



## ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CEMENTO

FICHAS TÉCNICAS

## INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelos es una técnica cuyo fin es modificar sus características mediante la incorporación de un conglomerante (normalmente cal y/o cemento) para permitir su aprovechamiento. Los objetivos directos que se obtienen suelen ser:

- Permitir el aprovechamiento de suelos de la traza de deficiente calidad, evitando su extracción y transporte a vertedero así como el tener que aportar otros diferentes que en ocasiones pueden hallarse a distancias importantes.
- Reducir la sensibilidad al agua de los suelos, y con ello aumentar su resistencia a la erosión, a la helada, y a otros agentes climáticos.
- Permitir la circulación por terrenos intransitables.
- Obtener una plataforma estable de apoyo del firme que colabore estructuralmente con el mismo.



## CONTRIBUCIÓN A LA SOSTENIBILIDAD

El aprovechamiento de los suelos existentes mediante la estabilización, incluso en el caso de suelos marginales o contaminados, evita la reducción de los recursos naturales disponibles al disminuir el empleo de suelos de mejor calidad.

Por otra parte, se suprimen las operaciones de remoción de los suelos existentes y su transporte a vertedero, así como las de extracción y transporte a obra de los suelos que los sustituyen.

Se trata de una técnica enfocada claramente a lograr una mayor sostenibilidad, a cuyas ventajas medioambientales y técnicas, se suman importantes beneficios económicos.

### Ventajas medioambientales

- El empleo de suelos de la traza evita explotar nuevos yacimientos y disminuye la necesidad de vertederos.
- La eliminación del transporte de los suelos disminuye las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes y reduce el daño que generan los combustibles y aceites, así como los impactos colaterales (polvo, erosiones y otros) que provoca sobre las carreteras y flora adyacentes.



- Se trata de una técnica especialmente adaptada al empleo de cementos con alto contenido de adiciones. Esto se traduce en una disminución de las emisiones durante su fabricación, al reducir la cantidad de clinker empleado e incorporar subproductos industriales como escorias o cenizas volantes, lo que favorece el cumplimiento del protocolo de Kioto y de los compromisos de desarrollo sostenible.
- Es una técnica en frío que consume poca energía. Se disminuyen con ello notablemente la contaminación y las emisiones de vapores nocivos.

## Ventajas técnicas

- Permite el empleo de los suelos de la traza, mejorando sus características hasta el grado deseado.
- Proporciona una elevada capacidad de soporte a la explanada, disminuyendo las tensiones que llegan a las capas del firme, con lo que aumenta la vida de servicio del mismo.
- Asegura la estabilidad de los suelos, tanto por la reducción de su sensibilidad al agua y a la helada, como por el incremento de su resistencia a la erosión.
- Puede permitir en ciertos casos el paso inmediato del tráfico de obra.
- Se disminuyen las molestias por el tráfico de obra y los daños a la red de carreteras adyacentes debido a que se evita transportar los suelos a vertedero y aportar otros nuevos.



## Ventajas económicas

- El empleo de los suelos de la traza y la eliminación del transporte suponen una reducción importante de costes.



- La obtención de cimientos de mayor calidad permite una economía en los firmes y en el volumen total de áridos empleados en los mismos.
- Se reducen los plazos de ejecución dado que la estabilización se realiza con equipos de alto rendimiento y que se disminuye el espesor total de la explanada frente a las alternativas con suelos sin tratar.
- Las ventajas técnicas y ambientales citadas también se traducen en beneficios económicos.

## Limitaciones

Las limitaciones para estabilizar suelos con cemento son fundamentalmente el que tengan contenidos elevados de sulfatos solubles (por encima del 1% se puede formar ettringita muy expansiva) o de materia orgánica (puede inhibir el endurecimiento de la mezcla, aunque se puede resolver con altos contenidos de cemento).

Aunque en principio todos los demás suelos pueden estabilizarse con cemento, las altas dotaciones de conglomerante que se precisan cuando el contenido de finos plásticos es muy elevado, así como las mayores dificultades de mezclado, aconsejan restringir los tratamientos con cemento a los suelos con un índice de plasticidad inferior a 15 y un cernido ponderal por los tamices UNE 2 mm y 0,063 mm superior al 20% e inferior al 35% respectivamente.



## TIPOLOGÍA

Los suelos estabilizados para formación de explanadas se clasifican en tres tipos diferentes:

- **S-EST 1 y S-EST 2 o “suelos mejorados con cemento o cal”**, en los que con un pequeño porcentaje de conglomerante se mejoran algunas propiedades del suelo (como por ejemplo la susceptibilidad a los cambios de humedad), y que después del tratamiento, siguen constituyendo un material suelto. Se exige un índice CBR (según norma UNE-EN 13286-47) superior a 5 y 10 respectivamente, valores que se incrementan a 6 y 12 si se emplean en la capa superior de las utilizadas en formación de explanada.
- **S-EST 3 o “suelo estabilizado con cemento”**, al que se le exige una resistencia mínima a compresión de 1,5 MPa a los 7 días según norma UNE-EN 13286-41 sobre probeta de Ø 15 cm x 18 cm longitud confeccionada según UNE-EN 13286-50 o UNE-EN 13286-51, y que por tanto tiene una rigidez apreciable.

## EFFECTO DEL CONGLOMERANTE. CEMENTOS MAS ADECUADOS

El cemento, mezclado íntimamente con el suelo desarrolla una red de enlaces durante las reacciones de hidratación que proporciona a la mezcla, una buena capacidad de soporte e incluso, con la dotación adecuada, una cierta resistencia mecánica a corto plazo, y mejora tanto su durabilidad, entendiéndose por tal la resistencia a los agentes físicos y químicos agresivos, como su estabilidad dimensional.



La gama de suelos que se pueden estabilizar con cemento es muy amplia. Aunque son los suelos granulares los que presentan una mejor y más rápida mejora de resultados ante una reducida aportación de cemento, no se debe a priori eliminar otros tipos, pues se dan casos de suelos de elevada plasticidad cuyo comportamiento es mejor al ser mezclados con cemento que con cal (por la presencia, por ejemplo, de carbonatos como sucedió en tramos de la autovía de Castilla).

Con suelos muy finos y arcillosos suele resultar más adecuado realizar un tratamiento mixto cal-cemento: la aplicación de la cal logra reducir la plasticidad y consigue agrupar los finos en granos de mayor diámetro sobre los que sí puede actuar el cemento, lográndose obtener una resistencia apreciable. Análogamente se puede emplear este doble tratamiento en suelos muy húmedos, donde la cal actúa secando. En la estabilización mixta, antes de la aplicación del cemento, conviene dejar un período de actuación de la cal de al menos 5 o 6 horas (plazo que se debe definir en los ensayos previos).

En los suelos estabilizados con cemento, el tipo de conglomerante tiene una importancia menor en comparación con la dotación del mismo o la densidad mínima alcanzada en la compactación. Aunque es posible utilizar la gran mayoría de los cementos comercializados en España, los cementos más recomendables para estabilizar suelos son aquellos con alto contenido de adiciones activas como pueden ser los tipos ESP VI-1, CEM V, CEM IV, CEM III o CEM II-B. Se trata de cementos con inicio y final de fraguado suficientemente largos (mayor plazo de trabajabilidad), moderado calor de hidratación (limitada fisuración por retracción) y desarrollo inicial de resistencias lento, que se recuperan (salvo en los cementos ESP las resistencias a 28 días son las mismas que las de otros tipos de cementos) o mejoran a largo plazo. Con ello se limita el efecto de la retracción. Son muy apropiados también los denominados conglomerantes hidráulicos para carreteras, regulados por la norma UNE-EN 13282, pero su disponibilidad en España es escasa hasta el momento.



En general deben procurarse emplearse cementos de resistencia media o baja (clase 32,5 N o 22,5 en el caso de cementos ESP), reservando las categorías superiores para situaciones especiales como la ejecución en tiempo frío.

Si la capa estabilizada se tiene que disponer sobre terrenos yesíferos o que contengan sulfatos, es conveniente aislarla y, en cualquier caso, utilizar cementos resistentes a los sulfatos.

En los suelos estabilizados con cemento, las dotaciones de cemento varían ampliamente según el tipo de suelo que se utilice. Como se ha comentado, para evitar elevados contenidos de conglomerante, se suele restringir la estabilización con cemento a los suelos que cumplen las siguientes condiciones:

- Índice de plasticidad  $IP < 15$
- Límite líquido  $LL < 40$  (S-EST2 y S-EST3)
- Pase por el tamiz UNE 2 mm  $< 20\%$
- Pase por el tamiz UNE 0,063 mm  $< 35\%$  (50 % en los S-EST1 y S-EST2)



## NORMATIVA

En la Norma 6.1-IC sobre Secciones de firme del Ministerio de Fomento, así como en diversas reglamentaciones autonómicas, se han incluido catálogos de explanadas que pueden estar constituidas tanto por suelos sin tratar como por suelos estabilizados con cemento o cal.

En el caso de los suelos sin tratar, la clasificación de los mismos de acuerdo con sus características granulométricas y plásticas se recoge en el capítulo 330 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3 del Ministerio de Fomento. Dichas características se exponen de forma resumida en la tabla 1.

**Tabla 1. Clasificación de suelos para terraplenes y explanadas (Pliego PG-3)**

	Suelos marginales	Suelos tolerables	Suelos adecuados	Suelos seleccionados
Granulometría (UNE 103101)			$\varnothing_{\max} \leq 100$ mm Pasa # 2 mm $< 80\%$ Pasa # 0,080 mm $< 35\%$	$\varnothing_{\max} \leq 100$ mm Pasa # 0,40 mm $< 15\%$ o bien: Pasa # 2 mm $< 80\%$ Pasa # 0,40 mm $< 75\%$ Pasa # 0,080 mm $< 25\%$
Plasticidad (UNE 103103 UNE 103104)	$LL < 90$ Si $LL > 90$ , $IP < 0,73$ (LL-20)	$LL < 65$ Si $LL > 40$ , $IP > 0,73$ (LL-20)	$LL < 40$ Si $LL > 30$ , $IP > 4$	(sólo exigible si pasa # 0,40 mm $\geq 15\%$ ) $LL < 30$ $IP < 10$
Colapso (NLT 254)	--	Asiento $< 1\%$	--	--
Sales solubles		Yeso $< 5\%$ Otras $< 1\%$ $SO_3 < 1\%$ (E)	$< 0,2\%$	$< 0,2\%$
Hinchamiento libre (UNE 103601)	$< 5\%$	$< 3\%$ $< 1\%$ (E)		
Materia orgánica (UNE 103204)	$< 5\%$	$< 2\%$ $< 1\%$ (E)	$< 1\%$	$< 0,2\%$
CBR (UNE-EN 13286-47)		$\geq 3$ (E)	$\geq 5$ (E) $\geq 6$ (Ex)	$\geq 10$ (E) $\geq 12$ (Ex) $\geq 20$ (*)

(E) Exigencia adicional para los suelos que se empleen en la formación de explanadas

(Ex) Exigencia adicional para los suelos que se empleen en la capa superior de las utilizadas en la formación de explanadas

(\*) Suelos seleccionados tipo 3

En el artículo 512, Suelos estabilizados in situ del PG-3 se exponen las características exigidas a los suelos para poder ser estabilizados con cemento o cal. Estas se resumen en la tabla 2.

**Tabla 2. Prescripciones de los suelos a utilizar en estabilizaciones**

		NORMA	S-EST 1	S-EST 2	S-EST 3	
GRANULOMÉTRICO	Tamaño máximo	UNE 103 101	80 mm			
	Suelo con cal	Pase 63 $\mu$ m (%)	UNE 103 101	$\geq 15$		
	Suelo con cemento	Pase 63 $\mu$ m (%)	UNE 103 101	$< 50$		$< 35$
		Pase 2 mm (%)	UNE 103 101	$< 20$		
PLASTICIDAD	Suelo con cal	IP	$\geq 12$	$\geq 12$ y $\leq 40$	---	
	Suelo con cemento	LL	---	$\leq 40$		
		IP	UNE 103 104	$\leq 15$		
Materia orgánica (%)		UNE 103 204	$< 2$	$< 1$		
Sulfatos solubles (%)		UNE 103 201	---	$< 1$		

Aunque además se imponen otros criterios restrictivos como la ausencia de asentamiento en el ensayo de colapso realizado según NLT-254, ni hinchamiento en el ensayo de expansión según UNE 103601, existe una amplia experiencia en Navarra y País Vasco de suelo estabilizado con cemento con rocas evolutivas tipo margas, lutitas, argilitas, limolitas y otras que no cumplen estas prescripciones del PG-3, pero que cumplen el ensayo de hinchamiento acelerado UNE-EN 13.286-49.

La primera realización se llevó a cabo en el año 2004 en el tramo Noain-Monreal de la Autovía A-21 Pamplona-Huesca, donde se estabilizaron las margas azules de la cuenca de Pamplona aplicando la norma francesa NF-94-100 (midiendo el hinchamiento y la resistencia a tracción indirecta). El comportamiento es muy bueno hasta la fecha de hoy, habiéndose estabilizado los tramos siguientes de dicha autovía. También se han estabilizado rocas evolutivas para conseguir una buena explanada en la AP-1 entre Eibar y Vitoria.

Los espesores de las capas estabilizadas para la formación de explanadas recogidos en las distintas normativas suelen ser de 25 o 30 cm. En algunos casos se han construido capas estabilizadas de 35 y 40 cm, pero ello requiere el empleo de equipos de suficiente potencia y una ejecución muy cuidadosa, a fin de asegurar que se consiguen las densidades especificadas, sobre todo en fondo de capa. Por ello dicha posibilidad no se contempla por el momento en las distintas normativas.

Utilizando explanadas compuestas exclusivamente por suelos estabilizados pueden obtenerse importantes reducciones de espesor con respecto a las opciones con suelos sin tratar, que en algunos casos pueden alcanzar 40 ó 45 cm. Así, para obtener una explanada E1 sobre suelos inadecuados o marginales, algunas de las opciones son:

- 60 cm de suelo estabilizado S-EST1 (extendido en dos capas de 30 cm)
- 100 cm de suelo adecuado
- 35 cm de suelo adecuado tipo 2 sobre 70 cm de suelo tolerable.

## ETAPAS DE UNA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

La estabilización de un suelo para obtener una explanada de calidad requiere realizar previamente los estudios de laboratorio oportunos para cada caso en particular. Las características del suelo (tipo, clasificación, grado de humedad, u otros) y la maquinaria disponible (actualmente hay en España un elevado número de equipos de última generación) son dos parámetros básicos que definen la forma de estabilizar y la cantidad de conglomerante más apropiada para conseguir las óptimas condiciones técnicas y económicas.

Así, se pueden diferenciar las siguientes fases en una estabilización:

### Etapas previas a la ejecución

- Clasificación del suelo

El primer paso, consiste en realizar los ensayos previos para caracterizar correctamente el suelo.



Para ello, se toman muestras suficientemente representativas del suelo (se excava en las zonas de desmonte hasta la cota de explanada y se cogen muestras válidas de los materiales de aportación de los terraplenes) y se llevan a cabo los ensayos de identificación. Al menos se debe definir la granulometría, la plasticidad (límites de Atterberg), el hinchamiento, la humedad natural, el contenido de materia orgánica y el de otros componentes perjudiciales, tales como sulfuros (piritas), sulfatos (yesos) o cloruros (sal gema) que puedan perturbar o incluso impedir el fraguado del cemento.

- Elección y dosificación del conglomerante

De acuerdo con las características del suelo se selecciona el tipo de conglomerante más apropiado para conseguir la capacidad de soporte o la resistencia solicitada.

En la figura 1 se incluye un gráfico orientativo sobre cuando usar cal o cemento, pues aunque esta posibilidad puede quedar determinada en la normativa (tabla 2) donde se fijan unos límites, hay casos de obras en los que, aún habiéndolos rebasado ligeramente, se han obtenido resultados correctos.

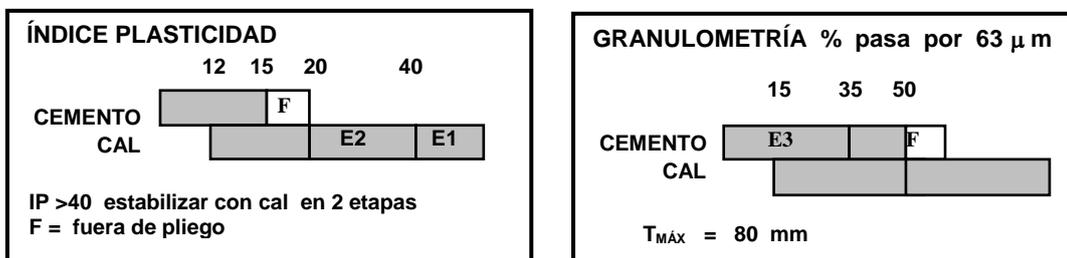


Figura 1. Gráfico simplificado para determinar el conglomerante

Otra opción que no hay que descartar, es la estabilización mixta con cal y cemento, bien porque el suelo tenga mucha humedad y requiera previamente un secado, o bien porque contenga finos muy plásticos sobre los que no se consigue obtener resistencias con la acción del cemento. Con un 1-2% de cal se reduce la plasticidad, aumentando la humedad óptima de compactación y disminuyendo la densidad máxima del suelo, y tras un período de maduración, con un 3-4% de cemento se pueden lograr las resistencias especificadas para obtener una explanada de calidad.

- Ensayos previos:

Definido el conglomerante, se realizan los ensayos de dosificación necesarios para conocer la cantidad del mismo a aportar. Para ello se realiza para cada contenido de cemento (o para un porcentaje medio) el ensayo Proctor Modificado siguiendo la norma UNE- EN 13286-2 y se determina la humedad óptima y la densidad máxima de compactación. Posteriormente se obtiene el valor del índice CBR o, en el caso del S-EST3, en el que se exige una resistencia de 1,5 MPa a la edad de 7 días, se confeccionan probetas para ensayar a compresión a dicha edad.

La fórmula de trabajo debe indicar al menos:

- La granulometría del suelo, los límites de Atterberg y las demás características definidas anteriormente.
- La humedad óptima del material en el momento del mezclado.
- La densidad a obtener, que no debe ser inferior al 97% de la máxima Proctor modificado para los S-EST 1 y S-EST 2, ni al 98% para el S-EST 3.
- El tipo y dotación de cemento a utilizar:

Dada la variabilidad de las características de los suelos que pueden encontrarse en un firme, es aconsejable para asegurar una homogeneización correcta que la dotación de cemento no sea inferior al 3% (aunque algunas normas limitan al mínimo del 2,5% los S-EST 1) a fin de asegurar la obtención de la capacidad de soporte o la resistencia especificada a lo largo de toda la obra y evitar problemas posteriores, en general muy costosos de solucionar.

La dosificación óptima de cemento se determina ensayando varias series de probetas con distintas dotaciones de cemento. Dichas probetas se fabrican con la humedad óptima y la densidad mínima exigida en obra. Se debe adoptar un cierto margen de seguridad para tener en cuenta la variabilidad de la obra. Una vez definido el contenido de cemento conviene realizar un análisis de sensibilidad sobre probetas compactadas a diferentes densidades. De esta forma se puede determinar la dotación de conglomerante a añadir al suelo que garantice suficientemente la obtención de las prescripciones exigidas (CBR o resistencia) con las densidades alcanzadas en obra.

- El plazo de trabajabilidad del suelo estabilizado, determinado según la norma UNE-EN 13286-45 a la temperatura máxima prevista en obra.



## Etapas de la ejecución

La estabilización de un suelo puede realizarse in situ o en central. Este último proceso es similar al de otras unidades de obra como el suelocemento, pero es poco frecuente. Las operaciones a realizar en la estabilización in situ son en general las siguientes:

- Preparación del suelo al menos en tres aspectos básicos: granulometría (escarificado, disgregación y retirada de gruesos), humedad (humectación o secado) y nivelación.
- Distribución del conglomerante: según como se realice, se diferencia entre estabilizado por vía seca (el cemento se extiende en polvo sobre la superficie de la capa a estabilizar) o por vía húmeda (se incorpora como lechada al suelo dentro de la estabilizadora).
- Mezclado: un adecuado proceso de mezclado, con la humedad apropiada para asegurar una buena homogeneidad del suelo estabilizado en todo el espesor requerido, es muy importante para lograr un aprovechamiento óptimo de esta unidad.
- Compactación inicial: tras el mezclado se realizan varios ciclos de compactación con el rodillo vibrando a su máxima amplitud para compactar bien el fondo de la capa.
- Refino o nivelación: posteriormente se lleva a cabo un refino con la motoniveladora para obtener la rasante.
- Compactación final: se realiza con un rodillo liso, que a veces se combina con un rodillo de neumáticos para cerrar la superficie, hasta obtener como mínimo la densidad especificada.

Tanto en esta etapa como en la compactación inicial es importante mentalizar al maquinista de la importancia de su trabajo por lo monótono que resulta y controlar a menudo que el proceso se realiza correctamente.

- Curado y/o protección superficial: El curado se puede realizar manteniendo la superficie húmeda mediante un riego con agua pulverizada, o bien extendiendo una emulsión bituminosa de rotura rápida y baja viscosidad con una dotación mayor de  $300 \text{ gr/m}^2$  de betún residual. Para poder soportar el paso inmediato de los vehículos sin que se produzcan deformaciones importantes que puedan perjudicar su comportamiento posterior, el suelo estabilizado con cemento debe tener un esqueleto mineral con estabilidad suficiente. Para la estimación de la misma, se emplea el índice de capacidad de soporte inmediata (norma UNE-EN 13286-47), que debe ser como mínimo igual a 50 para poder permitir la apertura a la circulación. En este caso se debe proteger el riego de curado con una gravilla 3-6, aplicada con una dotación  $2-4 \text{ l/m}^2$ .



De acuerdo con los equipos disponibles, algunas de las operaciones anteriores pueden agruparse o realizarse conjuntamente. Los equipos usualmente empleados y el objetivo de cada etapa se resumen en el cuadro siguiente:

Tabla 3. Etapas de la estabilización

ETAPAS	OBJETIVO	EQUIPOS USUALES
<b>Etapas previas a la ejecución</b>		
1. Clasificación del suelo	Identificación de la naturaleza y características del suelo.	- Ensayos de laboratorio (granulometría, plasticidad, humedad, materia orgánica, etc).
2. Elección y estudio de dosificación del conglomerante	Definición del conglomerante y ensayos para definir la dosificación.	- Estudio de laboratorio (Proctor, CBR, resistencia).
<b>Etapas durante la ejecución</b>		
1. Preparación del suelo		
- Escarificado y disgregación	Disgregar el suelo	- Pala, bulldozer o motoniveladora con ripper
- Eliminación de gruesos	Suprimir elementos de tamaño superior a 80 mm	- Equipos mecánicos o agrícolas - Machacadora in situ
- Nivelación	Obtención de la rasante	- Motoniveladora
- Aireación o humectación	Conseguir la humedad óptima Proctor (incluyendo la de aportación en el caso de vía húmeda)	- Aireación: ripper o estabilizadora - Humectación: camión cisterna con barra regadora, distribuidor de lechada
2. Distribución del conglomerante - por vía seca - por vía húmeda	Aporte del conglomerante con la dotación requerida de acuerdo con la fórmula de trabajo y el espesor a tratar	- Manual (cuadrícula de sacos) (solamente en obras de reducido tamaño o importancia) - Distribuidor de conglomerante (en polvo o lechada)
3. Mezclado	Mezcla del suelo con el conglomerante y el agua, logrando una mezcla homogénea	- Pulvimixer o rotavator (solamente en obras de reducido tamaño o importancia) - Recicladora-estabilizadora
4. Compactación inicial	Obtención de la densidad en el fondo de la capa, precompactando el suelo	- Rodillo liso vibrante
5. Refino	Obtención de la rasante definitiva. Mejora de la regularidad superficial	- Motoniveladora
6. Compactación final	Obtención de la densidad requerida ( $\geq 97-98$ % de la máxima Proctor modificado)	- Rodillo liso vibrante + rodillo de neumáticos en ocasiones - Rodillo mixto
7. Riego de curado - Con agua - Con emulsión	Mantener la superficie húmeda Crear una película impermeable	- Cuba de agua con barra pulverizadora - Cuba de emulsión y lanza - Cuba de emulsión con barra regadora
8. Protección superficial en caso necesario	Proteger el riego de curado con emulsión si va a circular tráfico sobre el mismo	- Extendedora de gravilla y rodillo de neumáticos

## LIMITACIONES A LA EJECUCIÓN

### Ejecución en época calurosa

En épocas calurosas, las altas temperaturas pueden dar lugar a una desecación del material que altera desfavorablemente las relaciones de hidratación del cemento.

Algunas de las medidas que se pueden emplear para reducir estos problemas cuando se extiende a temperaturas superiores a 35 °C son:

- empleo de cementos con alto contenido en adiciones (Tipo IV, V o ESP VI) y resistencia 32,5 N, que tienen un menor calor de hidratación, lo que se traduce en una fisuración más reducida.
- empleo de un retardador de fraguado para incrementar el plazo de trabajabilidad, que en estos casos disminuye.
- mezclado con agua fría, incrementando el volumen de agua para prever la evaporación que se producirá durante el proceso.
- pulverización de agua durante la compactación.
- extensión del riego de curado inmediatamente.

### Ejecución en época fría

No se debe extender el material cuando la temperatura ambiente descienda por debajo de 5°C y exista fundado temor de heladas, ya que la ganancia de resistencia es muy débil y prácticamente inexistente por debajo de dicha temperatura. En caso de que la temperatura tienda a aumentar, se puede fijar este límite en 2°C.

En este caso se deberán emplear cementos con un contenido reducido de adiciones (tipo II) y categoría resistente 42,5 N y obtener altas resistencias. Por otra parte, en caso de ser factibles recomendable realizar la mezcla con agua caliente.



Efecto helada

### Ejecución en tiempo lluvioso

En caso de lluvia la ejecución de la estabilización debe suspenderse, tanto por la gran dificultad para compactar el material al incrementarse considerablemente la humedad por encima de la óptima, como por el peligro de que se produzca un lavado de la superficie. No obstante, se puede trabajar cuando haya una lluvia fina y ligera, que tienda a desaparecer.

### Ejecución con viento fuerte

En caso de dosificarse el cemento en polvo, no se debe extender cuando haya viento fuerte (velocidad por encima de 35 km/h). Si el cemento se incorpora como lechada, hay que tener en cuenta que, incluso aunque se esté en un ambiente marítimo con un alto porcentaje de humedad, la capacidad del viento para desecar rápidamente la superficie del material es muy alta, por lo que se deberán tomar las precauciones adecuadas.



## REALIZACIONES EN ESPAÑA

Los esfuerzos del hombre para convertir el suelo en una estructura resistente, estable y duradera se remontan a las civilizaciones más primitivas. Algunas tradiciones que perduran en nuestros días son ejemplo de estos procesos. En España puede considerarse como inicio de las estabilizaciones, en el concepto moderno de la mejora in situ de un suelo mediante la incorporación de cemento o cal mediante maquinaria adecuada, el amplio programa de

afirmado de caminos, comenzado en el año 1963, por el Instituto Nacional de Colonización (posteriormente IRYDA), y que afectó a una longitud superior a 260 km.

En 1974, en la autopista de Navarra se estabilizaron en unos 20 km los suelos de la explanada, y en 1985, unos 15 km en la carretera N-I, entre Cerezo y Boceguillas. Es a partir de 1996 cuando la estabilización empieza a ser una alternativa habitualmente considerada (1,8 millones de m<sup>2</sup> en la Autovía León – Burgos, 1,5 millones en la Autovía del Noroeste, 1,4 millones en la de las Rías Bajas en la provincia de León, 1,9 millones en la Autovía de Castilla en Salamanca o más de un millón en la Autovía de la Plata a su paso por Badajoz); cifras que se han visto incluso incrementadas posteriormente.

A estas obras incluidas en el Plan de Autovías se suman muchas otras carreteras autonómicas o provinciales, que a finales de 2010 sumaban una superficie total estabilizada superior a 80 millones de metros cuadrados. En ellos, en el 54% aproximadamente utilizó cemento (principalmente en Castilla y León) y en el 46% restante cal (sobre todo en Andalucía y Madrid).

A estas explanadas de carretera se suman muchos otros tipos de obras, como ampliaciones de aeropuertos (en el de Barajas se estabilizaron varios millones de m<sup>2</sup>), viales de polígonos industriales, zonas de aparcamiento, centros intermodales o zonas portuarias.



### CONCLUSIONES

La estabilización de suelos con cemento para mejorar sus características y permitir su aprovechamiento es una técnica moderna, económica y sostenible.

La incorporación de la misma a la normativa vigente y el gran número de equipos de última generación disponibles ha facilitado su desarrollo en todo el territorio nacional, siendo actualmente una solución ampliamente contrastada por sus ventajas técnicas, económicas y medioambientales.

### REFERENCIAS

- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3, artículo 512: "Suelos estabilizados in situ". O.C. 10/2002, de 30 de septiembre. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento.
- Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. ANCADE, ANTER, IECA. Madrid, 2008.
- Ponencias del 1<sup>er</sup>, 2<sup>o</sup> y 3<sup>er</sup> Simposio Internacional de Estabilización de Explanadas y Reciclado de Firmes (Salamanca, 2001; Paris, 2005; Antigua Guatemala, 2009).
- Ponencias de IV a VIII Congresos Nacionales de Firmes. Junta de Castilla y León, AEC (Segovia, 1998; León, 2000 y 2004; Ávila, 2006 y Valladolid, 2008).