataforma existente del camino, sin aportar más que una pequeña cantidad de conglomerante.

El resultado es que se puede mantener la anchura del camino al tiempo que se consigue una reparación del mismo.

La profundidad, o el espesor, del tratamiento no afecta por lo tanto al ancho disponible al final de la reparación. Esta profundidad puede fijarse en función de la resistencia que se quiera conseguir junto con otros parámetros, tales como la dotación de conglomerante que es necesario emplear.

Otros aspectos muy importantes a tener en cuenta:

No perteneciente exactamente a los conceptos desarrollados en este punto pero con una gran importancia en nuestro entorno, es necesario citar que la estabilización de los suelos o capas de firme existentes en los caminos elimina la utilización de nuevos materiales, ya sean extraídos de yacimientos sin tratar o de plantas de machaqueo, lo que sin duda ayuda a nuestro desarrollo de una manera sostenible.

Como detalle añadido, y no menos importante, es necesario destacar que la estabilización de los caminos frente a la aportación de nuevos materiales minimiza el paso de camiones (Fig 22) tanto por los accesos a la obra que se esté reparando o construyendo, como por encima de la propia obra: Muchos de estos caminos no soportarán a lo largo de toda su vida de servicio el paso de tantos vehículos pesados como durante el periodo de construcción.

6.3 Costes de estas soluciones

Una alternativa al procedimiento tradicional de reparación de un camino sería estabilizar el camino en un espesor de 15 cm con un 3 % de cemento.

El coste sería:

| Coste total de la reparación tipo 2: | | |
|--------------------------------------|--|------|
| | | €/m2 |
| Transporte de maquinaria a la obra | | 0,15 |
| Maquinaria | | 0,63 |
| Materiales | | 0,76 |
| | | |
| Total coste | | 1,54 |

Tabla 2: Coste total de la reparación tipo 2

Como se puede ver, el coste de la obra de estabilización es superior (1,8 veces) al de las soluciones tradicionales. No obstante, es necesario considerar la durabilidad de cada una de las soluciones.

6.4 Durabilidad

Para cuantificar la durabilidad entran en juego muchos factores, que se pueden resumir en dos:

- El clima
- El tráfico soportado

Los efectos del clima, especialmente la lluvia y los efectos de los ciclos hielo-deshielo, son diferentes si el material tiene cohesión o no.

El efecto hielo-deshielo tiene poco efecto en nuestro entorno. Sólo en algunos emplazamientos de mucha altitud, por lo que no es generalizable.

El efecto de la lluvia, sin que esté combinado con el paso del tráfico, sea cual sea éste, en general puede decirse que es menor en el caso de materiales con cohesión que los que no la tienen.

Quizá una forma de medirlo sea el ensayo Brasileño de tracción indirecta. Aún con pequeños valores de los resultados de este ensayo puede ser indicativo de la mejora conseguida.

Lo que parece más claro es que si en el ensayo Brasileño un material da valores más altos que otro, su cohesión interna será mejor.

El efecto de la lluvia sobre el firme del camino, sin combinar con el tráfico, está muy relacionado con la pendiente del camino en ese punto: con frecuencia la lluvia arrastra partículas sueltas del propio camino (recordar que en este tipo de reparaciones están prácticamente excluidos los tratamientos superficiales de protección) horadando y provocando surcos allí por donde pasan.

Si la reparación se lleva a cabo con materiales de mejor calidad (CBR más alto y mejor cohesión entre las partículas), la influencia de la época de lluvias (rama húmeda de las curvas Proctor) no es tanta como en el caso de peores materiales (39).



Fig. 23 Pese al mal funcionamiento del drenaje transversal, el suelo estabilizado impide que esta cárcava corte completamente el paso del camino

Este efecto es parcialmente paliable si se mantienen en perfecto estado las cunetas, pero al discurrir estos caminos entre zonas tanto agrícolas como forestales, es muy normal que proliferen en las mismas vegetación de todo tipo, dificultando el paso del agua por ellas.

La colocación o el tamaño de las obras de paso de agua, a pesar del empeño que se ponga en ello, puede ser causa de problemas: una ubicación defectuosa da lugar a la circulación del agua por un cauce diferente del previsto, pudiendo arruinar parte de la obra construida.

7. Cálculo del coste a largo plazo

En las obras ejecutadas con procedimientos de estabilización se observa lo siguiente:

- En comparación con tramos de caminos de la misma zona, no es necesario volver a repararlos hasta algunos años después de la reparación efectuada.
- La reparación que sería necesario llevar a cabo no sería en toda la superficie, sino sólo en algunas zonas en las que la reparación efectuada no ha funcionado correctamente debido a una dotación escasa de conglomerante o bien a una mala elección del mismo.

Adoptamos por lo tanto los siguientes valores, según lo observado en el camino reparado que se expone como ejemplo y los comentarios de los responsables del mantenimiento de los mismos:

- Para la reparación cuando el último arreglo se ha hecho con métodos y materiales tradicionales: 2 años
- Para la reparación cuando la construcción o última reparación se ha hecho con métodos de estabilización: 5 años
- Porcentaje de camino que hay que reparar en el primer caso: 100 %
- Porcentaje en el segundo caso: 30 %

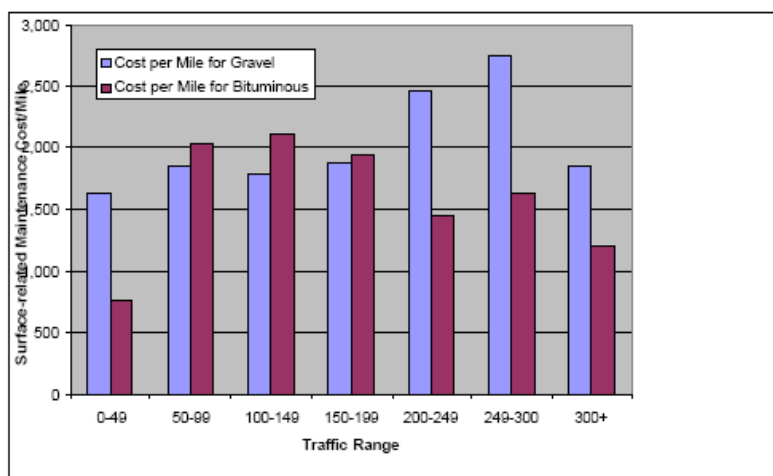


Fig. 24 Costes de mantenimiento por milla en función del volumen de tráfico para unos caminos concretos en EEUU, comparando el caso de caminos de grava y caminos con mezclas bituminosas.

Con estos datos y los costes de reparación hallados más arriba, obtenemos que en un periodo de 20 años, el coste de mantenimiento en el caso de emplear técnicas de estabilización sería un bastante inferior (Tabla 3), mejor el servicio al usuario, menor el impacto ambiental en las zonas de préstamos cercanos, y menor el impacto destructivo sobre la red de caminos y carreteras que deberían utilizarse para el transporte del material de préstamos.

Hay algunos estudios en los que se ha comparado en plazos relativamente cortos (algún año) el comportamiento de estabilizaciones con diferentes

compuestos y con un tramo de control, con el objeto de poder escoger el agente estabilizador óptimo en una zona determinada con una calidad determinada del suelo (23).

También hay realizado algún estudio sobre la conveniencia o no de llevar a cabo una pavimentación sobre la superficie del suelo, ya que si el tráfico supera valores determinados, el mantenimiento del camino se hace mucho más costoso que si se hace una reparación definitiva (7).

| | Años/reparación | Coste €/m2 | Coeficiente reparación | Nº reparaciones en 20 años | Coste en 20 años €/m2 |
|-----------------------------|-----------------|------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Solución tradicional | 2 | 0,61 | 1 | 10 | 6,10 |
| Solución con estabilización | 5 | 1,54 | 0,30 | 4 | 1,85 |
| Relación entre soluciones | | | | | 0,303 |

Tabla 3: Comparación de costes a largo plazo

8.- Un caso de aplicación práctica

- Descripción del problema

Se trata de la reparación de manera experimental de un tramo de un camino forestal en la provincia de León, próximo a la localidad de Almanza.

El camino es el vial principal para sacar la madera del pinar de Riocamba.

La situación actual es la de un vial recientemente reparado con la aportación de una delgada capa de Zahorra Artificial procedente de una cantera cercana. En tan sólo dos años y con el tráfico habitual de dicho camino, la situación ha vuelto a ser la original: zonas con baches de 20 x 20 x 10 (medidas en centímetros) que obligan al paso muy lento de los camiones que se emplean para sacar la madera de la explotación del monte.

La composición de la capa de rodadura del camino es un material granular ligeramente plástico, silíceo con matriz arcillosa, en un espesor de 25 cm apoyado sobre el terreno natural, cuya caracterización para poder introducir los datos en un programa de cálculo es la siguiente.

25 cm de Suelo Seleccionado tipo S2 con un CBR de 10.

Terreno subyacente: 200 cm de Suelo Adecuado tipo S1 con un CBR de 5.

Pensamos que esta puede ser una plataforma tipo que se presenta en multitud de nuestros caminos.



Fig. 25 Camino de acceso al Pinar de Río Camba. Estado original

Las condiciones de entorno del lugar, suponemos que son en una zona húmeda (según la definición de Icafir) y una zona térmica tipo ZT2, que no variará en el cálculo de las diferentes soluciones.

Se ha empleado una versión antigua del programa Icafir, ya que la versión 2006, entregada en el 2.007 en el Congreso de Carreteras de Andalucía, no permite espesores inferiores a los mínimos fijados por la Junta de Andalucía para cada una de las capas.

Las soluciones estudiadas son las siguientes:

Solución 1:

Aportación de 10 cm del material denominado Zahorra con menos del 50 % de caras de fractura (lo que podría ser equivalente a la Zahorra Natural del PG3)

Solución 2:

Aportación de 10 cm del material denominado Zahorra con más del 50 % de caras de fractura (equivalente a Zahorra Artificial).

Solución 3 (Alternativa 1):

Estabilización con cemento tipo SC3 (caracterizado según la Icafir de la Junta de Andalucía) (27) de los 15 cm superiores del camino existente, por lo que la capa de Suelo Seleccionado queda reducida a 10 cm de espesor.

Los resultados obtenidos son los de la tabla siguiente:

| | | Plataforma original | Solucion 1 | Solucion 2 | Alternativa 1 | Alternativa 2 |
|---------------------------|-----|--------------------------|------------|------------|---------------|---------------|
| | CBR | espesores en centímetros | | | | |
| Suelo Adecuado S1 | 5 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Suelo Seleccionado | 10 | 25 | 25 | 25 | 10 | 5 |
| Zahorra natural | | | 10 | | | |
| Zahorra artificial | | | | 10 | | |
| Suelo estabilizado S3 | | | | | 15 | 20 |
| Deflexiones | | 207 | 194 | 155 | 123 | 97 |
| Módulo de compresibilidad | | 70 | 74 | 93 | 117 | 147 |

Tabla 4: Secciones calculadas y resultados de deflexiones y módulos de compresibilidad

Solución 4 (Alternativa 2):

Estabilización con cemento tipo SC3 de los 20 cm superiores del camino existente, por lo que la capa de Suelo Seleccionado queda reducida a 5 cm de espesor (Fig 26).

Observamos lo siguiente:

- La adición de 10 cm de zahorra mejora algo la capacidad soporte (de 70 a 74 MPa, un 6 %), lo que no puede considerarse una mejora sustancial.
- Que el material sea zahorra natural o artificial incrementa el módulo de 74 Mpa a 93 Mpa un 26 %, lo que ya es una cantidad importante, sobre todo de una en relación con la otra.
- Efectuar la reparación mediante la estabilización eleva la capacidad soporte al doble de la original (de 70 a 147 Mpa) y es incluso mucho mejor que la aportación de zahorras (un 58 %), aunque no podría decirse que la mejora conseguida es de un 58 % habida cuenta de las leyes de fatiga diferentes en cada caso.
- La solución de estabilizar sólo 15 cm mejora mucho la reparación con zahorra, ya sea natural o artificial, (26 %), y también mejora la

resistencia al rozamiento interno del material y por lo tanto la durabilidad del vial construido o reparado.

La solución adoptada fue la estabilización del camino con cemento en un espesor de 15 cm.

En principio, habida cuenta de que en el momento de la licitación de la obra, no estaba fijado el punto del camino sobre el que se llevaría a cabo la estabilización, se dejó previsto el posible empleo de dos conglomerantes diferentes.

Antes de la estabilización se hicieron ensayos de identificación del suelo el 17 de Abril de 2.007 para poder determinar el conglomerante óptimo a emplear, que resultó ser cemento.



Fig. 26 Camino del pinar de Rio Camba. Ejecución de los trabajos de estabilización con cemento

- Ejecución del trabajo

El trabajo se ejecutó entre los días 20 y 25 de Mayo de 2.007 con el siguiente equipo (Fig 26):

- Recicladora - Estabilizadora Bomag MPH 121 dotada de picas con punta de Widia
- Extendedor de cemento Streumaster modelo RW 12000, con capacidad para 12 m³ de cemento

- Rodillo de 19 toneladas
- Motoniveladora
- Cuba de agua

El cemento empleado fue de la fábrica de La Robla, tipo ESP VI 32,5 N, cuya curva de fraguado facilitada por la fábrica se adjunta.

- Ensayos efectuados

Antes de la estabilización se hicieron ensayos de identificación del suelo el 17 de Abril de 2.007.

Durante la obra se tomaron muestras del material mezclado con cemento para romperlas a compresión simple a varios días de edad, habida cuenta que el cemento escogido para la ejecución de la obra es un CEM ESP VI 32.5 N.

- Resultados (Fig 27)

El ensayo de identificación dio como resultado que se trataba de un material no plástico, con una curva más o menos bien graduada (tamaño máximo de 50 mm, 50 % de arena y 15 % de pase por el tamiz 0,08), con un CBR de partida de 30, valor bastante bueno, y una densidad máxima según el ensayo Proctor modificado de 2,25 g/cm³.

Se trata pues de un buen material (el aspecto del camino en general así lo confirma) probablemente obtenido dentro de la zona en el momento de la construcción del mismo.



Fig. 27 Camino del pinar de Río Camba un año después de la estabilización

El 22 de Mayo de 2.007, durante la ejecución de la reparación, se tomaron varias muestras con las que se confeccionaron probetas en obra que se rompieron a 7, 9, 13 y 28 días, arrojando unos valores medios de 0,4 MPa (< 1,5 MPa) a 7 días y 11,6 a 28 días, lo que no se considera un resultado muy tranquilizador.

La curva de fraguado proporcionada por el fabricante del cemento indica que a 90 días el cemento aún incrementa un 39 % de resistencia de la conseguida a 28 días, lo que supondría un valor de 16,1 kg/cm², valor aceptable para un suelo estabilizado tipo 3 de la vigente instrucción de carreteras.

En cuanto a las densidades tomadas en el tajo el día de la confección de las probetas, los resultados obtenidos indican que el suelo está bien compactado y que las densidades son del mismo orden de magnitud que las de las probetas sacadas ese día. Sin embargo, esta densidad (2,06) es muy inferior a la obtenida en el Proctor modificado de los ensayos de identificación del suelo (2,25), lo que indica que el material que se identificó no es el mismo que aquél sobre el que se hizo la obra.

Transcurrido un año desde la ejecución del trabajo, se observó que el comportamiento ha sido bastante bueno, notándose una gran diferencia entre la parte del suelo tratada con cemento y la que ha permanecido en estado natural.

No obstante, han aparecido algunos pequeños baches. El motivo probablemente sea el no haber ejecutado un bombeo de la sección más cercano al 4 %.

9. Conclusiones y futuras líneas de actuación

La red de caminos constituye la red capilar por donde discurre una actividad económica de gran importancia. En los países en vías de desarrollo es fundamental para el desarrollo de los mismos y el mantenimiento de la población en el campo.

La longitud de la red es, en muchos casos, incluso mayor que la de las carreteras pavimentadas. La nuestra se cifra en 150 ó 200.000 km.

Para un correcto mantenimiento de la misma es, igual que en el resto de las redes, una buena planificación. Se considera necesario invertir en su mantenimiento un 2% de su valor patrimonial.

Una gran parte de las reparaciones hechas hasta la fecha no contemplaban la valoración de ningún parámetro con el que medir la calidad de la mejora conseguida. Por lo tanto, las reparaciones se llevan a cabo para obtener sólo resultados inmediatos aunque no duraderos.

Las reparaciones de bajo costo con frecuencia llevan consigo una vida útil muy corta. Reparaciones más costosas, aunque no más caras, llevan consigo una mayor durabilidad, de manera que se puede calcular el dinero invertido por superficie, o por longitud, de camino en un periodo prolongado.

En periodos de 20 años, la estabilización con de los caminos puede ser una solución más barata hasta un 30 % de la solución tradicional.

Se deben conservar tramos de prueba ejecutados por varios métodos para evaluar con más detalle la durabilidad de las soluciones probadas.

Se debe avanzar en redefinir el nivel de servicio en este tipo de vías, relacionado seguramente con la velocidad que pueden desarrollar los vehículos libremente, o quizá con el número de días que el camino permanece practicable durante un año.

La estabilización de los materiales existentes en los caminos lleva consigo otras ventajas que si bien no se cuantifican a la hora de redactar los proyectos, no por eso son menos importantes y tienen menos peso económico. Como tales ventajas se pueden citar:

- El aprovechamiento de los materiales locales implica menor utilización de materiales de préstamos, y por lo tanto menor transporte: menor consumo energético y menores emisiones de CO₂.
- Un menor transporte implica una reducción en las cargas que han de pasar por encima de los caminos adyacentes a aquél que se repara.
- Un menor transporte habitualmente implica también un menor tiempo empleado en la reparación y una menor afección a los usuarios.

10. Fuentes bibliográficas

1. *Desarrollo de procedimientos de gestión del sistema viario rural en España*. **Gallego Vázquez, Eutiquio, y otros**. 143, Madrid : Revista Carreteras, 2005.
2. *Carreteras*. **Lazcano Acedo, Juan Francisco, Uriol Salcedo, Jose Ignacio y Lacleta Muñoz, Ángel**. 3388, Madrid : Revista de Obras Públicas, 1999.
3. *Nature and effects of low-volume roads in Botswana*. **Madzinkigwa-BB**. Reno, Nevada : TRB, 2003. 0309077486.
4. *The socio-economical meaning of maintenance of low volume roads*. **Pastinen-V, Lehto-H y Oy), Paatalo-M (WSP Lt-konsultit**. Helsinki : Tiehallinnon Selvityksia, Finnra reports. Finnish road administration, 2005. 951-803-492-3.
5. *Objetivos y logros del PEIT*. **Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos**. 3487, Madrid : Revista de Obras Públicas, Abril 2008.
6. *Maintenance of minor roads using the lengthman contractor system*. **Jones, T E y RC, Petts**. Raleigh, North Carolina : The World Bank, Fifth conference on low volume roads, TRR, 1991.
7. **University of Minnesota. Center for transportation studies**. *To pave or not to pave?* Minnesota : s.n., 2006.
8. <http://www.highlands.com/pdra/mission.html>. [En línea] [Citado el: 28 de Julio de 2008.]
9. **U.S. Department of transportation. Federal Highway administration**. *Gravel Roads. Maintenance and design manual*. Dakota : South Dakota Local Transportation Assistance Program, 2000.
10. **del Barrio Martín-Gamero, Eugenio**. *Caminos de suelo-cemento*. Madrid : Agrupación de fabricantes de cemento de España, 1975. Dep Legal M 12.321 - 1975.
11. *The use of central tire inflation systems on low-volume roads*. **Stuart, E., Gililand, E. y Della-Moretta, L**. 1106, Washington : Transportation Research Board, 1987, Vol. 1. 0-309-04454-5.
12. **Asociación técnica de Carreteras**. *Un siglo de caminos de España*. Madrid : Jdel Editores, 2007. 978-84-95641-16-8.
13. *Los transportes interiores de mercancías en el siglo XVIII y en los primeros años del siglo XIX*. **Uriol, Jose I**. Agosto, Madrid : Revista de obras Públicas, 1980.
14. **REAL ACADEMIA DE LA LENGUA**. *Diccionario interactivo*. Madrid : s.n., 2007.
15. **Montero Martínez, Jesús y Galletero Montero, Pablo**. *Apuntes de Caminos Rurales*. Albacete : Universidad de Castilla-la Mancha, 2003.
16. **Kraemer, Carlos et al**. *Ingeniería de Carreteras*. Madrid : McGraw Hill, 2003. 84-481-3999-2.
17. **Boresi, Arthur P. y Palmer, James T**. *Appraisal and application of models for unpaved roads*. Laramie : University of Wyoming. Department of civil and architectural engineering, 1993.

18. *Revista de Obras Públicas*. Julio, Madrid : s.n., 1907.
19. *Control dust is a major must*. **Kuennen, Tom**. Agosto, s.l. : Better Roads magazine, 2006.
20. *Development of a methodology for measurement of vehicle dust generation on unpaved roads*. **Thenoux, Guillermo, Bellolio, Juan Pablo y Halles, Felipe**. Washington : TRR, TRB, 1989. ISSN 0361-1981.
21. **Addo, Jonathan Q., G., Sanders Thomas y Chenard, Melanie**. <http://www.mountain-plains.org/pubs/pdf/MPC94-28.pdf>. [En línea] [Citado el: 28 de Julio de 2008.]
22. **Minnesota Local Road Research**. *Erosion Control Handbook for local roads*. s.l. : US departament of transportation. Federal Highway Administration, 2003.
23. **Bushman, William H., Freeman, Thomas E. y Hoppe, Edward J.** *Stabilization techniques for unpaved roads*. Virginia Department of transportation and University of Virginia : s.n., 2004. VTRC 04-R18.
24. <http://www.amigosdeloscaminos.com/Base.php?a=nfs>. [En línea] [Citado el: 15 de Agosto de 2008.]
25. **Ministerio de Fomento**. *Instrucción de Carreteras Norma 3.1 IC Trazado*. Madrid : s.n., 2001.
26. *Erosion assaults the unpaved road*. **Kuennen, Tom**. Febrero, s.l. : Better Roads Magazine, 2005.
27. **Junta de Andalucía**. http://www.giasa.com/icafor/icafor.asp?alias=pub_cat. [En línea] 2006. [Citado el: 28 de Julio de 2008.]
28. **Floss, Rudolf**. *Compaction technology in earthwork and highway and transportation engineering*. Boppard : Bomag GmbH & co, 2001.
29. **Dal-Ré Terneiro, Rafael**. *Caminos Rurales. Proyecto y construcción*. Madrid : Mundi-prensa libros, s.a., 2001. 847 1149990.
30. <http://www.highlands.com/pdra/>. [En línea] pdra@highlands.com. [Citado el: 28 de 07 de 2008.]
31. www.enviroseal.com. [En línea] [Citado el: 28 de Julio de 2008.]
32. www.prefasa.es. [En línea] [Citado el: 28 de Julio de 2008.]
33. www.exim-europe.com. [En línea] [Citado el: 28 de julio de 2008.]
34. **Asociación nacional de fabricantes de cales y derivados de España ANCADE**. *Manual de estabilización de suelos con cal*. Madrid : s.n., 1997.
35. **Instituto español del cemento y sus aplicaciones IECA; Asociación nacional de fabricantes de cales y derivados de España ANCADE; Asociación nacional técnica de estabilizados de suelos y reciclado de firmes ANTER**. *Manual de estabilizaciones con cal y cemento*. Madrid : En imprenta, 2008.
36. **Laboratoire central des ponts et chaussées; Service d'etudes techniques des routes et autoroutes**. *Traitement des sols à la chaux et/ou liants hydrauliques*. Paris, Bagneux : Ministère de l'équipement, des transports, et du logement, 2000. 2-7208-3810-1.
37. **Eades, J.L. y Grim, R.E.** *A quick test to determine lime requirements for soil stabilization*. 1996.
38. **Ministerio de Fomento**. *Pliego General para la construcción de Carreteras y puentes PG 3*. Madrid : Ministerio de Fomento, 2008.
39. **Nervado Prieto Muñoz, Jorge**. *Estudio de laboratorio para analizar la influencia de la humedad de compactación de suelos*. Madrid : UPM ETSICCP. Departamento de ingeniería civil: transportes, 2.003.
40. **Little, Dallas N.** *Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime*. USA : s.n., 1995.
41. *Serving rocky roads: The U.S. has 1.6 million miles of unpaved roads - And they all must be treated right*. **Scranton Gillette Communications, Incorporated**. 6, Des Planes, Il. 60016-2282 USA : Roads and Bridges, 2003, Vol. 41.

Otras lecturas interesantes:

1. IECA, AEC, ATC. "I^{er} Simposio Internacional sobre Estabilización de Explanadas y Reciclado In Situ de Firms con Cemento". Salamanca, 2001.

En este primer simposium se puso de manifiesto el grado alcanzado por estas técnicas en ese momento. Pese a ser técnicas conocidas desde hace mucho tiempo, no había habido ninguna puesta en común sobre los avances alcanzados y la importancia de las mismas.

El segundo simposium sobre este tema se celebró en París en el 2005 y se espera que el próximo sea en Guatemala en el 2009

2. INTEVÍA. "Mezclas con Cemento en Explanadas y Firms". Varias Ponencias. Madrid, 2004.

Intevía organiza varios cursos en diferentes puntos de nuestra geografía periódicamente en los que se ponen encima de la mesa las últimas novedades sobre estabilizaciones y otras técnicas, incluso con referencias a los eventuales fracasos que pudieran podido producirse.

3. CATERPILLAR. "Manual de rendimiento". Peoria, Illinois, EEUU 1.996

En este manual hay unas tablas en las que se ven las diferentes características de la maquinaria empleada normalmente en este tipo de trabajos. Se editan regularmente y se refieren exclusivamente a la marca Caterpillar, pero son un referente en el mundo de las obras públicas en cuanto a rendimientos, potencia y otras circunstancias.

4. WIRTGEN. Cold recycling manual. Windhagen. Germany. 2.004 ISBN 3-936215-05-7

Manual práctico y muy completo que abarca las técnicas utilizadas normalmente en trabajos de estabilización y reciclado desde un punto de vista de ejecución de obra. Abarca desde los trabajos previos hasta las consideraciones de cómo se debe terminar una obra.

5. IECA, AEC, ATC. Congresos nacionales de firms, JCyL. Varias ediciones.

En las diferentes ediciones del Congreso Bianual de Firms organizado por la Junta de Castilla y León aparecen ponencias relacionadas con la estabilización y reciclado de firms desde la IV edición que tuvo lugar en Segovia.

6. E. SANCHEZ, M.A. GARCIA MARTÍN, Proceedings of the Vth International Symposium fo Concrete for a sustainable agriculture. Madrid 2005

A pesar de que en congresos como el referido en el que se pretende analizar los problemas de la agricultura sostenible, son muy pocas las referencias que hay sobre el mantenimiento de caminos, lo que parece dar idea de la falta de planificación sobre este tema en el mundo de la agricultura. Es de esperar mayor preocupación en un futuro cercano.

7. IECA. Manual de firms reciclados in situ con cemento. Madrid 1.999

En este manual se recogen las primeras experiencias de los reciclados con cemento desde el lanzamiento de esta técnica en 1.997 hasta la fecha de edición, dando idea bastante detallada de cómo poder proyectar y controlar una obra de reciclado de carreteras con cemento.

8. IECA, CEDEX. Manual de firms con capas tratadas con cemento. Madrid 2.003

En este manual se trata el diseño, construcción y control de todo tipo de capas tratadas con cemento para firms de una manera práctica, poniendo de manifiesto los cuidados que es necesario tener a la hora de la construcción de infraestructuras en las que el cemento es un elemento importante.

9. R.I.T. WILLIAMS. Cement-treated pavements. Elsevier Applied Science Publishers.

En este interesantísimo libro es un compendio muy completo de los materiales tratados con cemento, y pese a su antigüedad (1.986) no ha perdido vigencia. Debería ser lectura obligada para todos los profesionales relacionados con los pavimentos de cemento.

Notas:

1.- Pág 7. En el Manual Gravel Roads Maintenance and construction, en el Apéndice A, métodos de diseño se define un "Nivel de Servicio" y a partir del mismo, un Nivel de servicio Terminal, a partir del cual la gente no acepta el estado de la vía. El rango de medición de este índice va de 0, cuando la aceptación de los usuarios es nula, a 5, cuando esta aceptación es total.

Para una carretera, el nivel de aceptación de varios niveles de este índice es el siguiente, según la AASHTO.

| | | | |
|---|-----|-----|-----|
| Terminal serviceability level (P_t) | 3.0 | 2.5 | 2.0 |
| Percent of people stating unacceptable | 12% | 55% | 85% |

Se indica que no se deberían construir ni siquiera caminos con un nivel de servicio por debajo de 2,0 y que el dato que realmente tiene importancia es la diferencia entre el nivel de servicio inicial P_o , en el momento en el que se construye el camino y el que tiene en cada momento P_t : $P_o - P_t$.

Nota 2: El dato de que es necesario invertir un 2 % del valor patrimonial de la red en el mantenimiento de la misma, está citada en la introducción, pág 4, ref bibliográfica 5.

ANEXOS

ANEXO A COSTES

Coste de soluciones

Coste de la maquinaria empleada

€/hora

| | |
|---------------------|------|
| Retroexcavadora | 500 |
| Camion Dumper | 400 |
| Motoniveladora | 600 |
| Rodillo | 400 |
| Cuba de agua | 300 |
| Recicladora | 1500 |
| Extendedor de polvo | 1000 |

Materiales

| | | |
|-------------------------|----|------|
| Cemento | 80 | €/t |
| Cal | 75 | €/t |
| Suelo de la propia obra | 2 | €/m3 |

Mano de obra

| | |
|-----------|----|
| Encargado | 30 |
|-----------|----|

Coste de una reparación efectuada aportando 10 cm de material dentro de la propia obra

| Medición total | L | A | H | superficie | Volumen |
|----------------|-------|---|-----|------------|---------|
| | m | m | m | m2 | m3 |
| | 10000 | 4 | 0,1 | 40000 | 4000 |

Transporte de maquinaria a obra (€)

| | Superficie | Coste/m2 |
|------|------------|----------|
| | m2 | € |
| 6000 | 40000 | 0,15 |

Maquinaria en 1 día de trabajo

| | Coste | Uds | Importe | Rendimiento | Coste/m2 |
|---------------------------|-------|-----|---------|-------------|----------|
| | € | | € | m2/jornada | €/m2 |
| Retroexcavadora | 500 | 1 | 500 | 6.000 | 0,08 |
| Camiones | 400 | 3 | 1.200 | 6.000 | 0,20 |
| Motoniveladora | 600 | 1 | 600 | 6.000 | 0,10 |
| Rodillo | 400 | 1 | 400 | 6.000 | 0,07 |
| Cuba de agua | 300 | 1 | 300 | 6.000 | 0,05 |
| Total coste de maquinaria | | | | | 0,5 |

| Materiales | Canon | Espesor | Importe |
|------------|-------|---------|---------|
| | €/m3 | m | €/m2 |
| | 2 | 0,1 | 0,2 |

Coste total de la reparación tipo 1:

| | €/m2 |
|------------------------------------|------|
| Transporte de maquinaria a la obra | 0,15 |
| Maquinaria | 0,5 |
| Materiales | 0,2 |
| Total coste | 0,85 |

Reparación tipo 2: Estabilización de una capa de 15 cm con un 3 % de conglomerante (cemento)

Transporte de maquinaria a obra (€)

| | Superficie m2 | Coste/m2 € |
|-------|------------------|---------------|
| 6.000 | 40.000 | 0,15 |

Maquinaria en 1 día de trabajo

| | Coste € | Uds | Importe € | Rendimiento m2/jornada | Coste/m2 €/m2 |
|---------------------------|------------|-----|--------------|---------------------------|------------------|
| Recicladora | 1.500 | 1 | 1.500 | 6.000 | 0,25 |
| Extendedor de cem | 1.000 | 1 | 1.000 | 6.000 | 0,17 |
| Motoniveladora | 600 | 1 | 600 | 6.000 | 0,10 |
| Rodillo | 400 | 1 | 400 | 6.000 | 0,07 |
| Cuba de agua | 300 | 1 | 300 | 6.000 | 0,05 |
| Total coste de maquinaria | | | | | 0,63 |

Materiales: cemento

| % | Espesor m | Densidad kg/m3 | Dotación kg/m2 | Precio €/kg | Impor €/m2 |
|---|--------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------|
| 3 | 0,15 | 2.100 | 9,45 | 0,08 | 0,76 |

Coste total de la reparación tipo 2:

| | €/m2 |
|------------------------------------|------|
| Transporte de maquinaria a la obra | 0,15 |
| Maquinaria | 0,63 |
| Materiales | 0,76 |
| Total coste | 1,54 |

COSTE DE LAS REPARACIONES A LARGO PLAZO

| | Años/reparación | Coste E/m2 | Coeficiente repar Nº reparaciones € | | Coste en 20 años E/m2 |
|-----------------------------|-----------------|---------------|-------------------------------------|----|--------------------------|
| Solución tradicional | 2 | 0,61 | 1 | 10 | 6,10 |
| Solución con estabilización | 5 | 1,54 | 0,3 | 4 | 1,85 |
| Relación entre soluciones | | | | | 0,30 |

ANEXO B

SALIDA DEL PROGRAMA ICAFIR

PROYECTO

Título: Camino en Almanza
Clave: DOC 08
Autor: ML-B
Itinerario: Almanza
Fecha: 13/5/2008

TRAMO 1

Longitud: 2.500 m
Categoría de tráfico: T4B
Categoría de cimiento: Baja
Ejes equivalentes: 1.000
Zona térmica: ZT2
Zona pluviométrica: Húmeda

SECCIÓN DE FIRME NO DEFINIDA

SUBTRAMO 1

Longitud: 500 m
Categoría de cimiento: Alta

SECCION DEL CIMIENTO. RESULTADOS DEL CÁLCULO

| Capa | Material | CBR | Esp.(cm) |
|------|-----------------------|-----|----------|
| 1 | Suelo seleccionado S2 | 10 | 25 |
| 2 | Suelo adecuado S1 | 5 | 200 |
| 3 | Terreno subyacente | 2 | Inf. |

Cimiento válido. Deflexión 207 micodef. Módulo de compresibilidad: 70 MPa

SUBTRAMO 2

Longitud: 500 m
Categoría de cimiento: Alta

SECCION DEL CIMIENTO. RESULTADOS DEL CÁLCULO

| Capa | Material | CBR | Esp.(cm) |
|------|----------------------------|-----|----------|
| 1 | Zahorra < 50% caras fract. | 10 | 10 |
| 2 | Suelo seleccionado S2 | 10 | 25 |
| 3 | Suelo adecuado S1 | 5 | 200 |
| 4 | Terreno subyacente | 2 | Inf. |

Cimiento válido. Deflexión 194 micodef. Módulo de compresibilidad: 74 MPa

SUBTRAMO 3

Longitud: 500 m

Categoría de cimiento: Alta

SECCION DEL CIMIENTO. RESULTADOS DEL CÁLCULO

| Capa | Material | CBR | Esp.(cm) |
|------|----------------------------|-----|----------|
| 1 | Zahorra > 50% caras fract. | 60 | 10 |
| 2 | Suelo seleccionado S2 | 10 | 25 |
| 3 | Suelo adecuado S1 | 5 | 200 |
| 4 | Terreno subyacente | 2 | Inf. |

Cimiento válido. Deflexión 155 micodef. Módulo de compresibilidad: 93 MPa

SUBTRAMO 4

Longitud: 500 m

Categoría de cimiento: Alta

SECCION DEL CIMIENTO. RESULTADOS DEL CÁLCULO

| Capa | Material | CBR | Esp.(cm) |
|------|-----------------------------|-----|----------|
| 1 | Suelo estabilizado tipo SC3 | 100 | 20 |
| 2 | Suelo seleccionado S2 | 10 | 5 |
| 3 | Suelo adecuado S1 | 5 | 200 |
| 4 | Terreno subyacente | 2 | Inf. |

Cimiento válido. Deflexión 97,4 micodef. Módulo de compresibilidad: 1,5e+002 MPa

SUBTRAMO 5

Longitud: 500 m

Categoría de cimiento: Baja

SECCION DEL CIMIENTO. RESULTADOS DEL CÁLCULO

| Capa | Material | CBR | Esp.(cm) |
|------|-----------------------------|-----|----------|
| 1 | Suelo estabilizado tipo SC3 | 100 | 15 |
| 2 | Suelo seleccionado tipo S3 | 20 | 10 |
| 3 | Suelo tolerable tipo S1 | 5 | 200 |
| 4 | Terreno subyacente | 2 | Inf. |

Cimiento válido. Deflexión 123 micodef. Módulo de compresibilidad: 1,2e+002 MPa

ANEXO C

ENSAYOS

INFORME DE ESTABILIZACIONES



Hoja nº 1 de 1

| | | | | |
|---|-------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|
| ENCARGO: | REF. EXPEDIENTE: | VAR/20070016/VAV | REF. MUESTRA: | 70789-07-VA |
| PETICIONARIO: FIRMES ECOLOGICOS SOLTEC, S.A. | | | | |
| EMPRESA CONSTRUCTORA: | | | | |
| TITULO DE LA OBRA: ENSAYOS EN VARIAS OBRAS | | | | |
| DIRECCIÓN: | | | HORA DE TOMA: | 13:45 |
| LOCALIDAD: VALLADOLID | VALLADOLID | FECHA DE TOMA: | 22/05/2007 | |

| |
|--|
| DATOS DE LA MUESTRA: |
| Tipo de Material: SUELO-CEMENTO. |
| Origen de la muestra: ESTABILIZADO "IN SITU". VIA SECA |
| Uso Previsto: BASE |
| Referencia del peticionario o de la obra: |
| Estado o tratamiento de las muestras: EXTENDIDO EN OBRA |
| Zona general de colocación: CAMINO CANALEJAS-RIOCAMBA |
| Lugar de muestreo: P.K. 3+900 EJE (DESDE CANALEJAS) |
| Método de muestreo: S/ Pro. Gen. de toma de muestras |

| |
|----------------------------|
| DATOS DE LA MUESTRA |
| Punto kilometrico |
| 3+900 al Eje |
| Matricula del vehiculo |
| Condiciones meteorológicas |
| Despejado |
| Temperatura ambiente (°C) |
| 24,6 |
| Humedad ambiente (%) |
| 39 |

| | |
|---------------------------------------|-------------|
| Norma Empleada: | UNE 103.300 |
| HUMEDAD DE AMASADO (%) | |
| 5,67 | |
| CEMENTO (Sobre muestra seca) % | |
| | |
| TIPO DE CEMENTO | |

| ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN (NLT-305 y NLT-310) | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Nº de probeta | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Nº de molde | 801 | 1114 | 24 | 174 | 4 | 813 |
| Longitud de la probeta (cm) | 17,78 | 17,78 | 17,78 | | | |
| Diámetro de la probeta (cm) | 15,24 | 15,24 | 15,24 | 15,24 | 15,24 | 15,24 |
| Sección de la probeta (cm²) | 182,4 | 182,4 | 182,4 | 182,4 | 182,4 | 182,4 |
| Volumen de la probeta (cm³) | 3243,0 | 3243,0 | 3243,0 | 3243,0 | 3243,0 | 3243,0 |
| Días de curado | 28 | 28 | 28 | 90 | 90 | 246 |
| Fecha de rotura | 19/06/2007 | 19/06/2007 | 19/06/2007 | 20/08/2007 | 20/08/2007 | 23/01/2008 |
| Densidad (g/cm³) | 2,053 | 2,032 | 2,069 | 2,085 | 2,048 | 2,039 |
| Carga de rotura a compresión (Tn) | 1,156 | 1,072 | 1,028 | 1,650 | | 2,155 |
| Tensión de rotura (Kg/cm²) | 6,3 | 5,9 | 5,6 | 9,0 | | 11,8 |

Observaciones :

Probeta 5 se rompe segun ensayo Brasileño.

| | | | | |
|--|--|-----------------------|---|--------------------------|
| Director de Laboratorio: ROBERTO HERAS GAMAARRA | Vicario jefe Subdepartamento: ANDRÉS SANCHO FERNÁNDEZ | Nº de informe: 141 | Laboratorio ACREDITADO por la Junta de Castilla y León en: "Control del hormigón fresco (ENF)" con número de acreditación: 12035EHP06. | Telefono: 923361633 |
| VALLADOLID | | | Laboratorio ACREDITADO por la Junta de Castilla y León en: "Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en vitales (VSG)" con número de acreditación: 12035EHP06. | Fax: 923361632 |
| Fecha: 24/01/2008 | | | Pol. Ind. de Castañeros Morales, par. 106 A. | CASTELLANOS DE SALAMANCA |