



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

Estabilización de suelos en obras de carreteras

Pedro Andrés Rodríguez-Arias Julián

Orientação: Isabel Maria Ratola Duarte

Coorientação: Cândido Julián Marcos

Mestrado em Engenharia Geológica

Relatório de Estágio

Évora, 2015



O importante é não parar de questionar

AGRADECIMIENTOS

Tengo que dar las gracias a varias personas, que hoy me hacen que este viviendo este momento, y que pueda estar realizando este documento.

En primer lugar citar a Don Francisco Mata Cabrero, Director de la Escuela de Ingenieros de Almadén, así como a otros profesores de la Escuela de Almadén, Universidad de Castilla la Mancha, por hablarme del Máster en Ingeniería Geológica de la Universidad de Évora. También a la Empresa Española, EXACO Y DOPEX,S.A. y a uno de sus Ingenieros, Don Cándido Julián Marcos, el cual me dio la oportunidad de trabajar, para tener experiencia y a la vez estudiar para seguir formándome, además de ser mi Coorientador, para realizar este documento y transmitirme sus conocimientos. A la Profesora y Ingeniera Isabel María Ratola Duarte, por ayudarme y aceptar ser mi Orientadora, teniendo su apoyo en todo este proceso.

Además de muchos otros compañeros Ingenieros, que compartieron sus experiencias en obras conmigo, ayudándome a entender mejor la forma, tanto teórica, histórica, ensayos a realizar y puesta en obra de los trabajos de estabilización. Por otro lado, agradecer a mi familia y amigos, por toda el apoyo recibido para seguir con este Máster, así como a todos los trabajadores de la Universidad de Évora, por sus comprensión.

Gracias a todos.

RESUMO

Estabilização de solos em Obras Rodoviárias

No presente documento descrevem-se os trabalhos e estudos realizados, para a boa execução de estabilização de solos, além de relatar varias experiências de obras rodoviárias, tanto ao nível dos ensaios, como na execução dos trabalhos e duração dos mesmos.

Com as experiências apresentadas, demonstra-se a evolução em matéria de estabilização de solos, os estudos dos materiais, aplicações e aplicabilidade, os ensaios para controle de qualidade, os equipamentos e seu funcionamento. A principal finalidade da *Estabilização de Solos* é, por razões técnicas, económicas e ambientais, poder aproveitar os materiais existentes, melhorando o seu desempenho, através da aplicação de diferentes técnicas, processos e maquinarias que se descrevem no Relatório de Estágio.

Além das experiências citadas, apresenta-se também o ponto de vista do autor que trabalha numa Empresa há nove anos, relatando a sua experiência vivida em diferentes obras rodoviárias, onde se aplicaram os processos de melhoramento de solos, para realizar a execução de camadas de pavimento.

Palavra-chave: Estabilização, Solos, Ensaio, Obras Rodoviárias.

RESUMEN

Estabilización de suelos en Obras de carreteras

En el presente documento se describen los trabajos y estudios realizados, para la buena ejecución de la estabilización de suelos, además de relatar varias experiencias de obras de carreteras, tanto al nivel de los ensayos, como en la ejecución de los trabajos y duración de los mismos.

Con las experiencias presentadas, se demuestra la evolución en cuestión de estabilización de suelos, los estudios de los materiales, aplicaciones y usos, los ensayos para control de calidad, los equipamientos y su funcionamiento. La principal finalidad de la *Estabilización de Suelos* es, por razones técnicas, económico y ambientales, poder aprovechar los materiales existentes, mejorando su desempeño, a través de la aplicación de diferentes técnicas, procesos y maquinarias que se describen en el Informe de Estágio.

Además de las experiencias citadas, se presenta también el punto de vista del autor que trabaja en una Empresa desde hace nueve años, relatando su experiencia vivida en diferentes obras de carreteras, donde se aplicaron estos procesos de mejoramiento de suelos, para realizar la ejecución de capa de explanada.

Palabra clave: Estabilización, Suelos, Ensayos, Obras de carreteras.

ABSTRACT.

Ground stabilization in roadworks.

In this document, it does the description of the work and studies, for the successful execution of ground stabilization besides telling experiences of roadworks, both in terms, as in the implementation of the work and the duration of these.

With the experiences presented, it demonstrated the evolution in terms of ground stabilization, studies of materials, applications and uses, the tests for quality control, equipment and operation. The main purpose of ground *stabilization* is, for technical, economic or environmental issues, to take advantage of existing materials, improving them, using different techniques, processes and machinery that are described in the project.

Apart from these experiences, it also presents the point of view of the author who works in a company for nine years, telling his experience in different roadworks, where these processes of soil improvement were applied, for the execution of a esplanade layer.

Keyword: Stabilization, Soil, Assays, Roadworks

INDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES INICIALES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Bases y Subbases.....	2
1.3. Explanada y selección de firme.....	3
1.4. Áridos para carreteras.....	6
CAPÍTULO 2. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.....	13
2.1. Introducción.....	13
2.2. Limitaciones en la ejecución.....	34
2.3. La técnica de estabilización de explanadas.....	38
2.4. Análisis comparativo de la aplicación de diversas técnicas y conglomerantes.....	46
2.5. Factores que determinan el rendimiento de la estabilización con cemento por vía húmeda.....	53
2.6. Auscultación de suelos estabilizados <i>in situ</i>	56
2.7. Equipos para la ejecución de Obras de Estabilización y de Reciclado.....	60
2.8. Análisis de costes de las Unidades de Reciclado y Estabilizado <i>in situ</i> ...	65
2.9. Suelos Estabilizados <i>in situ</i> : criterios para la formación de explanadas y prescripciones técnicas de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento.....	67

CAPÍTULO 3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN.....	78
3.1. Estudio comparativo del empleo de los residuos de azucarera (espumas de cal), frente a la cal en la mejora y estabilización de suelos.....	78
3.2. Estabilización de sepiolita con cal.....	81
3.3. Ejemplos del uso de la cal en la mejora y estabilización de suelos en España.....	82
3.4. Estabilización con escorias de acería y cemento.....	85
CAPÍTULO 4. FIRMES CON CAPAS DE MATERIALES	
TRATADOS CON CEMENTO.....	90
4.1. Introducción.....	90
4.2. Clasificación de los materiales tratados con cemento.....	92
4.3. Firmes semirrígidos.....	97
4.3.1. Características de los materiales granulares para la fabricación de suelocementos.....	99
4.3.2. Proceso de fabricación del suelocemento.....	107
4.4. Dimensionamiento de firmes con capas tratadas con cemento.....	126
4.5. Suelocemento <i>in situ</i>	129
4.5.1. Ventajas, inconvenientes y contribución a la sostenibilidad.	130
4.5.2. Materiales y Fórmula de trabajo.....	136
4.5.3. Proyecto.....	140
4.5.4. Ejecución.....	144

4.5.5. Control de calidad.....	147
4.5.6. Aspectos a cuidar en la ejecución <i>in situ</i>	152
4.5.7. Ideas fundamentales.....	162
4.5.8. Suelocemento <i>in situ</i> frente a suelocemento de planta.....	162
5. PREFISURACIÓN Y DEFLEXIÓN.....	164
5.1. Capas tratadas con cemento, la prefisuración y su efecto sobre el IRI.	164
5.1.1 Estudio sobre el comportamiento de capas de suelocemento mediante la medida de deflexiones.....	167
5.1.2. Experiencias de prefisuración de capas tratadas con cemento en el Norte de España.....	168
6. INSPECCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD.....	169
6.1. Conservación de pavimentos.....	171
7. EXPERIENCIAS EN OBRAS.....	173
7.1. Experiencias en España en el Reciclado de Firmes con cemento, en Carreteras de montaña, carreteras Regionales, Vías de baja intensidad De Tráfico y carreteras locales.....	173
7.1.1. Experiencias en el Reciclado de firmes con cemento en la Red Provincial de Córdoba (España).....	173
7.1.2. Experiencia en Teruel (España).....	174

7.1.3. Reciclado con cemento de una Carretera de Montaña en Alicante (España).....	176
7.1.4. Experiencias en el reciclado <i>in situ</i> de firmes con cemento en carreteras regionales de Castilla y León.....	176
7.1.5. Experiencias en reciclado con cemento de Vías de Baja Intensidad de tráfico en Jaén (España).....	177
7.1.6. Experiencias <i>in situ</i> de firmes con cemento: dos Carreteras locales de Catilla y León (España).....	178
7.1.7. El Reciclado con cemento en las vías de Baja Intensidad de Tráfico.....	179
7.2. Experiencias en la ejecución de estabilizaciones y suelocemento de Extremadura.....	179
7.2.1. Experiencia 1ª: Carretera EX 342 de Alburquerque a Herrerueta.....	182
7.2.2. Experiencia 2ª: Carretera Local y camino agrícola entre Alcornera y La Lapa.....	183
7.2.3. Experiencia 3ª: Carretera Provincial Aceuchal – Villafranca.....	184
7.2.4. Experiencia 4ª: Carretera Provincial Olivenza de Mérida - Villagonzalo.....	185
7.2.5. Conclusiones de las Experiencias en Extremadura.....	186

7.3. Obra Nueva. Carretera EX 346 Quintana de la Serena	
(Badajoz – España).....	186
7.3.1. Situación de las Obras.....	186
7.3.1.1. Estudio Geotécnico de la zona.....	187
7.3.1.2. Estudio del Tráfico.....	194
7.3.2. Firmes y Pavimentos.....	203
7.3.3. Proceso de construcción.....	206
8. CONCLUSIONES.....	209
BIBLIOGRAFÍA.....	212

ANEXOS

Anexo A- Fichas Maquinaria móvil de trituración – Croquis de la planta de suelocemento.

Anexo B- Granulometrías.

Anexo C- Ensayos de suelocemento – Formula de trabajo (Dotación – Resistencia). Martillo vibrante y Maza.

Anexo D- Agua y cemento, usados para la mezcla.

Anexo E- Control diario de entradas y salidas de cemento a la planta, salidas de Tn de SC de la planta y superficie extendida diariamente de SC. Dotación media y espesores teóricos.

Anexo F- Topografía. Listados de nivelación antes y después de extendido del suelocemento.

Anexo G- Compactación de la capa de suelocemento (densidades y humedades).

Anexo H- Control de riego de curado - emulsión.

Anexo I- Control y ejecución de probetas – roturas.

Anexo J- Placas de carga en coronación de suelocemento.

Anexo K- Fotos.

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1.

Página.

Tabla 1.1 - Modulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga...	3
Tabla 1.2 - Deflexión Patrón.....	5

CAPÍTULO 2.

Tabla 2.1 - Clasificación de suelos para terraplenes y explanadas.....	23
Tabla 2.2 - Prescripciones de los suelos a utilizar en estabilizaciones.	24
Tabla 2.3 – Gráfico simplificado para determinar el conglomerante..	28
Tabla 2.4 - Etapas de la estabilización.....	33
Tabla 2.5 – Formación de explanada.....	68
Tabla 2.6 – Granulometría del suelo en las estabilizaciones con cemento.....	70
Tabla 2.7 – Características de los suelos estabilizados.....	70
Tabla 2.8 – Especificaciones del suelo estabilizado <i>in situ</i> con cemento.....	70

CAPÍTULO 3.

Tabla 3.1 – Humedad Densidad, según mezcla.....	86
Tabla 3.2 – Variabilidad de la resistencia.....	87
Tabla 3.3 – Resistencia, con respecto % de cemento.....	87
Tabla 3.4 – Resistencia – Cemento – Tiempo.....	88

CAPÍTULO 4.

Tabla 4.1 – Clasificación española de suelocemento.....	94
Tabla 4.2 – Clasificación española de gravacemento.....	96
Tabla 4.3 – Clasificación española de hormigón compactado.....	97
Tabla 4.4 – Características recomendables de los materiales Granulares para la fabricación de suelocemento.....	101
Tabla 4.5 – Características recomendables de los áridos para la Fabricación de gravacemento y hormigón compactado.....	104
Tabla 4.6 – Granulometrías de la gravacemento y hormigón Compactado (sin incluir el contenido de cemento).....	106
Tabla 4.7 - Comprobaciones que se suelen realizar en el tramo de Prueba.....	117
Tabla 4.8 - Recomendaciones acerca de la necesidad de prefisurar la capa tratada con cemento.....	120
Tabla 4.9 - Prescripciones de los suelos utilizados para suelocemento.....	137
Tabla 4.10 - Causas de las prescripciones de los suelo a utilizar en suelocemento.....	138

CAPÍTULO 7.

Tabla 7.1 – Evolución del Tráfico EX 346.....	195
Tabla 7.2 – Aforamiento tráfico.....	197

Tabla 7.3 – Datos de partida.....	198
Tabla 7.4 – IMD.....	200
Tabla 7.5 – Clasificación de suelos.....	203

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2.	Página.
Figura 2.1 - Estabilización de plataforma, junto al mar, con recicladora Wirtgen.....	14
Figura 2.2 - Estabilizadora de tambor con picas, recicladora Wirtgen.....	15
Figura 2.3 - Trabajos en trazado de obra lineal.....	16
Figura 2.4 - Trabajos de estabilización, con recicladoras sobre plataforma de gran superficie.....	17
Figura 2.5 - Trabajos en traza.....	18
Figura 2.6 - Descarga de material.....	19
Figura 2.7 – Compactación de la capa estabilizada, después de tratado con Wirtgen.....	20
Figura 2.8 – Trabajos con Wirtgen sobre la capa superior extendida previamente.....	21
Figura 2.9 - Trabajos en material.....	22
Figura 2.10 – Estabilizadora de picas.....	23
Figura 2.11 - Estabilizadora de tambor, con picas.....	23
Figura 2.12 - Trabajos de refino con motoniveladora.....	25
Figura 2.13 - Tren de compactación.....	27
Figura 2.14 - Riego con agua, de la superficie compactada, paso realizado para el buen curado de la misma.....	29

Figura 2.15 - Riego con emulsión de la superficie terminada, este paso debe realizarse poco tiempo después de realizar los trabajos de mezclado, refino y compactado.....	31
Figura 2.16 - Terminación de la capa, después de regada con emulsión.....	32
Figura 2.17 - Riego de Agua de la capa estabilizada.....	35
Figura 2.18 - Trabajos de compactación de la capa estabilizada.....	36
Figura 2.19 - Terminación superficial de la capa estabilizada, antes de emulsión.....	37
Figura 2.20 - Trabajos de estabilizado, con maquina Wirtgen.....	37
CAPÍTULO 4.	
Figura 4.1 - Puesta en obra extendido de suelocemento con extendedora.....	91
Figura 4.2 - Diferencia entre tensiones distribuidas a la explanada por las capas granulares y tratadas con cemento.....	92
Figura 4.3 - Clasificación de los materiales tratados con cemento....	93
Figura 4.4 - Clasificación Francesa de las diferentes categorías de Suelocemento.....	94
Figura 4.5 - Testigos extraídos de un firme con base de suelocemento.....	95

Figura 4.6 - Clasificación francesa de las diferentes categorías de Gravacemento.....	96
Figura 4.7 - Construcción de una base con material tratado con Cemento.....	97
Figura 4.8 - Tipos de firmes semirrígidos.....	98
Figura 4.9 -Prefisuración de una capa de material tratado con Cemento (Sistema Craft).....	100
Figura 4.10 - Gravas con y sin caras de fractura, en la imagen podemos ver cantos rodados y fracturados.....	102
Figura 4.11 - Fabricación fina de áridos (según granulometría).....	105
Figura 4.12- Compactación Proctor Modificado.....	107
Figura 4.13 - Esquema de todos los elementos que deben formar una Planta continua.....	109
Figura 4.14 - Central de fabricación discontinua.....	110
Figura 4.15 - Amasadora de doble eje horizontal.....	110
Figura 4.16 - Acopios de áridos.....	111
Figura 4.17 - Aspectos del interior de una amasadora de doble eje horizontal Forzado.....	112
Figura 4.18 – Extendedora de suelocemento.....	113
Figura 4.19 - Variación de la resistencia a compactación con la Densidad de la compactación.....	114
Figura 4.20 - Compactación de capa de suelo cemento.....	115

Figura 4.21 - Riego de curado camión con barra regadora horizontal.	116
Figura 4.22 - Equipo nuclear, medidor de densidad y humedad de la Capa.....	118
Figura 4.23 - Martillo vibrante con guías para la compactación en Probetas.....	118
Figura 4.24 - Extendido y prefisuración con juntas activas en la AP 8.....	119
Figura 4.25 - Testigo extraído de una junta realizada con el sistema de juntas activas.....	120
Figura 4.26 - Prefisuración en fresco tipo Craft que introduce un Chorro de emulsión.....	121
Figura 4.27 - Otros equipos de prefisuración en fresco que Introducen un chorro de emulsión.....	121
Figura 4.28 - Testigos de hormigón compactado – 4% cemento. Autopista del Cantábrico.....	122
Figura 4.29 - Aspecto superficial de un buen riego de adherencia.....	123
Figura 4.30 - Limpieza con agua a presión.....	123
Figura 4.31 - Limpieza con la barredora.....	124
Figura 4.32 - Ensayo de compactación de la adherencia entre capas.	125
Figura 4.33 - Modelos de respuesta de firmes.....	127
Figura 4.34 - Extendido de material tratado con cemento.....	128

Figura 4.35 – Suelocemento <i>in situ</i> - trabajos maquinaria mezcladora, Wirtgen de picas.....	130
Figura 4.36 - Vista traza después de los trabajos de vuelocemento <i>in situ</i>	131
Figura 4.37 - Trabajos maquina estabilizadora Wirtgen.....	132
Figura 4.38 - Trazado y riego de curado del suelo estabilizado.....	132
Figura 4.39 - Suelos muy plásticos, empleados en la realización de un fallido vuelocemento <i>in situ</i>	135
Figura 4.40 - Detalle del vuelocemento realizado <i>in situ</i> , antes de Su compactación y refino.....	137
Figura 4.41 - Aspectos del vuelocemento <i>in situ</i> a la salida del Equipo, material sin refinar ni compactar.....	139
Figura 4.42 - Diferentes tipos de vuelocemento realizado <i>in situ</i> (barridos y limpios).....	140
Figura 4.43 - Rehabilitación de un carril mediante técnica de Suelocemento.....	141
Figura 4.44 - Perspectiva de los equipos de compactación y refino del material.....	142
Figura 4.45 - Suelo muy fino sin estructura granular, no aconsejable para realizar vuelocemento.....	143
Figura 4.46 - Control de espesores, humedad y densidad.....	144
Figura 4.47 - Control de humedad y densidad.....	147

Figura 4.48 - Probetas de suelocemento con terrones de partículas no plásticas disgregadas.....	148
Figura 4.49 – Dosificador de lechada se hunde en un suelo arenoso.	148
Figura 4.50 - Fisura aparecidas por fallo de algún inyector y calicata de comprobación.....	149
Figura 4.51 - Fisura aparecidas por falta de solape en la construcción.....	150
Figura 4.52 - Prefisuración del suelocemento.....	154
Figura 4.53 - Nivelación de suelocemento, con equipo 3D.....	157
Figura 4.54 - Equipos de suelocemento in situ en un ensanche.....	158
Figura 4.55- Detalle de la terminación del suelocemento realizado <i>in situ</i> correctamente.....	160

CAPÍTULO 7.

Figura 7.1 – Transversales tipos de explanadas.....	205
Figura 7.2 – Sección Tipo. Corte Transversal de Firme.....	206

Las Figuras y Tablas, que no tienen referencia bibliográfica, son del Autor o adjuntadas por Ingenieros colaboradores en este trabajo, tanto compañeros de Empresa, Administración o Universitarios.

SIMBOLOGÍA

CEDEX	- Centro de estudios y experimentación de Obras Públicas.
UNE	- Una Norma Española.
CEN	- Comité Europeo de Normalización.
NLT	- Normas del CEDEX, comienzan en 1958.
SAHOP	- Subsecretaria de asentamientos humanos y obras publicas.
E1	- Explanada Tipo 1.
E2	- Explanada Tipo 2.
E3	- Explanada Tipo 3.
CBR	- California Bearing Ratio.
S-EST 1	- Suelo estabilizado 1.
S-EST 2	- Suelo estabilizado 2.
S-EST 3	- Suelo Estabilizado 3.
CEM I	- Cemento Portlant.
CEM II	- Cemento Portlant más adiciones.
CEM III	- Cemento Portlant más escorias de horno alto.
CEM IV	- Cemento Puzolánicos.
CEM V	- Cemento Compuesto.
ESP	- Cemento Especiales.
DGCMF	- Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento.
PG	- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales.

IC	- Instrucción de Carreteras.
IMD	- Intensidad Media Diaria.
IECA	- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.
CCPA	- Carbonato Cálcico Precipitado de Origen Azucarero.
N	- Newton.
mm	- Milímetros.
cm	- Centímetro.
m	- Metro.
Km	- Kilometro.
ECR-1	- Tipo de Emulsión cationica.
g	. Gramos
EAR-1	- Emulsión Bituminosa anionica.
IP	- Índice de Plasticidad.
MO	- Materia Orgánica.
MPa	- Mega Pascales.
IRI	- Índice de Regularidad Internacional, unidad de medida dm/hm.
T2	- Uno de los tipos de categoría de Tráfico.
AC	- Aglomerado en Caliente (S fino – G grueso).
UTE	- Unión Temporal de Empresas.
HC	- Hormigón Compactado.
EHE	- Instrucción Estructuras de Hormigón.
ICCP	- Ingeniero de Caminos Canales y Puertos.

CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES INICIALES

1.1. Introducción

Los áridos constituyen, en un porcentaje en general superior al noventa por ciento, la mayoría de las capas de los firmes de carreteras (Aduvire et al, 1994). Esos elevados volúmenes condicionan económicamente su selección, limitándose necesariamente las distancias de transporte. Por otra parte los grandes volúmenes de materiales van unidos a menudo a la dificultad de conseguir la necesaria homogeneidad, lo que se traduce en peculiaridades en el proceso de control de las características exigidas a los áridos.

Dichos volúmenes justifican por si mismos la necesidad de estudiar los materiales en el laboratorio, a fin de valorar su calidad en función de las especificaciones vigentes. Las muestras a emplear para los estudios de laboratorio han de ser representativas de los materiales que se van a analizar. La realización de los ensayos se han de realizar de acuerdo con las correspondientes normas de ensayo que, para los materiales empleados en carreteras, son en España las normas **NLT de Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)**. En este campo completan a la norma **UNE**, que son de aplicación General. También, la normativa **EN elaboradas por el Comité Europeo de Normalización (CEN)**.

La calidad final de los áridos, y por tanto su aptitud, depende de la naturaleza petrológica de los mismos, pero también en gran medida de su proceso de preparación. Aunque en la fase de proyecto se suelen evaluar las posibles procedencias definitivas se establece en la fase de construcción.

En suma, la importancia técnica y económica de los áridos en la construcción de carreteras es de tal magnitud que el resultado final de la obra estará fuertemente condicionado por la selección de los áridos.

Las capas, bases y subbases están principalmente relacionadas con los pavimentos flexibles de superficie asfáltica, de superficie adoquinada o empedrada. Constituyen un elemento estructural muy importante. Muchos de esos pavimentos deben su adecuado comportamiento y su larga vida, a la calidad y espesor de esas capas, principalmente las bases, que es el corazón de los pavimentos flexibles. En los pavimentos rígidos, el pavimento está formado exclusivamente por la losa. Si el tránsito es intenso y el suelo

es pobre, se debe incluir una base o subbase, como se le llama. En caso contrario, no se justifica la inclusión de esa capa.

1.2. Bases y Subbases.

En el pavimento flexible (de asfalto, adoquines o empedrados) las capas de base o subbase tienen la principal función de contribuir mucho a la capacidad de soportar cargas del pavimento (Vicente Plasencia Plasencia, Profesor de la Universidad de Extremadura). La base debe tener la suficiente resistencia para recibir la carga de la superficie arriba de ella y transmitir, a un nivel de esfuerzo adecuado, a la capa siguiente, que puede ser una subbase .

Actualmente podemos considerar dos clases de bases:

Base granular: de grava triturada y mezcla natural de agregado y suelo.

Base estabilizada: Suelos con cemento Portland, cal o asfalto.

En las primeras bases granulares, la estabilidad del material depende de la fricción interna y de su cohesión (Vicente Plasencia Plasencia, Profesor de la Universidad de Extremadura). Una alta fricción interna se consigue con agregado bien graduado, forma irregular y con una pequeña cantidad de finos limos arenosos. En las bases estabilizadas, la estabilidad depende de la resistencia proporcionada por la liga del suelo y cemento, cal o asfalto. Aquí, la granulometría es de importancia secundaria en relación con la resistencia obtenida. Los requisitos de la calidad para las bases granulares son según **SAHOP** SUBSECRETARIA DE ASENTAMIENTOS HUMANOS Y OBRAS PUBLICAS (granulometría, equivalente de arena, índice de durabilidad y compactación).

La capa subbase, en los pavimentos flexibles tiene como principal función abaratar el costo del pavimento, si el espesor de la base es de más de 20 cm, conviene sustituir parte de ese espesor con un material de menor calidad, que abunde localmente. Los requisitos generales de calidad para este material son granulométricos. Las subbases en los pavimentos, tienen una función complementaria de un suelo pobre o malo, y se les asigna poco valor estructural, siendo su uso en los siguientes casos:

- si el pavimento va tener tránsito intenso;
- si el suelo es fino y plástico.

En los pavimentos rígidos, se incluye una capa subbase, para:

- prevenir falla por bombeo;
- para proteger de las heladas;
- para contrarrestar los cambios volumétricos;
- para aumentar la capacidad soportante;
- como auxiliar en la construcción.

Para que se produzca falla por bombeo en pavimentos rígidos se requiere que exista: intenso tránsito pesado, agua acumulada, que tenga muchas partículas finas; si uno de estos factores no existe, no hay falla por bombeo.

En España pocas regiones padecen fuertes heladas, el tiempo necesario para perjudicar el suelo, solo queda el casos de construir un pavimento, sobre suelo muy arcilloso. En este caso, basta incluir una capa subbase de 10 cm de espesor, para contrarrestar las expansiones del suelo arcilloso. En algunos casos, el suelo puede ser muy arenoso y para facilitar la construcción sobre este material, conviene mejorar.

1.3. Explanada y selección del firme

A los efectos de definir la estructura del firme en cada caso, se establecen categorías de explanadas, estas categorías se determinan según el modulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga E_{v2} , obtenido de acuerdo con la **NLT 357**, ensayo de carga con placa, cuyos valores se recogen en esta tabla.

Tabla 1.1- Modulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (Inst. 6.1-IC, 1989).

CATEGORIA DE LA EXPLANADA	E1	E2	E3
E_{v2} (MPa)	≥ 60	≥ 120	≥ 300

La formación de las explanadas de las distintas categorías, son función del tipo de suelo de la explanación o de la obra de tierra subyacente, y de las características y espesores de los materiales disponibles, según se definen en el artículo **330 del Pliego de**

Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (Ministerio de Fomento, 2004).

Para la correcta aplicación, se deberán tener en cuenta los siguientes criterios:

- todos los espesores que se indican son los mínimos especificados para cualquier punto de la sección transversal de la explanada;
- los materiales empleados ha de cumplir las prescripciones contenidas en los correspondientes artículos del PG 3, además de las complementarias;
- la sección transversal se estructura según el tipo de suelo de la explanación en el caso de los desmontes, o de la obra de tierra subyacentes en el caso de los terraplenes, los pedraplenes o los rellenos todo-uno, se consideran de los siguientes tipos:
 - inadecuados y marginales (IN);
 - tolerables (O);
 - adecuadas (1);
 - seleccionados (2);
 - seleccionados con $CBR \geq 20$ en las condiciones de puesta en obra (3);
 - roca (R);
- a los efectos de aplicación de esta norma, los pedraplenes y rellenos todo-uno, salvo que se proyecten con materiales marginales, serán asimilados a los suelos tipo 3;
- para poder asignar a los suelos de la explanación o de la obra de tierra subyacente una determinada clasificación deberán tener un espesor mínimo de un metro del material; en caso contrario, se asignara la clasificación inmediatamente inferior;
- salvo justificación en contrario, será preceptivo proyectar una capa de separación (estabilización in situ con cal en 15 cm de espesor, geotextil, membrana plástica, etc.) entre los suelos inadecuados o marginales con finos plásticos y las capas de suelo adecuado o seleccionado, para la formación de explanadas del tipo E2 y E3 en las categorías de tráfico pesado T00 a T2.

A los efectos del control de ejecución de las explanadas y para las categorías de tráfico pesado T00 y T2, el Proyecto deberá exigir una deflexión patrón máxima de acuerdo con los indicado.

Tabla 1.2 - Deflexión patrón (Inst. 6.1-IC, 1989)..

CATEGORIA DE LA EXPLANADA	E1	E2	E3
DEFLEXION PATRON (10^{-2} mm)	≤ 250	≤ 200	≤ 125

Con carácter general, para la capa superior utilizada en la formación de las explanadas al proyectista la consideración preferente de los suelos estabilizados *in situ*, con cal o con cemento, frente a una eventual aportación de suelos.

La cota de la explanada deberá quedar al menos a sesenta centímetros por encima del nivel más alto previsible de la capa freática donde el macizo de apoyo, este formado por suelo seleccionado, a ochenta centímetros donde esté formado por suelo adecuado a cien centímetros donde sean tolerables, y a ciento veinte centímetros donde sean marginal o inadecuado. A tal fin se adoptaran medidas tales como la elevación de la rasante de la explanada, la colocación de drenes subterráneos, la interposición de geotextiles o de una capa drenante, etc., y se asegurara la evacuación del agua infiltrada a través del firme de la calzada y de los arcenes.

Salvo justificación en contrario, a los efectos de la definición de las secciones de firme se unificarán las explanadas por su categoría, de tal manera que no haya tramos diferenciados en el proyecto de menos de quinientos metros.

Los materiales utilizables en la explanada, para los que el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares deberán incluir las prescripciones complementarias. Las explanadas con materiales diferentes de los considerados (residuos, subproductos, etc.) serán clasificadas, cuando sea posible, por analogía y, en otro caso, mediante un estudio específico, en desmontes en roca se evitara la retención del agua en la explanada mediante un sistema de drenaje adecuado y el relleno con hormigón tipo HM 20, de las depresiones que puedan retener el agua.

Para el dimensionamiento de las secciones de firme, por el procedimiento más generalizado entre las Administraciones de Carreteras, se basa, fundamentalmente, en la intensidad de tráfico pesado y los niveles de deterioro admisibles al final del periodo de proyecto. Las secciones de firme según la categoría de tráfico pesado y la categoría de

explanada, entre las posibles soluciones se seleccionara en cada caso concreto la más adecuada técnica y económicamente, todos los espesores de capa señalados se consideran mínimos en cualquier punto de la sección transversal del carril del proyecto. Cada sección se designa por un número de tres o cuatro cifras:

- la primera (si son tres cifras) o las dos primeras (si son cuatro cifras), indican la categoría de tráfico pesado, desde T00 a T42;
- la penúltima indica la categoría de explanada, desde E1 a E3;
 - o E1, CBR 5 – 10;
 - o E2, CBR 10 – 20;
 - o E3, CBR > 20;
- la última indica el tipo de firme:
 - o 1, mezclas bituminosas sobre capa granular;
 - o 2, mezclas bituminosas sobre suelocemento;
 - o 3, mezclas bituminosas sobre gravacemento construida sobre suelocemento.
 - o 4, pavimento de hormigón.

También admiten, si se justifica adecuadamente, la posibilidad de un dimensionamiento con soluciones, pudiendo ser interesante técnica o económicamente, por esta razón se han desarrollado unos coeficientes de equivalencia, respecto a las mezclas bituminosas en caliente convencionales, como aspecto muy importante en cualquier circunstancia, también existen limitaciones constructivas, que deben ser detenidas en cuanto tanto en el proyecto como en la construcción.

1.4. Áridos para carreteras

Según la procedencia de los áridos, pueden ser naturales, de la disgregación de rocas, son los más habituales en la técnica de carreteras. Se extraen en canteras o yacimientos de origen marino, eólico o fluvial (arenosos o graveras). La forma de explotación tiene una importancia decisiva para conseguir un árido adecuado, pues es posible que en este proceso se pueda obtener un árido aceptable de una procedencia mediocre o viceversa.

Las características físicas de los áridos requeridas para su empleo en firmes son una consecuencia de la naturaleza mineralógica de la roca de procedencia, aunque puede parecer clara la aptitud de determinados materiales pétreos, los criterios económicos son

los que más influyen en la elección final, con lo que el empleo de cada tipo de árido depende fundamentalmente de las disponibilidades de materiales en las zonas relativamente próximas a la obra, por ello, es normal que en cada zona se utilicen casi siempre los mismos áridos locales, cuya idoneidad ha sido sancionada por la experiencia de obras anteriores.

Los áridos pueden proceder de rocas eruptivas, metamórficas o sedimentarias, se pueden clasificar, desde un punto de vista práctico, en tres grupos, calizos, silíceos e ígneos y metamórficos, con este criterio a continuación se exponen una serie de consideraciones sobre los áridos de utilización más generalizada en España.

La caliza es el tipo de roca más común de la Península Ibérica, siendo Galicia la única zona con escasez de este material, su empleo está generalizado en todas las capas de firmes, exceptuándose únicamente su empleo como árido grueso en capas de rodadura, pues se trata de una roca fácilmente pulimentable (con tráfico intenso puede dar lugar a superficie deslizantes en un periodo de tiempo corto), es el tipo de árido que debido a su carácter básico, presenta en general menores problemas de adhesión, es decir, de afinidad con los ligantes hidrocarbonados, se utiliza por ello para mejorar esta característica en mezclas bituminosas cuando se emplean además otro tipo de áridos más duros, pero también más ácidos, los áridos calizos tienen también buena afinidad con los cementos. En ocasiones se encuentran materiales de tipo calizo con altas proporciones de minerales no calcáreos, los ensayos que figuran en los pliegos suelen servir en general para evaluar la calidad del material, sin embargo, a veces se trata de rocas duras y poco frágiles, que cumplen en cuanto a características mecánicas, pero que pueden originar problemas no detectables en ensayos más habituales, sin embargo, pueden ponerse de manifiesto mediante un sencillo estudio petrográfico.

El árido silíceo procedente del machaqueo de gravas naturales es otro material de amplia utilización en todas las capas de los firmes por su abundancia en España, habiendo zonas en las que se emplean para las obras solo gravas machacadas, al ser este prácticamente el único material existente, se extraen de yacimientos granulares, en los que las partículas de mayor tamaño se separan por cribado y a partir de ellas, por machaqueos sucesivos, se obtienen fracciones de menor tamaño, con una angulosidad tanto mayor cuantas más caras de fractura presenten, en ciertos yacimientos es difícil, sin embargo, encontrar bolos con un tamaño suficiente para garantizar, después del

proceso, el número mínimo de caras de fractura requerido. Pueden no aportar una suficiente adhesividad con los ligantes hidrocarbonatados, sin embargo si el material obtenido tiene elevado contenido de sílice y de caras de fractura, sus características mecánicas y su rozamiento interno proporcionan un esqueleto mineral bueno para utilizarlo incluso en mezclas bituminosas sometidas a la acción directa del tráfico.

Se trata de materiales que por sus características son especialmente adecuados para su empleo con áridos gruesos en capas de rodadura. Pueden incluirse en este grupo los basaltos, grabos, pórfidos, granitos, cuarcitas, etc. Sus cualidades de resistencia al pulimento los hacen idóneos en un periodo de tiempo dilatado, incluso con tráfico intensos. Dentro de este grupo tan amplio, los áridos de naturaleza más ácida pueden presentar una deficiente adhesividad con los ligantes hidrocarbonados, pero en la mayoría de los casos el problema se puede obviar bien con activantes o eventualmente con emulsiones adecuadas y en el caso de mezclas bituminosas con el empleo de finos de naturaleza básica y un polvo mineral adecuado, la naturaleza de estos áridos depende de criterios técnicos y económicos en los que a menudo tienen mayor peso los últimos, el precio es el inconveniente más importante que tienen todos estos minerales y a las distancias de transporte.

La mayor parte de los áridos utilizados en la construcción de firmes proceden de rocas fragmentadas, sin embargo determinadas consideraciones pueden conducir en ocasiones a la utilización de áridos artificiales, consideraciones ambientales, energéticas y de eventual escasez de áridos naturales, así como, incluso la necesidad de obtener características especiales, estos áridos proceden bien de procesos industriales de los cuales son un subproducto o bien del tratamiento industrial de los áridos naturales, también pueden proceder de demoliciones y de reciclados de firme, desde otro punto de vista, los áridos artificiales pueden clasificarse también en función de su empleo en capas de rodadura o de su uso exclusivo en capas inferiores.

Entre los áridos artificiales que son subproductos de procesos industriales, cabe citar los siguientes: estériles de explotaciones minerales y de canteras, escorias cristalizadas de alto horno, escorias de acerería, cenizas volantes de centrales térmicas, escorias de la incineración de residuos sólidos urbanos, residuos de industrias cerámicas y del vidrio, etc. También cabría incluir aquí los obtenidos a partir del machaqueo y clasificación de productos de demolición y del reciclado de firmes antiguos. Por ejemplo en la

construcción del Cinturón Litoral de Barcelona se emplearon para las capas inferiores del firme grandes cantidades de áridos reciclados, procedentes de escombros de demolición de diferentes tipos de estructuras.

También existen los áridos manufacturados, que proceden del tratamiento industrial de áridos naturales. Con ellos se suele pretender conseguir, características especiales, para capas de rodadura, en particular una elevada resistencia al deslizamiento, como ocurre con los tres tipos de estos áridos artificiales más conocidos, arcillas expansivas, sílice calcinada y bauxita calcinada, en los tres casos se trata de áridos porosos, lo que hace que la microtextura del árido se esté renovando continuamente con la acción abrasiva del tráfico, sin que su superficie llegue a estar pulida, además algunos de ellos son de color blanco, lo que les hace idóneos para ser utilizados en zonas que están permanentemente iluminadas, especialmente vías urbanas, pues en ellas interesa que la capa de rodadura sea de color suficiente claro para conseguir ahorros e iluminación.

La definición de áridos marginales engloba a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes, estas consideraciones hace que en muchas ocasiones se rechacen materiales de buena calidad, que no satisfacen alguna de las exigencias, aunque solo sea en un pequeño lote o por un pequeño margen, no se tiene en cuenta que, en ocasiones, estos materiales marginales pueden ser de mayor calidad que otros materiales que satisfacen todas las exigencias al valor mínimo. Lo más lógico en este sentido sería fijar los rangos de variación de las diferentes propiedades de unos en función de los otros. Fundamentalmente por razones ambientales se imponen cada vez más la necesidad de aprovechar los materiales locales, aunque en principio no satisfagan todas las especificaciones, con estudios complementarios y recurriendo en su caso a los tratamientos necesarios, cabe la posibilidad de emplear estos áridos marginales, no solo en carreteras secundarias sino también en autopistas y autovías. El empleo de este tipo de áridos puede dar buenos resultados, evitando así el transporte de otros materiales desde distancias considerables. Sin embargo, el empleo de áridos marginales puede hacer necesarios recurrir a otros préstamos, a fin de adecuar la calidad del conjunto a las especificaciones que se requieran en cada caso. De todos modos ha de tenerse en cuenta, que la calidad final de la capa a construir debe primar sobre otras consideraciones, especialmente en el caso de capas de rodadura y del posible riesgos de inseguridad en la circulación por insuficiencia de la resistencia al deslizamiento.

Por su tamaño, los áridos pueden clasificarse en gruesos, finos y polvo mineral, aunque existen una amplia gama de términos bastante imprecisos y que incluso varían según las regiones, las especificaciones de la Dirección General de Carreteras. En resumen, las principales características que se deben tener en cuenta en los áridos para carreteras son las siguientes:

- naturaleza e identificación, evaluación de la naturaleza petrológica de los áridos, grado de alteración de los componentes minerales, porosidad y propiedades químicas;
- propiedades geométricas, básicamente la forma y angulosidad de las partículas, como relación al conjunto del esqueleto mineral se estudia la distribución granulométrica;
- propiedades mecánicas, engloban metros básicos de resistencia al desgaste y al pulimento;
- ausencia de impurezas, es fundamental que los áridos a emplear en firmes estén libres de impurezas capaces de afectar el buen comportamiento de las capas, unos áridos sucios pueden ser causa más que suficiente para provocar la degradación de un firme de una carretera;
- inalterabilidad, es imprescindible la evaluación de las posibles degradaciones que puedan sufrir los áridos una vez puestos en obra, así, por los materiales evolutivos han de ser empleados como especiales precauciones para evitar comportamientos anómalos que puedan afectar a la vida útil de las capas;
- adhesividad, los áridos han de ser afines con los ligantes que se vayan a emplear y en caso de problemas será necesario el uso de activantes para garantizar el buen comportamiento de las mezclas.

Existen diferentes características de los áridos, como son, forma y angulosidad, resistencia al desgaste, resistencia al pulimento, adhesividad y existencia al desplazamiento, plasticidad y limpieza, alterabilidad, otras características básicas del esqueleto mineral, como son, granulometría y rozamiento interno.

El polvo mineral desempeña, por su elevada superficie específica, un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas bituminosas, en función de su naturaleza, finura, actividad y proporción en la que entra a formar parte de la mezcla, puede ser el contenido en los áridos, procedente del machaqueo de los mismos, un producto

comercial de naturaleza pulverulenta o un polvo especialmente preparado para este fin. Las especificaciones suelen dar recomendaciones sobre si el polvo mineral de las mezclas bituminosas puede ser el propio de los áridos o debe ser necesariamente, en todo o parte, de aportación en cualquier caso, debe tratarse de un material no plástico. En otras unidades de obra diferentes de las mezclas, esta fracción no se suele considerar separadamente del resto del árido fino y, por supuesto, es de la misma naturaleza. Los ensayos de caracterización del polvo mineral habitualmente exigidos son el de emulsibilidad y el de densidad aparente en tolueno. Con este se comprueba que no es excesiva la finura del polvo mineral, lo que podría dar lugar a problemas de envuelta con el ligante. Con el ensayo de emulsibilidad se analiza si el polvo mineral presenta mayor afinidad con un ligante hidrocarburado tipo que con el agua (Aduvire et al, 1994).

En España actualmente el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (Orden FOM, 2002) no incluyen un artículo específico de áridos, ello da lugar a tratamientos y consideraciones diferentes para las distintas unidades de obra en las que se colocan los áridos, lo que dificulta notablemente las tareas de control de calidad y es motivo de importantes conflictos entre los directores de obra y los constructores. Los ensayos se establecen de manera general, olvidando que en muchos tipos de áridos, por su origen, no son de aplicación, no se valora la homogeneidad de los valores de los ensayos en los diferentes lotes, es imprescindible la aplicación de criterios estadísticos para fijar los umbrales de aceptación y rechazo de los diferentes materiales.

El mercado español de los áridos para carreteras está en la actualidad insuficientemente regulado desde el punto de vista técnico, si bien son necesarios una serie de permisos para la explotación de una cantera o un yacimiento, se están colocando en carreteras muchos áridos que proceden de explotaciones con pocas garantías de calidad. Para mejorar esta situación sería conveniente que se dictaran disposiciones en materia de áridos como se ha hecho en otros países, para facilitar las labores de control de la explotación, y de la calidad de carreteras. En este sentido resultan imprescindibles la homologación de las instalaciones productoras y la de los materiales a emplear en cada aplicación, las administraciones de carreteras deberían poseer informaciones relativa a los siguientes aspectos:

- calidad de las instalaciones de machaqueo y clasificación;

- volumen de producción total;
- fraccionamiento de los áridos adaptado a los husos granulométricos normalizados;
- volumen de producción de cada fracción;
- homogeneidad de producción;
- limpieza de los acopios;
- existencia de instalaciones para control de calidad;
- certificados de calidad de cada suministro.

CAPÍTULO 2. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

2.1. Introducción

Como su nombre indica con este recurso se pretende hacer más estable a un suelo, la primera y la que siempre acompaña a todas las estabilizaciones, es la de aumentar la densidad de un suelo, compactándolo mecánicamente, la segunda estabilización usada es la de mezclas a un material de granulometría gruesa, otro que carece de esa característica, finalmente, está el recurso de estabilizar un suelo, mezclándole cemento Portland, cal hidratada, asfalto o cloruro de sodio. El uso de la cal está limitado a suelos que contengan minerales arcillosos, con los cuales hacer la acción puzolanica que lentamente va cementando las partículas del suelo, la utilidad de la cal es para aquellos casos en los que no se necesite pronta resistencia, este aglomerante es muy adecuado para bajar la plasticidad de los suelos arcillosos o para contrarrestar el alto contenido de humedad en terracerías o en bases y subbases, siempre que estas no sean muy arenosas. El ingeniero de pavimentos debe recordar que la estabilización es un asunto económico, que hay casos en los que es mejor y más barato recurrir a un mejoramiento del suelo del lugar, que transportar otro material desde grandes distancias. La estabilización de suelos es una técnica mediante la incorporación de un conglomerante, para permitir su aprovechamiento. Los siguientes casos pueden justificar una estabilización:

- un suelo desfavorable, o muy arenoso, o muy arcilloso;
- materiales para base o subbase en el límite de especificaciones;
- condiciones de humedad desfavorables;
- cuando se necesite una base de calidad superior, como en una autopista;
- en repavimentación, aprovechando los materiales existentes.

Los materiales más usados para mezclarlos con suelo para formar capas de pavimento son: el cemento, la cal y el asfalto. 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.

La contribución a la sostenibilidad, es el aprovechamiento de los suelos existentes mediante la estabilización (Fig 2.1), incluso en el casos 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 suprime las operaciones de remoción de los suelos existentes y su transporte a vertedero, así como la 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 le suman importantes benéficos económicos.



Figura 2.1 - Estabilización de plataforma junto al mar, con recicladora Wirtgen (Guía Técnica, 2013).

Las ventajas medioambientales son:

- el empleo de usos de la traza evitar explotar nuevos yacimientos y disminuir la necesidad de vertederos (Fig. 2.2);
- la eliminación del transporte de los suelos disminuye las emisiones de CO₂ y otros contaminantes y reduce el daño que generan los combustibles y aceites,

así como los impactos colaterales (polvo, erosión y otros) que provocan sobre la carretera y flota adyacente;

- 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 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 disminuye con ello notablemente la contaminación y las emisiones de vapores nocivos.



Figura 2.2- Estabilizadora de tambor con picas, recicladora Wirtgen (Guía Técnica, 2013).

Las ventajas técnicas, son:

- 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 (Fig. 2.4);
- 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 el transportar los suelos a vertedero y aportar otras nuevas.

Las ventajas económicas, son:

- el empleo de los suelos de la traza y la eliminación del transporte suponen una reducción importante de costes (Fig. 2.3);



Figura 2.3 - Trabajos en trazado de obra lineal (Guía Técnica, 2013).

- 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.



Figura 2.4 - Trabajos de estabilización, con recicladoras sobre plataforma de gran superficie (Guía Técnica, 2013).

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. 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 \varnothing 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.

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 (Fig. 2.5).



Figura 2.5 - Trabajos en traza.

La gama de suelos que se pueden estabilizar con cemento es muy amplia (Fig.2.6).



Figura 2.6 - Descarga de material (Guía Técnica ,2013).

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 si puede actuar el cemento, lográndose obtener una resistencia apreciable (Fig. 2.7). 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 periodo de actuación de la cal de al menos 5 o 6 horas (plazo que se debe definir en los ensayos previos).



Figura 2.7 – Compactación de la capa estabilizada, después de tratado con la Wirtgen (Guía Técnica, 2013).

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 ESPVI-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 el cemento 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 procurar emplearse cementos de resistencia media o baja (clase 32,5 N o 22,5 en el caso de cementos ESP) (Fig.2.8 y 2.9), 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 (Guía Técnica, 2013).



Figura 2.8 – Trabajos con la Wirtgen sobre la capa superior extendida previamente (Guía Técnica, 2013).

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).

En la Norma 6.1-IC sobre Secciones de firme del Ministerio de Fomento (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1989), 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 (Fig. 2.10) En el caso de los suelos sin tratar (Tabla 2.1), 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 (Ministerio de Fomento, 2004).



Figura 2.9 - Trabajos en material.

Tabla 2.1 - Clasificación de suelos para terraplenes y explanadas.

	Suelos marginales	Suelos tolerables	Suelos adecuados	Suelos seleccionados
Granulometría (UNE 103101)			Omax ≤ 100 mm Pasa # 2 mm < 80% Pasa # 0,080 mm < 35%	Omax ≤ 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 ≥ 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)	< 0,2%	< 0,2%
Materia orgánica (UNE 103204)	< 5%	< 2% < 1% (E)	< 1%	< 0,2%
CBR (UNE-EN 13286-47)		≥ 3 (E)	≥ 5 (E) ≥ 6 (Ex)	≥ 10 (E) ≥ 12 (Ex) ≥ 20 (*)



Figura 2.10 – Estabilizadora de picas (Guía Técnica, 2013).

En el artículo 512, Suelos estabilizados in situ del PG-3 (Ministerio de Fomento, 2004) se exponen las características exigidas a los suelos para poder ser estabilizados con cemento o cal (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 - 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 μm (%)	UNE 103 101	≥ 15		
		Suelo con cemento	Pase 63 μm (%)	UNE 103 101	< 50	< 35
	Pase 2 mm (%)		UNE 103 101	< 20		
PLASTICIDAD	Suelo con cal	IP	UNE 103 104	≥ 12	≥ 12 y ≤ 40	---
		LL	UNE 103 103	---	≤ 40	
	Suelo con cemento	IP	UNE 103 104	≤ 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 suelos estabilizados 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 (Fig. 2.11 y 2.12). También se han estabilizado rocas evolutivas para conseguir una buena explanada en la AP-1 entre Eibar y Vitoria.



Figura 2.11 - Estabilizadora de tambor, con picas (Guía Técnica, 2013).



Figura 2.12 - Trabajos de refinó con motoniveladora.

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 o 45 cm. Así, para obtener una explanada E1 sobre suelos inadecuados o marginales, algunas de las opciones son, de acuerdo con La Normativa existente.:

- 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.

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 (Fig. 2.13)) 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.



Figura 2.13 - Tren de compactado sobre la capa tratada.

Etapas previas a la ejecución:

A - 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 validas 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.

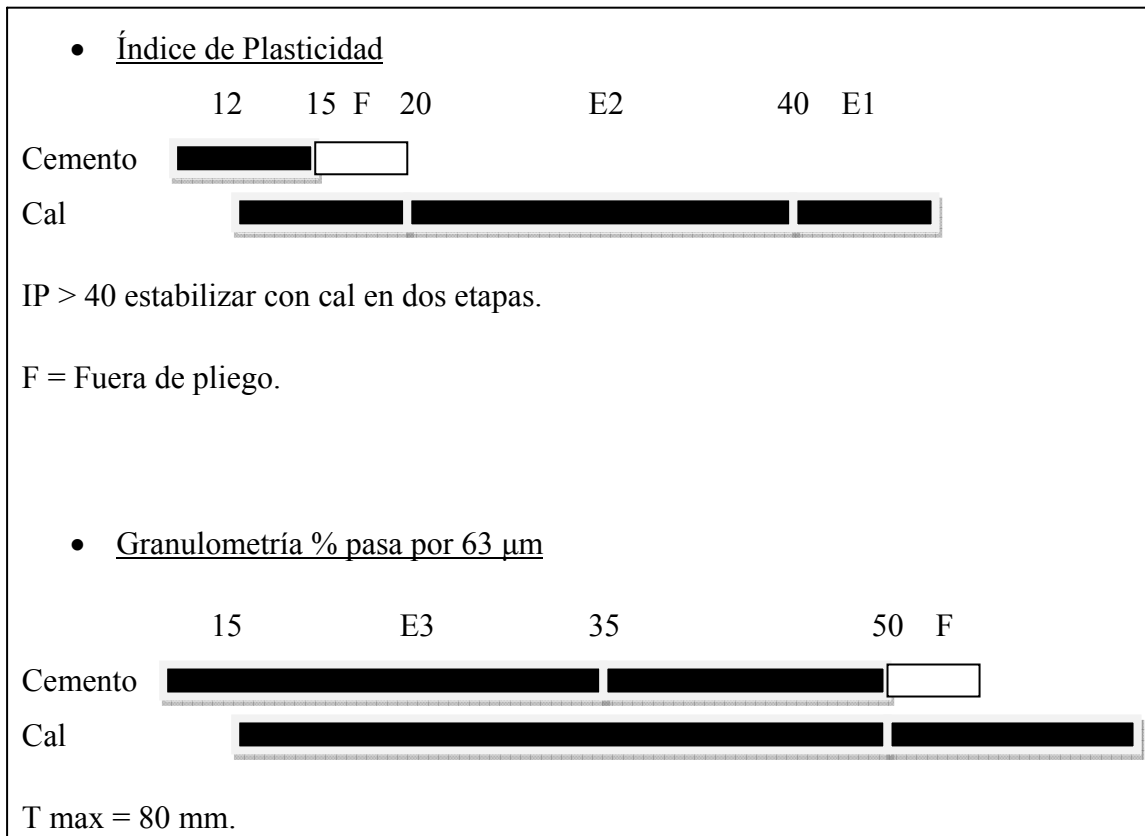
B - Elección y dosificación del conglomerante

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 2.13, se incluye un gráfico orientativo sobre cuando usar cal o cemento, pues aunque esta posibilidad puede quedar determinada en la normativa donde se fijan

unos límites, hay casos de obras en los que, aun habiéndolos rebasado ligeramente, se han obtenido resultados correctos.

Tabla 2.3 - 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 (Fig. 2.14). 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 periodo de maduración, con un 3-4% de cemento se pueden lograr las resistencias especificadas para obtener una explanada de calidad.

C - 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 formula 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.



Figura 2.14 - Riego con agua, de la superficie compactada, paso realizado para el buen curado de la misma.

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.

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 suelo cemento, 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 (contenido de humedad de la mezcla) 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 gr/m² de betún residual (Fig. 2.15). 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 l/m². De acuerdo con los equipos disponibles, algunas de las operaciones anteriores pueden agruparse o realizarse conjuntamente (Fig. 2.16).



Figura 2.15 - Riego con emulsión de la superficie terminada, este paso debe realizarse poco tiempo después de realizar los trabajos de mezclado, refino y compactación.



Figura 2.16 - Terminación de la capa, después de regada con emulsión.

Los equipos usualmente empleados y el objetivo de cada etapa se resumen en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 - Etapas de la estabilización.

ETAPAS	OBJETIVO	EQUIPOS USUALES
Etapas previas a la ejecución		
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).
Etapas durante la ejecución		
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	Conseguir la humedad óptima Proctor (incluyendo la de aportación en el caso de vía húmeda)	- 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 (≥ 97 - 98 % de la máxima Proctor modificado)	- Rodillo liso vibrante + rodillo de neumaticos en ocasiones - Rodillo mixto
7. Riego de curado	Mantener la superficie húmeda	- Cuba de agua con barra

- Con agua (Fig. 2.14) - Con emulsión (Fig. 2.15)	Crear una película impermeable	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

2.2. 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 (Fig. 2.17).



Figura 2.17 - Riego con agua de la capa estabilizada.

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 adicciones (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.

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.

En la Figura 2.18, vemos como se compacta la capa estabilizada, en la Figura 2.19, observamos la terminación del suelo una vez terminados los trabajos de estabilización, de la Figura 2.20.



Figura 2.18 - Trabajos de compactación de la capa estabilizada.



Figura 2.19 - Terminación superficial de la capa estabilizada, antes de emulsión.



Figura 2.20- Trabajos de estabilizado, con maquina Wirtgen (Guía Técnica).

2.3. La técnica de Estabilización de Explanadas.

Se trata brevemente los aspectos esenciales de la técnica como introducción al proyecto. Las actuales necesidades funcionales, económicas y ecológicas en la construcción de infraestructuras determinan un mayor uso de los suelos estabilizados, permiten el aprovechamiento de materiales locales y el ahorro de materiales naturales de calidad, cada vez más escasos, un diseño de firmas económico y duradero, y de una ejecución con elevados rendimientos, menos dependientes de las condiciones del suelo y de la climatología.

Pueden obtenerse así unos cimientos de firme de mayor calidad de soporte, para el tráfico de obra en servicio, insensibles al agua y eventualmente a la helada, por haber sido utilizados desde la Antigüedad y de forma generalizada desde 1950 en todo el mundo, se ha constatado su buen comportamiento a largo plazo.

Se describen los diferentes agentes estabilizadores y sus efectos sobre los suelos, los estudios previos permiten su selección en función del tipo de suelo y de su estado hídrico, así como de su disponibilidad y coste. En función de los objetivos, se diferencia entre suelos mejorados y suelos estabilizados propiamente dichos, y se comentan varios aspectos relativos al proyecto estructuras, ejecución y control de calidad de las capas estabilizadas.

Desde las albores de la historia, el hombre ya utiliza la cal y otros conglomerantes puzolánicos naturales para la estabilización de suelos cohesivos en diferentes obras, primero en China hace unos 5000 años e India, y después durante el Imperio Romano en vías de comunicación y obras hidráulicas. En el siglo XIX se realizan grandes avances en la producción de conglomerantes y aglomerados, y en los procedimientos constructivos, el desarrollo de nuevas redes viarias tanto en USA como en Europa para vehículos, durante los periodos de 1900 – 1930, propicia una serie de existentes, modificados en mayor o menor grado por la adición de alguno de estos productos y la subsiguiente mezcla y compactación (Kraemer et al, 2001).

El desarrollo tecnológico en el que nos encontramos actualmente, tiene sin embargo una decisiva primera fase en el periodo 1930-1950, para ello fueron necesarios muchos estudios de laboratorio para definir unos métodos de ensayo y observar la incidencia de las diferentes variables que intervienen en los resultados. La gran variabilidad de los

suelos naturales constituía un reto adicional. Hubo que construir y seguir el comportamiento de muchos tramos de ensayo, hasta llegar a sistematizar el diseño, definir la ejecución más adecuada con una maquinaria en constante desarrollo y finalmente establecer unas primeras especificaciones técnicas.

Fueron pioneros los Estados Unidos y algunos países Europeos. Las necesidades militares de la 2ª Guerra Mundial, particularmente en la construcción rápida de aeropuertos, propiciaron los avances técnicos y una extensión del uso de los suelos estabilizados en muchos países envueltos en el conflicto.

En los años 50, con la reconstrucción e iniciación de importantes infraestructuras de transporte, se inicia una segunda fase en la que la estabilización de suelos en ya una técnica moderna establecida, conocida y empleada en compendia con el empleo de suelos granulares con pocos finos, de plasticidad reducida, que no requieren ningún agente estabilizador, también se extiende su uso a vías secundarias y de baja intensidad de tráfico.

Desde mediados de los años 70 y hasta la fecha, las circunstancias cambian considerablemente, tanto por la acuciante protección del medio ambiente, como por el encarecimiento de la energía, la agresividad creciente del tráfico pesado y la necesidad de explanadas de mayor capacidad de soporte y de mayor fiabilidad para la construcción. Más adelante se analizan estos factores.

El uso de las estabilizaciones de suelos va generalizándose, con la irrupción de las modernas máquinas estabilizadoras-recicladoras de gran potencia, rendimiento, profundidad de tratamiento y mezcla en una pasada, junto a las nuevas distribuidoras del producto estabilizador y los pesados compactadores por vibración, revolucionan la construcción.

En esta tercera fase es necesario replantearse y poner al día los diseños del cimiento de los firmes por su incidencia en el comportamiento a largo plazo y en los costes globales, los suelos estabilizados ofrecen ya unas posibilidades de ejecución menos dependientes de la climatología, facilitan la puesta en obra de las capas del firme y, en suma, reducen los riesgos que pueden mermar la calidad deseada.

Se examinan ahora varias circunstancias que actualmente determinan un mayor uso de los suelos estabilizados:

1 - La demanda social de un transporte de calidad, requiere una mayor durabilidad de los materiales y estructuras de firme bajo un tráfico pesado, cuyo crecimiento y rehabilitación de las infraestructuras deben reducirse aún más, y en general dedicarse a asegurar la funcionalidad de la infraestructura, es decir, a restaurar las características superficiales, la estabilidad del cimiento debe estar garantizada a largo plazo, al abrigo de incidencias relacionadas con el drenaje, pos compactaciones diferentes, etc. Que una carretera vale lo que su cimiento es un dicho ya aceptado por todos, para ello se precisa una elevada capacidad de soporte insensible a los agentes atmosféricos.

2 - La protección del medio ambiente impone grandes limitaciones a préstamos y vertederos lo que significa un empleo en los rellenos prioritarios de suelos y roscas locales procedentes de los desmontes, buscando un equilibrio del movimiento de tierras. Por otra parte hay una presión creciente para la utilización de subproducto industrial, desechos mineros, suelos contaminados, etc.

3 - Una reducción del espesor total de firme, sin merma de su durabilidad, constituye a un ahorro de áridos de calidad y del ligante necesario.

4 - El coste actual del combustible, se traduce en un encarecimiento del transporte de tierras. En muchos casos, el aprovechamiento de los suelos locales mediante estabilización compensa el coste del producto estabilizador.

5 - La economía de la ejecución requiere unos plazos lo más reducidos posibles, es decir, elevados rendimientos de la maquinaria y del procedimiento constructivo. Las explanadas deben poder abrirse lo antes posible al tráfico de obra, sin erosiones superficiales y manteniendo una buena regularidad y nivelación.

Actualmente se dispone de una amplia gama de productos para la estabilización de suelos:

- Cales aéreas, en forma de cal viva, cal hidratada o lechada de cal. Tanto la cal viva como la cal hidratada son adecuadas para tratar suelos húmedos. La primera es más eficaz, requiere mayores precauciones en el manejo y por su granulometría da menores problemas de polvo con el viento. La cal hidratada por su parte, se dispersa incluso con vientos flojos, en zonas urbanas y aéreas ventosas la lechada de cal evita este problema y permite una distribución más

precisa, su empleo requiere un suelo con una humedad natural inferior a la óptima de compactación y una dosificación no muy elevada.

- Conglomerantes hidráulicos que puede usar se tanto en polvo, como en forma de lechada, se trata fundamentalmente de cementos con adiciones, incluso en porciones importantes, de puzolanas naturales, cenizas volantes y escorias granuladas, estos conglomerantes puzolanicos, que llegan a combinarse a veces en mezclas con poco contenido de clinker, se emplean en algunos países con cementos especiales.
- Ligantes hidrocarbonados en forma de emulsiones bituminosas o espumas de betún, que por su coste son hoy más indicados para reciclados de firmes.
- Algunos productos químicos que son subproductos industriales o están sujetos a patentes.

Estos productos pueden usarse solos, en combinación o en tratamientos sucesivos.

Los cementos, al fraguar e hidratarse los silicatos y aluminados cálcicos anhidros, producen uniones entre las partículas del suelo, disminuyendo su sensibilidad al agua y, en función del contenido de cemento, pueden aumentar considerablemente la resistencia a la deformación del suelo estabilizado y hasta ofrecer una significativa resistencia a la tracción. Son adecuados para tratar tanto los suelos granulares, salvo quizá los suelos muy uniformes, como los suelos de grano fino, salvo que sean muy plásticos y húmedos, en este caso puede ser conveniente un tratamiento previo con cal o su estabilización con cal.

Las cales aéreas producen al mezclarse con un suelo fino arcilloso una reacción rápida de floculación e intercambio iónico, con formación de grumos friables, con una pequeña adición de cal, el aspecto del suelo pasa a ser granular, más homogéneo y fácil de manejar. Las reacciones químicas modifican la plasticidad del suelo, mejoran su compactibilidad y aumentan su capacidad de soporte.

Después se inicia una reacción puzolanica muy lenta, dependiendo de la temperatura, con formación de silicatos y aluminatos cálcicos hidratados, la resistencia mecánica va aumentando con el tiempo y la temperatura, conforme estos compuestos químicos van formando puentes de unión entre las partículas del suelo. Estas reacciones dependen del contenido de puzolanas naturales del suelo.

Con suelos arcillosos de plasticidad elevada, particularmente con humedades naturales superiores a la óptima, lo idóneo es el tratamiento con cal, con cal viva se reduce algo la humedad y aumenta la humedad óptima de compactación, lo que permite su puesta en obra, la resistencia mecánica a largo plazo es función del tipo de suelo y puede ser insuficiente, en este caso una solución es el tratamiento doble, primero con cal y luego con cemento.

Los conglomerantes puzolanicos requieren normalmente la adición de cal, que actúa como catalizador de las reacciones químicas antes mencionadas.

Hay que señalar algunas limitaciones que afectan a la estabilización de los suelos con contenidos elevados de materia orgánica o de ciertas sales, como los asfaltos, en el primer caso puede llegar a detenerse la formación de los compuestos cementales y en el segundo a las conocidas reacciones expansivas de la ettringita, otras sales no dañinas como los carbonatos pueden favorecer a los conglomerantes hidráulicos.

En resumen, el tipo de suelo y su estado hídrico, las condiciones climáticas prevalentes y las prestaciones deseadas son los parámetros principales para seleccionar el agente más apropiado, en los casos dudosos, el estudio de laboratorio marcará las diferencias, la decisión final dependerá evidentemente también de los productos disponibles y de su coste.

El estudio geotécnico de estos suelos (identificación, localización, ubicación) y de los aditivos disponibles, precederá a los estudios de laboratorio, que tienen por objetivo definir el tipo de estabilización, el comportamiento del suelo natural y estabilizado en la compactación, y finalmente para determinar la fórmula de trabajo.

Conviene recordar que estos estudios requieren un cierto plazo para su realización, por lo que es conveniente iniciarlos cuanto antes para una primera orientación sobre los efectos del agente estabilizador sobre los suelos a tratar, y completarlos en su caso cuando sea posible hasta llegar a la dosificación necesaria.

La resistencia a compresión simple a 7 días del suelo tratado y compactado a la densidad mínima a exigir, es frecuente una referencia para el cumplimiento de las especificaciones. Es conveniente determinar también el índice de soporte inmediato y el plazo de manejabilidad, así como evaluar los efectos de las dispersiones del aditivo.

Cuando haya que contar con una congelación del suelo estabilizado en las primeras semanas tras la ejecución, hay que asegurar la estabilidad del material, particularmente se emplea cal.

En obras importantes, cuando se desee comprobar analíticamente la contribución de las capas estabilizadas, será necesario determinar los parámetros mecánicos a diferentes edades pues si no se tendrán que estimar a partir de experiencias similares anteriores.

Estos estudios finalizan inevitablemente con un análisis económico de las posibles soluciones técnicamente aceptables y de la selección de la más idónea.

Según los objetivos de la estabilización de suelos, las especificaciones suelen distinguirse entre diferentes materiales:

1 - Suelos mejorados se refieren generalmente a suelos de grano fino, plásticos y a veces con humedades naturales excesivas, que presentan dificultades de compactación, expansividad, sensibilidad al agua o a la helada, baja capacidad de soporte, etc. El agente estabilizador modifica sus características a corto y largo plazo de forma moderada, pasando a ser suelos utilizados, de baja rigidez. La cantidad necesaria de aditivos es función de la naturaleza y humedad de suelo: muy baja en los casos favorables y media en los más desfavorables, la limitada resistencia mecánica que se consigue condiciona su empleo en explanadas de firmes para tráfico medios o ligeros, o bien bajo una capa de explanada de mayor capacidad de soporte con tráfico pesado. Tienen también aplicaciones en rellenos con suelos cohesivos muy húmedos, que de otro modo no podrían utilizarse, así como en sitios especiales como trasdoses de obras de fabricas y rellenos de zanjas.

2 - Los suelos estabilizados propiamente dichos tienen en cambio una resistencia y rigidez apreciables. Si la fracción granular de los suelos tratados es importante, bastara un porcentaje moderado de aditivo para obtener un material insensible al agua, estable y capaz de resistir a largo plazo las deformaciones producida por el tráfico.

En este caso la contribución estructural de la capa estabilizada como apoyo del firme es notable, y a ello se debe su mayor empleo en explanadas de infraestructuras bajo tráfico pesado y en capas de firme de vías de baja intensidad de tráfico.

Los suelos granulares con finos y plasticidad limitados son excelentes materiales para la ejecución de capas de suelocemento en firmes semirrígidos para tráfico pesado. Esta categoría superior de los suelos estabilizados requieren ya una mayor homogeneidad de la mezcla y una resistencia a la tracción más elevada.

En resumen, la tecnología actual y la experiencia acumulada permiten utilizar, los materiales necesarios en cada caso, siempre que el coste sea competitivo (Kcraemer, 2001).

Cada vez más, el proyecto estructural de los firmes sigue normas, guías o recomendaciones, que parten de unos materiales especificados y caracterizados aproximadamente por sus parámetros elásticos y leyes de fatiga, el cimiento, es decir, la parte superior de los rellenos o los fondos de los desmontes, zonas aún afectadas por las cargas de tráfico, el agua subterránea, o la helada en climas fríos, suele ya tenerse en cuenta junto con las capas del firme en los análisis tenso-deformacionales. De forma práctica, esta con frecuencia definidos, según varias categorías de explanadas.

En este contexto, los suelos estabilizados contribuyen en mayor o menor grado según su tipo a la capacidad de soporte de la infraestructura, definida con frecuencia por un modulo mínimo deformación o compresibilidad obtenido por ensayos de carga con placa, de forma a sustituir generalmente con ventaja a las capas granulares tradicionales, por otra parte los yacimientos de zahorras y arenas naturales van agotándose en muchas áreas, por lo que se aprovechamiento como árido en las capas superiores del firme está justificado.

Hasta los años 90, en que empezó a emplearse con profusión la maquinaria actual, los espesores de las capas estabilizadas eran de solo 15 – 15 cm, en las infraestructuras importantes se parte hoy de 25 cm, llegando en algunos casos a los 50 cm, siempre que se emplee una maquina potente y adecuada que asegure un densidad superficial en el fondo de la capa, con estos espesores puede prescindirse de subbases, y considerar esta capa estabilizada como una de las fundamentales del paquete estructural, con repercusiones positivas en la reducción de los espesores de las bases y de la durabilidad del firme, al constituir una excelente plataforma para el trafico de obra y para la ejecución de las capas superiores, ello incida en el mismo sentido. Por último hay que indicar que la fisuración natural de estas capas no suelo preocupar, ni requerir un

prefisuración, bien porque el espesor de firme es suficiente para impedir la reflexión a la superficie, o en otro caso por su irrelevante.

En esencia, y sin la necesaria preparación del suelo en algunos casos, hay que:

- distribuir el aditivo;
- humectar el suelo en caso necesario;
- mezclar in situ;
- compactar la capa;
- nivelar;
- curar y proteger superficialmente.

Para estas operaciones, la maquinaria tradicional de hace unos 20 años va quedando relegada a obras pequeñas de menor importancia y caminos agrícolas, en las obras actuales, la maquinaria empleada ha aumentado notablemente su rendimiento, capacidad, precisión de trabajo y homogeneidad del producto final, todo ello redundando en costes unitarios más reducidos y en una mayor calidad de la ejecución.

Hay que mencionar que la alcalinidad de cales, cementos y otros productos requieren unas medidas de protección de los operarios en obra, también hay que evitar la emisión en forma de polvo de estos aditivos en el entorno de la obra durante su manejo, estos problemas suelen resolverse hoy satisfactoriamente.

Como en otras unidades de obra, es necesario un control continuo de los materiales y del proceso de ejecución, máximo por tratarse de suelos relativamente variables en porcentajes de finos, plásticos y humedad, así como de dotaciones con frecuencia reducida de aditivos, brevemente los aspectos relevantes suelen ser:

- uniformidad de los suelos, grado de pulverización, tamaño máximo y humedad;
- dotación y distribución del agente estabilizador;
- uniformidad de la mezcla;
- grado de compactación, con atención al fondo de la capa estabilizada y a la superficie;
- nivelación de la capa y regularidad superficial;
- curado, acabado y protección superficial;
- espesor de la capa estabilizada.

A los que hay que añadir los factores que afecten al proceso, como temperaturas, precipitaciones y vientos durante la puesta en obra. Por otra parte han de estimarse las resistencias mecánicas mediante probetas para confirmar que se cumplen las especificaciones y la capacidad de soporte obtenida mediante ensayos con placa o medidas de la deflexión.

Siempre que sea posible, la construcción de tramos de prueba permitirá un control de procedimiento, reducido sin merma de calidad el control del producto terminado.

Este rápido repaso del estado actual de la técnica de estabilización de suelos permite vislumbrar las ventajas que puede aportar a la construcción de explanadas de infraestructuras. Se dispone hoy de mejores agentes estabilizadores, métodos de estudio en el laboratorio de los suelos tratados, maquinaria, métodos de ejecución y procedimientos de evaluación de la capa terminada, tras muchos años, el buen comportamiento de tantas obras en todo el mundo, realizadas en las condiciones de la época, hace esperar que las obras actuales y futuras tengan aun una mayor calidad a un coste competitivo (Kcraemer et al, 2001).

2.4.- Análisis comparativo de la aplicación de diversas técnicas y conglomerantes

En varias obras españolas de autovías ejecutadas recientemente, como han sido los tramos de autovía Benavente-Camarzana, La Bañerza-Astorga, Almendralejo-Zafra y sector N-V a N-VI de la M-45, se ha procedido a la estabilización de los suelos que conforman la explanada. En ellas se han ido aplicando diversas técnicas de estabilización, con variaciones en el procedimiento de una obra a otra, lo que ha permitido reunir una interesante experiencia sobre la aplicación. Así, por ejemplo:

- se han utilizado tanto estabilizaciones por vías seca como por vía húmeda;
- se registra una variedad en la problemática que ha llevado a la elección de la técnica de estabilización, desde correcciones de problemas de plasticidad hasta mejora de la capacidad de soporte;
- se ha aplicado en alguna obra la cal como conglomerante en vez del cemento.

En la comunicación se resumen las diversas técnicas aplicadas y se realiza un análisis comparativo de rendimientos, resultados obtenidos con cada una y campo de aplicación más adecuado.

En varias obras de construcción de autovías ejecutadas recientemente, para conformar la explanada del firme se ha adoptado la solución de estabilizar los suelos de la misma con cal o cemento.

Los suelos disponibles para la explanada han presentado una problemática a resolver distintas en cada caso, por lo que, consecuentemente, de una obra a otra han variado los equipos, procedimientos e incluso el ligante utilizado, con el objetivo de optimizar la solución a adoptar en las distintas obras.

Las actuaciones analizadas en el ámbito del trabajo se corresponden con las obras siguientes ordenadas cronológicamente:

- Autovía del Noreste;
- Autovía de las Rías Bajas;
- Autovía de la Plata;
- Autovía M-45.

En el texto siguiente se analizan los aspectos siguientes:

- problemática previa a resolver y soluciones adoptadas;
- equipos utilizados y rendimiento;
- procedimientos utilizados y aspectos diferentes de los mismos.

Autovía del Noreste

La explanada prevista en el proyecto, tipo E3, estaba formada por 50 cm de suelos seleccionados no plásticos, con CBR mayor de 20.

No obstante, en las inmediaciones de la obra se contó la inexistencia de volúmenes suficientes de suelo seleccionado con CBR > 20 para la ejecución de una explanada E3.

Los suelos disponibles, de préstamos, eran o bien suelos seleccionados cuyos valores CBR no llegaba a 20 o bien presentaban una cierta plasticidad, siendo suelos adecuados cuyos índices de plasticidad se situaban entre 10 y 15, sus CBR en 9 -13.

En vista de lo cual se decide por ello conformar la explanada E3 mediante la ejecución de una capa de 50 cm de suelo adecuado, de los cuales se estabilizan 18 cm superiores, la estabilización a realizar sería tipo S-EST 3, es decir, suelo adecuado estabilizado con

cemento, con más de 1.5 MPa a los 7 días. La dosificación establecida fue del 3% de cemento tipo II 35.

Se comenzó utilizando un equipo CATERPILLAR SM 250, distribuyendo el cemento por vías seca: el equipo adicionaba el agua añadida en el mezclador pero no se mostró muy eficiente el sistema de control del agua añadida, por lo que, unido ello a la necesidad de más rendimiento se cambió el equipo, incorporando una estabilizadora WIRTGEN modelo 2500WR. El procedimiento adoptado fue el de incorporar el cemento por vía húmeda fabricando la lechada en un mezclador WM400.

El equipo dispone además de dos rodillos neumáticos y una motoniveladora, los rendimientos obtenidos estaban en torno a los 9000 m²/día.

Autovía de las Rías Bajas

En este caso la problemática y solución adoptada ha sido similar a la anterior, sin embargo, en este caso el volumen disponible de préstamos de suelo seleccionado es menor que en la anterior, habiendo más abundancia de préstamos de suelo adecuado, los suelos adecuados a estabilizar tenían unos valores de CBR entre 7 y 15, con un índice de plasticidad generalmente superior a 10.

La dosificación establecida en este caso fue de 4.5 % de cemento tipo CEM II / B-M 32.5, en esta autovía también se detecta que varios fondos de desmonte están constituidos por suelos inadecuados en base a criterios de plasticidad por lo que, previamente a la extensión de la capa de explanada, se estabilizan dichos fondos con cemento, en un espesor de 15 cm, siendo una estabilización S-EST 1 buscando un CBR a los 7 días o superior.

A la vista de la experiencia anterior y como aparece la problemática de la estabilización de fondos de desmontes, se actúa con dos equipos, trabajando ambos por vía seca, una CATERPILLAR SM 250 en fondos de desmontes y para las explanadas una WIRTGEN-WR 2500. La distribución del cemento se hace con una dosificadora PANIEN, para la compactación cuenta con dos rodillos metálicos para los fondos de desmontes, mientras que en explanadas se actúa con un compactador de rodillos metálicos y un compactador de neumáticos. El equipo de explanadas tiene también una motoniveladora CATERPILLAR 16G, los rendimientos medios fueron de unos 12000 m²/días el equipo en explanadas, con puntas de 15000 m². En la estabilización de

fondos de desmonte se alcanzaron rendimientos de unos 15000, no se han computado en estos los rendimientos las paralizaciones por problemas climatológicos o de averías.

Autovía de la Plata

En el caso de la Autovía de la Plata se presenta el problema de inexistencia en la zona de suelos seleccionados, no plásticos, con CBR superiores a 20, necesarios para conformar la explanada E3 prevista.

Existen suelos adecuados con índices CBR muy superiores a 20, generalmente entre 35 y 50, pero cuya plasticidad no permite clasificarlos como suelos seleccionados. Se pensó entonces, ya que su capacidad portante inicial ya superaba la exigida para una explanada E3, en estabilizarlos con cal, puesto que el efecto perseguido era únicamente la reducción de la plasticidad en la fracción fina de esos suelos, para lo cual es más efectiva la cal que el cemento. No obstante, la aportación de cal a estos suelos también consigue un incremento de su capacidad portante.

La dosificación establecida fue del 3 % de cal clase II.

También en esta obra aparecen una serie de fondos de desmonte cuyos suelos se clasifican como marginales, debido a su plasticidad, aunque, en algún caso, los índices CBR son inferiores a 3. Se estabilizan los mismos con cal, con el objetivo de reducir los índices de plasticidad a valores por debajo de 10 y aumentar los índices CBR por encima de 5.

Las secciones adoptadas son las siguientes:

- Terraplenes y desmontes cuyos suelos son tolerables: la explanada consta de 50 cm de suelos adecuados de los cuales se estabilizan con cal los 20 cm superiores.
- Desmontes cuyos suelos son marginales: se estabiliza con cal un espesor de 20 cm del fondo de desmonte y sobre esta estabilización se extienden 20 cm de suelo adecuado que se estabilizan con cal en todo su espesor.
- Desmontes excavados en roca: se regulariza la base de apoyo con suelo adecuado sobre el que se extiende 20 cm de suelo adecuado, estabilizado con cal en todo su espesor.

Debido también a la inexistencia citada de suelos seleccionados no plásticos para los rellenos localizados de trasdós de las estructuras de tronco y enlace, se realiza la

estabilización con cal del tercio superior de los terraplenes de dichos trasdoses de estructuras. Se pretende conseguir una cuña de transición entre el terraplén y la estructura y una reducción de asientos en los trasdoses, problema bastante común, por otra parte.

Para la estabilización del tronco de la autovía se contó con una WIRTGEN WR 2500 que actúa por vía húmeda con el mezclador de lechada agua cal WM 400; en los ramales de enlace se estabiliza por vía seca con un equipo igual al anterior, aunque sin tándem mezclador; en ambos casos se dispone de dos rodillos metálicos y una motoniveladora, en cuanto a rendimientos se han obtenido 8000 m²/día con puntas de unos 12.000 cuando se trata de vía húmeda. En las estabilizaciones por vía seca se han obtenido rendimientos menores, pues se trabaja en ramales y hay más traslados de maquinaria, unos 6500, con puntas de 12000, en ramales principales, de hasta unos 2500 metros de longitud.

Autovía M-45

Dada su ubicación en un entorno semiurbano, el problema de la indisponibilidad de préstamos de suelos seleccionados en la cantidad necesaria para los 50 cm de espesor requeridos para la formación de la explanada prevista en el proyecto ha resultado determinante para buscar una solución alternativa que aprovechara los préstamos disponibles de arenas de miga ligeramente plásticas, clasificadas como suelos adecuados.

Estos suelos de estos préstamos se caracterizan por unos valores de CBR en un rango entre 20 y 40, mientras que, en general, presentan cierta plasticidad, con valores de índice de plasticidad que oscila entre 7 y 14.

La solución adoptada para la explanada consistió en colocar 50 cm de estos suelos adecuados, estabilizado los 35 cm superiores mediante adición de cemento para lograr un SET-3 con una resistencia a compresión a los 7 días superior a 1.5 MPa.

La dosificación establecida fue del 4.5 % de cemento tipo IV/B 32.5, obteniéndose unas resistencias medias de 2.1 MPa a 7 días.

Por otra parte, para poder conseguir con ciertos trabajos en época lluviosa, dada el excesivo contenido de humedad de esta arenas, se procedió a una estabilización con cal

viva por vía seca de todo el espesor de la explanada de una variante, que por un lado permitió rebajar el contenido de humedad de unos 15 % a los valores en torno al 10 % que permitía compactar adecuadamente la misma, a la vez que se introducía una mejora reduciendo su plasticidad.

En la estabilización de explanada con cemento se optó por la estabilización por vía húmeda para eliminar posibles incidencias de contaminación del entorno con el método de vía seca y por la mayor garantía de homogeneidad en la distribución del ligante en la mezcla, el equipo utilizado fue la estabilizadora WIRTGEN WR 2500 con un mezclador de lechada agua cal WM 400, los rendimientos descontando incidencias has estado en el entorno de los 8000 m²/día en la estabilización de explanada.

La estabilización por vía seca tiene unas claras limitaciones de afección medioambiental al entrono los días de fuerte viento, pues el cemento o cal se lo lleva el aire, en especial durante la operación de extendido del conglomerante, tampoco se puede ejecutar con lluvia intensa. La estabilización por vía húmeda no se ve afectada por los días o zonas con viento y, únicamente, hay que prestar atención a las operaciones de llenado de conglomerante para fabricar la lechada desde la cisterna nodriza ya que, si los filtros no están bien o no son operativos, el aire expulsa del tanque durante el llenado genera una cisterna contaminación por cemento o cal en el área de repostaje, que se amplifica y extiende en caso de viento, sin embargo, después de haber llovido, en función del contenido de humedad del suelo, puede no ser viable durante un cierto tiempo la estabilización con lechada si los valores de humedad total están por encima de la humedad optima, siendo necesario esperar un tiempo a que la humedad del material quedarse sensiblemente por debajo de la óptima.

El rendimiento es sensiblemente menor con la vía húmeda que con la vía seca. En primer lugar, con la vía húmeda la velocidad de avance del equipo es menor y en segundo lugar, en general, al terminar calle, no son posibles los giros, para dar media vuelta, del tren compuesto por estabilizadora y mezclador que debe regresar en vacío al punto de inicio de la calle adyacente. Al contrario, con vía seca, cuando la estabilizadora acaba una calle, empieza la adyacente en el perfil donde acabo la anterior, evitando esos recorridos en vacío, estableciendo condiciones homogéneas podríamos establecer que el rendimiento obtenido por vía húmeda está en un entorno del 60% del obtenido por vía seca. Con vía seca, en condiciones climatológicas favorables, la cuba

de cemento o cal descargan en el dosificador que distribuye el conglomerante y, teóricamente, no haría falta almacenar nada, no obstante, conviene tener un depósito o cisterna nodriza tanto por si las condiciones de trabajo no permiten la descarga directa en los repartidores cuando lleguen las cisternas a obra o hay averías en el equipo de estabilización. A su vez permiten absorber algunos retrasos en el suministro sin tener que parar. Sin embargo, la estabilización por vía húmeda necesita, imprescindiblemente, disponer de almacenamiento en obra de cal o cemento para abastecer al equipo y de mayor capacidad que por vía seca, otro factor a considerar es que, con la estabilización con cal, hay que tener más capacidad volumétrica de almacenamiento al ser su densidad muy inferior a la del cemento, también por la misma razón, hay más paradas a repostar conglomerante por parte del tandem o del dosificador cuando se estabiliza con cal que con cemento, para dosificación en peso semejantes. Con equipos estabilizadores antes citados, se consigue un mezclado muy homogéneo y una buena precisión en la dotación del agua añadida. Los equipos utilizados en vía húmeda mejoran la precisión en la dosificación del conglomerante respecto a la vía seca y resulta comparable a la de una dosificación en central si hay homogeneidad o un control fiable del dato de humedad y densidad del material, las variaciones en la humedad final dependerán en exclusiva de las variaciones en la humedad previa de la capa a estabilizar y el grado de control y conocimiento que tengamos de ellas.

Los equipos estabilizadores utilizados no poseen ningún sistema práctico de nivelación y terminación de la capa lo que obliga a unas labores previas y otras posteriores de nivelación de capa, lo que de alguna forma desluce el proceso, puesto que hay que duplicar el rasante de capa y hay que hacerlo teniendo detrás una limitación de tiempo para terminarlo, ya que se debe terminar la compactación, que va después, dentro del tiempo límite establecido desde el mezclado. Por una parte, antes de comenzar la estabilización, hay que tener la explanada terminada, con geometría requerida y con un muy ligero excedente de material, es decir con una cota ligeramente superior de 1 o 2 cm, para que la motoniveladora trabaje cortando y retirando una pequeña capa de material estabilizado, en las operaciones posteriores, también debe tener una compactación próxima a la final, ello es así ya que el proceso de escarificado y mezclado en principio no desplaza el material, por lo que la cantidad precisa de suelo que necesitamos para la explanada debe estar allí desde el principio. Si hay déficit no tendremos material estabilizado para aportar y si el excedente es elevado, además de

tener que tirar material al que hemos ya añadido conglomerante, introducimos un factor de demora en las operaciones de nivelación, con lo que reducimos el tiempo disponible para la compactación. Tras las obras anteriores, el procedimiento que ha dado mejores resultados y que resulta más práctico es el siguiente:

- El primer lugar, antes de iniciar la estabilización, debe haberse terminado totalmente la explanada, con la geometría final y con sus tolerancias, aunque con ligero exceso en cota.
- La estabilización se va haciendo por franjas longitudinales adyacentes desde un borde de calzada hacia otro.
- El rodillo inicia una primera pasada doble en la calle estabilizada para fijar el material esponjando y facilitando el trabajo de la motoniveladora.
- La motoniveladora inicia su trabajo en la primera calle compactada por el rodillo solapando la cuchilla unos 30 cm fuera de la calle, sobre la franja de borde de explanada que permanece intacta con la nivelación original y que actúa de referencia de nivelación longitudinal y de peralte, salvo que usen motoniveladoras con sistemas de nivelación basados en un cable de referencia, en cuyo caso, esta primera calle se nivelaría con referencia a ese cable.

Se repite el proceso, si se ejecuta adecuadamente da unos resultados satisfactorios, pudiendo evitarse la tendencia a generar un perfil transversal en dientes de sierra con un control adecuado de los peraltes y pendientes relativas entre las calles durante la ejecución, a su vez permite una razonable rapidez.

2.5. Factores que determinan el rendimiento de la estabilización con cemento por vía húmeda

El objetivo principal de este punto es aclarar los conceptos que definen el rendimiento de la operación de estabilizado con cemento por vía húmeda pues, en los contactos mantenidos con los proveedores y a la vez con los clientes, se tuvo la experiencia de tener dificultades para transmitir la importancia que tienen una serie de parámetros para evaluar el coste de ejecución y las consecuencias que sobre dicho coste origina la modificación en obra de estos parámetros. Los parámetros son: densidad, agua a añadir, contenido de cemento y espesores.

Se hace también una breve descripción de la maquinaria, se analiza el procedimiento de ejecución desde el punto de vista de los factores que afectan al rendimiento y, por último, se hace una breve reseña de las obras de reciclado y estabilización con cemento.

Recicladora – Estabilizadora Wirtgen WR-2500, máquina para técnicas combinadas de estabilización y reciclado en frío, con un rotor accionado por un sistema mecánico especialmente diseñado para trabajos efectivos en ambos sentidos de avance de la máquina, en el que se insertan picas y portapicas de widia de fácil sustitución. Al mismo tiempo que el rotor procesa el material en la cámara de mezcla, una barra difusa compuesta por 16 difusores añade la lechada o la emulsión en las cantidades requeridas, operación que es controlada por ordenador, además los difusores pueden cerrarse a voluntad para evitar la sobrealimentación en las zonas de solape, las ruedas disponen de columnas de apoyo independientes con cilindros hidráulicos incorporados para regular la altura y controlar la posición de trabajo o transporte de la maquinaria, su potencia es de 610 CV, la altura de trabajo es de 2,438 mm y el rango de profundidades es de 0 – 500mm. Puede superar pendientes de hasta un 57 %, siendo la velocidad máxima de trabajo de 15 m/min y la de desplazamiento de 200 m/min.

Dosificador de lechada wirtgen WM-1000, Mezclador – dosificador de lechada para la aportación de cemento sin emisiones de polvo durante los trabajos de reciclado en frío y estabilización de suelos, dispone de un depósito de agua de 11000 l., de un silo para cemento de 25 m³ y de los elementos mecánicos e hidráulicos necesarios para la incorporación de peso de cemento requerido y del volumen de agua preciso al mezclador donde se elabora la lechada, tanto el proceso de dosificación de los materiales para la fabricación de la lechada como la adición de la misma al material a estabilizar se controla por ordenador.

Los factores fundamentales que determinan el rendimiento de la operación son:

- la capacidad de dosificación de lechada del WM-1000 que como máximo es de 1000 l/min;
- la velocidad máxima de desplazamiento del equipo que es de 15 m/min.

Por ello, conocidos la cantidad de Kg de lechada que debemos añadir por m^2 (función de la densidad del material, de la diferencia entre la humedad natural y la humedad óptima, del % de cemento y del espesor), la cuestión es desplazarnos a la velocidad necesaria para que aportando 1000 l/min de lechada se añadan los kg/m^2 requeridos, estando limitada la velocidad de traslación del equipo a 15 m/min. El WM-1000 ajusta automáticamente el caudal de lechada a la velocidad de desplazamiento instantánea del equipo.

En resumen, supuesto el fijo, porcentaje de agua a añadir y la densidad, para un mismo porcentaje de ligante, a mayor espesor menor rendimiento por m^2 , y para un mismo espesor, a mayor contenido de ligantes será menor rendimiento por m^2 . Para analizar la incidencia de la densidad en el rendimiento se han elaborado unos cuadros con incremento de densidad de 100 Kg/m^3 , en dichos cuadros, para simplificar, no se ha tenido en cuenta que en realidad no es posible el suministro de cubas incompletas y que lo que se pretende es reflejar la variación del rendimiento con los diferentes factores.

Previamente a la ejecución de la estabilización se realizara una fórmula de trabajo mediante las cual se establecerá el contenido de ligante necesario para obtener las características deseadas del producto final. Es importante insistir en que habrá que hacer tantas fórmulas de trabajo como materiales distintos se vayan a emplear. Es conveniente realizar la toma de muestras con una maquina similar a la que se vaya a utilizar en la estabilización, un factor determinante para que las condiciones de trabajo permitan obtener el rendimiento óptimo y para que la calidad del producto final se ajuste a las especificaciones es que el material a estabilizar este extendido y compactado, es necesario para optimizar el rendimiento, ya que el chasis del WM-1000 está preparado para su transporte por carretera enganchado a una cabeza tractora y una plataforma irregular y con blandones dificulta su avance y afecta a la velocidad de trabajo del equipo, sobre todo cuando el WM-1000 está cargando con 25 toneladas de cemento y 11000 litros de agua, en cuanto al grado de compactación debe ser el 100 % cemento, porcentaje de la densidad exigida al material estabilizado. Con el material a cota y compactado, entra el WM-1000 empujado por la recicladora - estabilizadora en cuya cámara se realiza la adición de la lechada de cemento y el mezclado con el material a estabilizar. El suministro de agua se realiza mediante cubas de 10 -12 m^3 , su número será función del porcentaje de agua a

añadir y de la situación de los puntos de toma respecto al tajo en ejecución. El depósito de 11000 litros de WM-1000 servirá como elemento de regulación del suministro de agua, para obtener el máximo rendimiento, las cubas deben realizar su descarga en marcha y por tanto deben ajustar su velocidad de desplazamiento a la del equipo, por ello es conveniente que sean remolcadas por tractores agrícolas que disponen de machas cortas, pues un camión podría quemar el embrague. Por detrás del equipo de refinado y compactación compuesto habitualmente por una motoniveladora y rodillo HAMM 2620 ira terminando la capa, es muy importante que el rodillo vaya pegado a la recicladora para aprovechar que el contenido de humedad es el óptimo y lograr la compactación de la capa con el mínimo número de pasadas. Posteriormente la motoniveladora realizara el refinado final y el rodillo dará una última pasada para sellar la capa, otro factor importante en la organización del tajo es la topografía de comprobación que debe dimensionarse en función de los elevados rendimientos obtenidos, para dejar el material a consta antes de que finalice el proceso de fraguado. Al final de la jornada debe proceder a la protección de la capa mediante un riego con emulsión.

2.6. Auscultación de suelos estabilizados *in situ*

Se exponen cuáles han sido los métodos de control que se han utilizado y los valores a nivel global que se han obtenido, además de los métodos de control usuales en obra se desarrolla la auscultación a gran rendimiento ejecutada, utilizando equipos como el Curvímetro MT-15 y la Placa de Carga Dinámica que aportan una información rápida sobre la capacidad de soporte, la auscultación sin un alto sobre coste y permite conocer la homogeneidad o no de la estabilización realizada. La homogeneidad de las explanadas estabilizadas se muestra como un factor fundamental en el mantenimiento de las prestaciones del firme a lo largo de tiempo, para conseguir indicadores del servicio al usuario, como el IRI (parámetro que determina la regularidad y comodidad de conducción de un trazado), realmente buenos.

El presente trabajo tiene por objeto pasar revista a los equipos que emplean las empresas EUROCONSULT en la recepción de explanadas, tanto las constituidas por materiales naturales como aquellas en las que se requiere la estabilización con cal y con cemento. Los condicionantes ambientales asociados a las obras, unidos a los elevados costes de extracción y tratamiento de los materiales susceptibles de ser

utilizados para la formación de zahorras están siendo el origen del empleo de capas estabilizadas para la formación de explanadas, además la utilización de estas capas estabilizadas, tanto en las explanadas como en las capas de base de firme, genera un aumento del tráfico que soporta la sección de firme antes de su agotamiento. En comparación con las secciones tradicionales que utilizan capas granulares, los equipos que analizaremos son equipos de alto rendimiento, basados en la toma de datos *in situ*, no sustituyen en ningún caso al control de calidad necesario en la fase de ejecución, sino que lo complementan desde el punto de vista de la recepción de las explanadas, además, ambos equipos miden realmente el comportamiento de la explanada bajo las cargas reales del tráfico, con lo cual se obtienen datos fiables de sus parámetros de deformabilidad para ser utilizados en modelos analíticos de cálculo de los firmes.

Los dos equipos que se contemplan son equipos autónomos que cuentan con el apoyo de GPS instalado en los vehículos, estos es, no necesitan del apoyo de otros medios para la realización de los trabajos (en el caso de la placa de carga se elimina el condicionante del camión cargado necesario como reacción en el caso de la placa estática). Para su acceso a la zona a auscultar no son necesarios condiciones especiales, pudiendo acceder ambos equipos por los mismos caminos utilizados por los equipos de transporte y compactación, en estos equipos, la interpretación de los resultados obtenidos pueden hacerse prácticamente al instante, de modo que se consigue la respuesta de las necesidades de actuación con carácter simultáneo a la toma de datos. Además, el volumen de datos que pueden ser obtenidos en una jornada, y por lo tanto, la superficie de explanada que puede ser auscultada, es muy elevado, y por ello se están convirtiendo en elementos fundamentales para la toma de decisiones, tanto por parte de los contratistas de las obras, como los Promotores, ya sean grupos privados o Administraciones Públicas.

El Curvímetro MT-15

Se trata de un equipo montado sobre un camión lastrado con 13 toneladas, diseñado para la determinación de las deflexiones de firmes y los radios de curvatura del cuenco de deflexión. La toma de datos se realiza mediante tres geófonos instalados sobre una cadena de 15 m de longitud, que registran los desplazamientos verticales de la capa auscultada, de este modo se registra un dato cada 5 m, a partir de 100 puntos de medida obtenidos en 4 m que definen el cuenco de deflexión. La toma de

datos se realiza a una velocidad de 18 Km/h, con lo cual las afecciones a las obras en fase de ejecución son mínimas, la deformación vertical del firme es originada por la carga de 13 toneladas situada en el eje trasero, dicha carga puede ser modificada en el caso de que se deseara conocer el comportamiento de la capa bajo la acción de otra carga. La actuación del equipo se inicia registrado de manera continua los datos de deflexiones de las explanadas. La auscultación se realiza de manera similar a como se efectúa la medida en los firmes, en el caso de explanadas estabilizadas, se debe obtener un registro por cada calle de trabajo, las referencias que se utilizan para la toma de datos son los propios PPKK de la obra, con lo que se facilita la localización de las zonas presumiblemente problemáticas y adopción de medidas correctoras posteriores. Para el análisis de los datos, se cuenta con un programa informático que permite la visualización de las medidas registradas, realizar las correcciones necesarias, normalizar a viga Benkelman, aplicar los coeficientes necesarios y realizar la división del tramo en zonas estadísticamente homogéneas, en las que se detecta un comportamiento similar. Esta división en zonas homogéneas según los criterios estadísticos fijados para la auscultación de firme en la Norma 6.3. IC y la OC 323/97, el hecho de contar con datos cada 5 m y con zonas de comportamiento homogéneo, permite un análisis de la auscultación desde una doble óptica:

- Evaluación de los datos puntuales que permiten detectar defectos localizados, para realizar reparaciones en la fase de construcción, más sencillas y económicas que si hubieran de ser ejecutadas con posterioridad.
- Tratamiento de las zonas homogéneas con objeto de tener una evolución del conjunto de la actuación.

Todos estos datos, por su inmediatez en el análisis, pueden ser incorporados al proceso de construcción como una fuente de retroalimentación del mismo, aconsejando la modificación de las fórmulas de trabajo, cambios en el procedimiento de ejecución o actuación sobre las capas superiores del firme, en caso de ser necesario.

Los datos y resultados obtenidos en obra se complementan con los deducidos de modelos teóricos multicapa o de elementos finitos. Asimismo, se contrastan como los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

De los datos registrados durante la auscultación con el Curvímetro MT-15 se puede obtener datos reales del comportamiento del material puesto en obra, y de ese modo

ir calibrando el modelo teórico de cálculo utilizado para aproximar todo lo posible a la realidad. A partir de los datos de deflexión es posible obtener el módulo de elasticidad de la explanada y su Índice CBR.

La Placa de Carga Dinámica

El equipo de Placa de Carga Dinámica de marca Dynaplaque 2, desarrollado por LRPC, está compuesto de cuatro elementos principales:

- generador de impactos;
- conjunto de medida de placa y cadena electrónica asociada;
- sistema electrónico de toma de datos y tratamiento informático;
- equipo de control y central hidráulica instalados en el vehículo de transporte.

El generador de impactos consiste en una masa cilíndrica de 125 Kg que se desliza a lo largo de un pilar guía, al final de cuyo recorrido se ha dispuesto un resorte amortiguador de un elastómero poliuretano que amortigua rápidamente los rebotes sucesivos.

El gato hidráulico constituye también el pilar guía, está equipado con enganches e anclaje, tirantes, cono de disparo regulable en altura y los detectores de posición necesarios para un funcionamiento automático.

La rapidez equivalente del resorte amortiguador es del orden de 3000000 N/m, y la altura de caída usada generalmente es de 0.5 m, lo que permiten generar un impulso de fuerza comparable en amplitud y duración a la sollicitación provocada por el paso de un eje pesado, es decir, 65 a 75 KN en 15 a 20 ms.

El sistema electrónico de toma de datos y tratamiento se localiza en la cabina de vehículo, junto con los circuitos de acondicionamiento de los sensores de fuerza y desplazamiento de la placa de medida y el control de potencia para la generación de impactos.

El equipo dispone de una medida precisa de distancia en obra que envía un impulso cada centímetro y que se instala en una de las ruedas del vehículo.

Un software específico asegura el encadenamiento automático de los impactos así como la toma de datos sincronizada de las medidas, el software genera la curva continua esfuerzo-deformación y realiza el cálculo de modulo dinámico. El operador dispone de un teclado para introducir los datos de los parámetros que identifican la obra y para controlar el registro del generador de impactos y el inicio del ciclo de ensayos, las medidas y los cálculos se visualizan en la pantalla, se almacenan en

memoria y se editan en una impresora que permiten disponer al final de los ensayos en obra de los resultados obtenidos.

El sistema generador de impulsos y medidas está sujeto sobre el chasis del vehículo de transporte, en la parte trasera de la cabina, un gato hidráulico acciona el eje para permitir colocar el generador de impulsos sobre el lado izquierdo, al lado del operador, la energía hidráulica la proporciona una central constituida por una bomba doble, alimentada por la toma de fuerza de la caja de velocidad, un depósito de aceite y dos electro distribuidores para el control de movimiento.

El modelo de Placa de Carga Dynaplaque 2 presenta con respecto a las de las primeras generaciones las siguientes ventajas:

- la medida directa del módulo dinámico se realiza a partir de los registros en función del tiempo de la fuerza aplicada y de la deflexión correspondiente;
- el rango de medida se ha aumentado hacia el dominio de los rigideces más elevadas: el límite superior sube de 80 MPa en las antiguas hasta 250 MPa
- aumento de la sensibilidad, ya que las medidas directas son independientes de las fluctuaciones de parámetros mecánicos o del entorno;
- mayor de la fiabilidad mecánica por simplificación del generador de impactos.

Las principales ventajas de funcionamiento que presentan el equipo son:

- puesta en obra simple y rápida por una sola persona;
- velocidad de toma de datos: veinte o treinta ensayos hora;
- movilidad en obra y en carretera;
- rapidez alta de intervención;
- resultados explotados *in situ* gracias a la toma de datos y al tratamiento informático.

2.7. Equipos para la ejecución de Obras de Estabilización y de Reciclado

Una de las razones que más ha favorecido el empleo creciente de las técnicas de estabilización de explanadas y de reciclados *in situ* de firmes existentes ha sido el espectacular avance experimentado por los equipos específicos para este tipo de obras: los distribuidores de conglomerante, las estabilizadoras y las recicladoras.

En lo que se refiere a los equipos distribuidores de conglomerante, junto a los más tradicionales de dosificación en polvo, hay que señalar la aparición de equipos que mezclan el cemento y el agua, creando una lechada que se incorpora directamente al interior de la estabilizadora o recicladora. En cuanto a las estabilizadoras y

recicladoras, los equipos más usuales son los que pueden utilizarse para ambos tipos de obras, estabilizaciones y recicladoras, sin más que cambiarles el rotor en el que van alojados los elementos de disgregación (picas o paletas) o bien, en algunos casos, empleando un único rotor, para los reciclados existen también otras posibilidades, como son los equipos que pueden ser empleados igualmente para el fresado de firmes existentes, finalmente se describen algunos equipos para formación de juntas en fresco a distancias cortas, medida muy recomendable en firmes de reciclados, en especial si están sometidos a tráficos importantes.

Tanto en las obras de estabilización *in situ* con cemento de una explanada como en las de reciclado *in situ* con cemento de un firme existente hay que distinguir dos etapas:

- Una primera, que comprende el conjunto de operaciones hasta lograr la disgregación de la explanada o del firme en la profundidad requerida y la mezcla del material resultante con el cemento, el agua y, en caso necesario, con los áridos de aportación.
- Una segunda, en la que se realiza la nivelación y compactación de la mezcla así obtenida, y la protección final de las misma mediante un riego de carado, en los firmes reciclados, la ejecución de juntas en fresco antes de iniciar la compactación es una operación necesaria en el caso de tráficos medios-altos, y muy recomendable para todo tipo de tráficos.

Es en la primera etapa donde se utilizan equipos específicos para las técnicas de estabilización o de reciclados *in situ*, en los últimos años se han producido avances espectaculares en los mismos. Tanto en los equipos de distribución del cemento como en la maquinaria para la disgregación de explanadas o firmes, puede afirmarse que hoy en día los límites de los espesores a tratar vienen más bien marcados por los equipos de compactación. En la segunda etapa, es decir, una vez efectuada la mezcla de los materiales, las operaciones a realizar son las mismas que en el caso de una gravacemento o suelocemento.

Para ejecución de las etapas mencionadas anteriormente se utilizan distintos equipos, de los que pueden considerarse como específicos de las obras de estabilización o reciclados los siguientes:

- distribuidores de conglomerante;
- estabilizadoras o recicladoras.

En los apartados que siguen se van a hacer una breve descripción de los mismos, se incluyen igualmente algunas informaciones sobre equipos para la ejecución de juntas en fresco.

Distribuidores de conglomerante

La distribución manual del conglomerante, formando previamente una cuadrícula de sacos a la distancia requerida, solamente es admisible en obras de muy poca importancia, en los restantes casos debe procederse a una extensión mecanizada del mismo, para lo cual existen dos tipos diferentes de equipos:

- Los que distribuyen el conglomerante en forma pulverulenta;
- Los que lo hacen en forma de lechada.

Los equipos que efectúan la dosificación en polvo suelen consistir en camiones-silos o tanques remolcados con tolvas acopladas en la parte posterior con compuerta regulable. Deben protegerse con faldones para limitar la emisión de polvo, la distribución del producto se realiza mediante un rotor distribuidor provisto de alvéolos, ligado o no a la velocidad de avance del vehículo tractor, los dispositivos de dosificación son en general de tipo volumétrico, algunos equipos están provistos de controles electrónicos que indican la dosificación teórica establecida, la superficie tratada, la velocidad de avance y la distancia recorrida. Como órdenes de magnitud de los parámetros más significativos de estos distribuidores pueden indicarse los siguientes:

- capacidad de almacenamiento de producto: entre 8 y 30 m³;
- ancho de reparto: entre 2.2 y 2.9 m (puede regularse a anchos más reducidos).

Hay que mencionar que algunas estabilizadoras y recicladoras llevan integrando un silo de cemento junto con un distribuidor para repartirlo directamente delante del rotor de disgregación.

Los equipos que dosifican el cemento en forma de lechada están constituidos fundamentalmente por un silo de cemento, un depósito de agua, una mezcladora de suspensión, una bomba que impulsa la suspensión hasta el rotor de fresado de la recicladora y los equipos electrónicos que impulsa la suspensión hasta el rotor de fresado de la recicladora y los equipos electrónicos adecuados capaces de dosificar ponderalmente el porcentaje indicado de lechada respecto al peso del material tratado (de acuerdo con la velocidad de avances, densidad del material, dosificación de cemento y profundidad de trabajo) Están provistos además de un dispositivo

adicional de aportación de agua a la recicladora, que la recibe por una segunda rampa de difusores, para añadir en caso necesario el agua que se precise para obtener la humedad óptima del material. Evidentemente, esta segunda opción tiene la ventaja de evitar pérdidas de conglomerante por el viento y ser una solución mucho más respetuosa con el medio ambiente, además proporciona una dosificación más exacta y reduce el tiempo de espera de las cubas de cemento, por tener el equipo, capacidad para una cuba completa, no obstante, si la humedad de la explanada o del firme está próxima a la de compactación, la aportada por la lechada puede ser perjudicial, requiriéndose entonces un oreo previo del material a reciclar; y en obras de pequeño volumen puede suponer un mayor coste por la repercusión del equipo.

Estabilizadoras y recicladoras

El elemento fundamental de estos equipos es un rotor provisto de picas o de paletas que realiza la disgregación del suelo o del firme y efectúa el mezclado de los elementos con el cemento y el agua.

Los equipos de concepción más sencilla son por tanto aquellos en los que la mezcla así formada no sufre ningún otro proceso hasta su paso por las rodillos, excepto la creación de juntas en fresco en el caso de firmes reciclados, los rotores de fresado empleados para reciclar firmes llevan montadas unas picas con puntas de widia, mientras que las utilizadas para estabilizaciones suelen estar provistos de unas puntas trituradoras rectas o en forma de L, en un número dos o tres veces inferior al de picas. En algunos modelos se ofrecen hasta 10 tipos diferentes de rotores, por contrario, en otros casos se emplea un mismo rotor con puntas de widia tanto para estabilizar explanadas como para reciclar firmes, las picas y paletas se disponen helicoidalmente en el rotor, a fin de asegurar una mayor homogeneidad tanto en la disgregación como en el mezclado.

Dentro de las estabilizadoras y recicladoras, y dejando aparte los rotos arados y otros equipos de origen agrícola y baja potencia, que solamente deben emplearse en obras de escasa importancia, se pueden distinguir los siguientes tipos:

- Equipos que pueden utilizarse indistintamente tanto para la estabilización de suelos como para reciclados.
- Equipos de reciclado derivados de las fresadoras de firmes, pero a diferencia de estas últimas, además de escarificar el material realizan un mezclado del mismo con cemento y con agua.

- Recicladora con dispositivo de mezclado independiente del rotor de disgregación.
- Recicladora con machacadora incorporada.
- Recicladora para procesar materiales fresados por otros equipos.

En todos estos equipos, los elementos que atacan el terreno o firme (paletas o picas) se ven sometidos a un gran desgaste, por ello, suele ser necesario reponer una proporción importante de las mismas o incluso su totalidad a lo largo de una jornada de trabajo, especialmente en el caso de reciclados de firmes, como es lógico, dependiendo del material a fresar, dicho desgaste será mayor o menor:

- En firmes de áridos calizos o silicios – calcáreos, con más de 60 % de caliza, suelen ser frecuentes reponer diariamente todas las picas del rotor.
- Con materiales más duros y más abrasivos, como son los áridos silíceos, puede ser necesario sustituir picas dos veces en una misma jornada, a mediodía y por la noche, e incluso en algunas ocasiones cada dos horas.
- En casos de abrasividad muy elevada se suelen cambiar todas las picas en cada reposición de las mismas, si se trata de rotores de 150-200 picas, ello implica tener cambiar del orden de 300, 400 o incluso 500 unidades cada jornada.

Por este motivo, las picas se alojan en los portapicas mediante sistemas a presión que las hacen fácilmente recambiables sin necesidad de cortar o soldar.

Equipos para la ejecución de juntas en fresco. En el caso de firmes reciclados con cemento sometidos a una circulación intensa, hay que tratar de evitar la aparición de las fisuras de retracción en la superficie de rodadura, el método más eficaz para ello es la creación en fresco de juntas a distancias cortas 2.5 – 3.5 m, siguiendo en este sentido la misma filosofía adoptada desde hace ya más de diez años en varios países para los firmes con bases granulares tratadas con cemento. Actualmente existen distintas posibilidades para la formación de las juntas en fresco, según su profundidad y la inclusión o no de algún tipo de elemento en el surco a medida que se va formando el mismo:

- Del orden de un tercio del espesor de la capa:
bandeja vibrante con cuchilla triangular soldada a su parte inferior;
rodillo vibrante con cuchilla anular soldada al mismo;
disco acoplado a rodillo vibrante.
- La totalidad del espesor de la capa:
con Riego de emulsión (equipo Craft);
con inclusión de una cinta de plástico (método Olivia);

con inclusión de perfil de plástico (juntas activas).

Una vez creadas las entallas se lleva a cabo la compactación de la capa reciclada mediante el paso de rodillos.

Los equipos que podrían considerarse como específicos para las técnicas de estabilización de explanadas y reciclados *in situ* de firmes (dosificadores de conglomerante, estabilizadoras o recicladoras) han experimentado un espectacular avance a lo largo de los últimos años, los cuales se han traducido en una mayor fiabilidad de los resultados obtenidos con la mismas (profundidad, eficacia y homogeneidad del tratamiento) y en un aumento de los rendimientos. Por otra parte, en el caso de firmes reciclados con cemento sometidos a tráfico importantes, los desarrollos en los equipos de creación de juntas en fresco permiten minimizar e incluso hacer desaparecer los posibles problemas derivados de la reflexión de fisuras de retracción en la capa de rodadura, sin necesidad de disponer un espesor excesivo de mezcla bituminosa.

No obstante, no hay que olvidar que en este tipo de obras, la disgregación de los materiales, la mezcla de los mismos con cemento y agua y, en su caso, la ejecución de las juntas son los primeros pasos de un proceso en que las restantes etapas, compactación, curado y en los firmes reciclados y la extensión de las capas de mezcla bituminosa, deben también realizarse adecuadamente para obtener unos resultados satisfactorios.

2.8. Análisis de costes de las unidades de Reciclado y Estabilizado *in situ*

En este punto se analizan, los factores que conforman el precio final de las unidades de reciclado o estabilizado *in situ* con cemento.

A partir de unas condiciones tipo, se llega al precio de estas unidades en una obra determinada.

Se completa este asunto con un estudio de probable coste de las diferentes secciones de firme de la vigente Instrucción de Carreteras de España, pese al inconveniente que supone tener que estimar muchos parámetros.

Empezamos por una descomposición elemental de los costes. El esquema que se va a seguir será de la siguiente manera:

A - Materiales:

- Suelos, tierras o explanadas: materiales que están *in situ*
 - tamaños,
 - abrasión,
 - cohesión.
- Cemento
 - tipo de cemento,
 - la cantidad influye en el rendimiento de la máquina.
- Agua
 - a veces es muy escasa,
 - distancia al tajo.
- Material de desgaste.
 - picas o paletas: muchos tipos y precios,
 - resto de elementos de desgaste.

B - Mano de Obra

- Mano de obra de la maquinaria especializada.
- Ayudas: Cortes de tráfico, etc.

C - Maquinaria

Los factores que influyen en los costes de la maquinaria son:

- valor de adquisición,
- periodo de amortización,
- mantenimiento,
- costes Financieros,
- gastos de explotación,
- rendimientos,
- días de trabajo al año,
- maquinaria auxiliar: furgonetas, coche, taller,
- transporte de maquinaria al tajo y retirada de la misma.

Algunos datos adicionales, a tener en cuenta para los costes:

- Un equipo de reciclado o estabilizado debe ejecutar del orden de 120 días de trabajo x 8000m²/día de trabajo = 1.000.000 m² por año.
- Si se trabajan 10 horas diarias, la maquinaria trabajara en torno a 120 días x 10 horas/día = 1200 horas/año.
- Por cada día de trabajo suponemos al menos un 10% de tiempo muerto debido a averías de la maquinaria y otro tanto a traslado de la misma.

- El resto hasta 200 días de trabajo máximo en un año se aplican a coordinación entre las diferentes obras y a condiciones meteorológicas.
- El coste de la unidad es del mismo orden de magnitud que el de extracción, transporte y empleo de materiales de préstamos en cuanto la distancia supera pocos Kilómetros.
- Si el estudio se hace comparativamente con otras unidades alternativas (materiales de préstamos) habría que tener en cuenta el deterioro de las vías de acceso a la obra causado por el paso de los camiones de transporte de los materiales del préstamo.

2.9. Suelos estabilizados *in situ*: criterios para la formación de explanadas y prescripciones técnicas de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento.

La Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento (DGCMF) está revisando actualmente el artículo de suelos estabilizados *in situ* con cemento del Pliego de Prescripción Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). En este documento, se recogen las prescripciones más importantes de esta normativa y los criterios y obtención de las explanadas, indicados en la Norma 6.1 y 2-IC.

Por Orden Ministerial de 23 de mayo de 1989 se aprobó la Norma 6.1 y 2 – IC sobre secciones de firme (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1989). En el tiempo transcurrido desde entonces se han producido diferentes circunstancias que motivan su revisión, esta se realizó en el año 2003, por:

- Un importante crecimiento del tráfico de vehículos pesados, especialmente en tamos de autovías de Red de Carreteras de Estado localizados en las inmediaciones de las grandes ciudades.
- El desarrollo de nuevos materiales y técnicas relativos a la construcción de firmes y explanadas.
- La acumulación de experiencia a raíz de la construcción de nuevas carreteras y de las ya existentes.

Uno de los cambios introducidos es el relativo a los tipos de explanada cuya definición y obtención quedara como se muestra en la figura 2.21. Como se ve en dicha figura ha cobrado especial relevancia el uso de suelos estabilizados, sobre todo para la obtención de explanadas de categoría E3, en la que se exigen en coronación treinta centímetros de suelo estabilizado S-EST3 para todos los casos, excepto el de

terreno subyacente constituido por roca, otro cambio importante es que solo se admiten explanadas tipo E3 para las categorías de tráfico T00 y T0 que quedan definidas.

T00 → $IMD_p > 4000$

T0 → $2000 > IMD_p > 4000$

Siendo IMD la intensidad media diaria e IMD_p la intensidad media diaria de vehículos, en el carril de proyecto para el año de puesta en servicio.

Tabla 2.5 - Formación de la explanada, tipos de suelo de la explanada.

		TIPOS DE SUELOS DE LA EXPLANACIÓN (DESMONTES) O DE LA OBRA DE TIERRA SUBYACENTE (TERRAPLENES, PEDRAPLENES O RELLENOS TODO-UNO)				
		SUELOS INADECUADOS Y MARGINALES (IN)	SUELOS TOLERABLES (0)	SUELOS ADECUADOS (1)	SUELOS SELECCIONADOS (2) y (3)	ROCA (R)
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1 $E_{v2} \geq 60MPa$					
	E2 $E_{v2} \geq 120MPa$					
	E3 $E_{v2} \geq 300MPa$					

IN Suelo inadecuado o marginal (Art. 330 del PG-3)

0 Suelo tolerable (Art. 330 del PG-3)

1 Suelo adecuado (Art. 330 del PG-3)

2 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)

3 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)

S-EST 1 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

S-EST 2 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

S-EST 3 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

HM-20 Hormigón (Art. 610 del PG-3)

tipo de material

espesor

30 ← mínimo en cm

2 ← suelo de explanación o de la obra de tierra subyacente

Definición y obtención de la explanada

Se define como suelo estabilizado in situ con cemento la mezcla íntima de un suelo en la propia traza de la carretera con cemento y, eventualmente, agua, la cual, convenientemente compactada, tiene por objeto, fundamentalmente, disminuir la susceptibilidad al agua del suelo o aumentar su resistencia.

La ejecución de un suelo estabilizado *in situ* incluye las siguientes operaciones:

- Estudio de la fórmula de trabajo.

- Preparación de la superficie existente.
- Disgregación del suelo.
- Corrección de la humedad del suelo.
- Distribución del cemento.
- Ejecución de la mezcla.
- Compactación.
- Terminación de la superficie.
- Ejecución de las juntas.
- Curado final.

Según sus características finales se establecen tres tipos de suelos estabilizados *in situ* con cemento, denominados respectivamente S-EST1, S-EST2 y S-EST3.

Materiales

Cemento. El Pliego de prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras figura el tipo y clase resistente del cemento, que deberá ser, salvo justificación en contrario, de clases resistentes 22.5 o 32.5. No se emplearan cementos de aluminados de calcio, ni mezclas de cementos con adiciones que no hayan sido realizadas en la fábrica de cemento.

Si el contenido de solubles en el suelo se vaya a estabilizar, determinado según la UNE 103201, fuera superior al cinco por mil en masa, deberá emplearse un cemento resistente a los sulfatos y aislar adecuadamente la estabilización de las estructuras y de las obras de paso de hormigón.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijara el principio de fraguado, según la UNE-EN 196-3, que en todo caso, no podrá tener lugar antes de las dos horas.

Suelo. Los materiales que se vayan a estabilizar *in situ* con cemento serán suelos de la traza, otros materiales locales o escorias, no contendrán materia vegetal, orgánica o de cualquier otra naturaleza en cantidades perjudiciales para el fraguado del cemento. Tampoco presentaran reactividad potencial con el cemento.

Los suelos que se vayan a estabilizar con cemento cumplirán las siguientes especificaciones de granulometría:

Tabla 2.6 - Granulometría del suelo en las estabilizaciones con cemento.

Tipo de suelo estabilizado.	Cernido acumulado (% en masa).		
	Tamaño de los tamices (mm).		
	80	2	0.063
S-EST1	100	> 20	< 50
S-EST2	100	> 20	< 35
S-EST3	100	> 20	< 35

Tabla 2.7 - Características de los suelos estabilizados.

Características.	Tipo de suelo estabilizado.		
	S-EST1	S-EST2	S-EST3
LL	-	< 40	< 40
IP	<15	< 15	< 15
Mat. Org. (% masa)	< 2	< 1	< 1
Sulfato soluble (% m)	< 1	< 1	< 1

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares definirá el tipo y composición del suelo estabilizado, cuyo contenido de cemento, capacidad de soporte y compacidad deberán cumplir lo indicado:

Tabla 2.8 - Especificaciones del suelo estabilizado *in situ* con cemento.

Características	Unidad	Norma	S-EST1	S-EST2	S-EST3
Cont. De cemento	%masa		> 2	> 3	> 3
Índice de CBR	-	UNE103502	> 5	> 10	-
Compresión simple	MPa	NLT-305	-	-	>1.5
Compacidad PM	%densid.	UNE103501	> 95	> 95	> 95

La estabilización de suelos *in situ* con cemento no se podrá iniciar en tanto que el Director de las Obras no haya aprobado la fórmula de trabajo, la cual deberá señalar:

- La dosificación mínima de cemento, indicando su tipo y clase resistente, referida a la masa total de suelo seco y, en su caso, por metro cuadrado de superficie, la cual no deberá ser inferior a la mínima fijada en la tabla.
- El contenido de humedad del suelo en el momento de su mezcla con el cemento, y el de la mezcla en el momento de su compactación.
- La compactación a obtener, mediante el valor mínimo de la densidad que deberá cumplir lo fijado en la tabla.
- El índice CBR a siete días o la resistencia a compresión simple a la misma edad, según el tipo de suelo estabilizado, cuyos valores deberán cumplir lo fijado en la tabla.
- El plazo de trabajabilidad.

Se estudiara y aprobara otra fórmula de trabajo si varía la procedencia de los materiales o se produce un cambio importante en sus características.

Para la ejecución de los suelos estabilizados *in situ*, deberán emplear equipos mecánicos. Estos podrán ser equipos independientes que realicen por separado las operaciones de disgregación, distribución del cemento, humectación, mezcla y compactación, o bien equipos que realicen dos o más de estas operaciones, excepto la compactación, de forma simultánea.

La mezcla *in situ* del suelo con el cemento se realiza mediante equipos que permitan una suficiente disgregación de aquel hasta la profundidad establecida en los Planos, si dicha disgregación no hubiera sido previamente obtenida por escarificación, y una mezcla uniforme de ambos materiales.

Cuando se estabilice el suelo existente en la traza, este deberá disgregarse en toda la anchura de la capa que se vaya a mezclar, y hasta la profundidad necesaria para alcanzar, una vez compactada, el espesor de estabilización señalado en los Planos.

Si se añade suelo de aportación para corregir las características de existente, se deberán mezclar ambos en todo el espesor de la capa a estabilizar, antes de iniciar la distribución del cemento.

El suelo que se vaya a estabilizar deberá disgregarse hasta conseguir una eficacia mínima del cien por cien, referida al tamiz 25 mm de la UNE-EN 933-2, y del ochenta por ciento referida al tamiz 4 mm de la UNE-EN 933-2, por eficacia de disgregación se entiende la relación entre el cernido en obra del material húmedo y el cernido en laboratorio de ese mismo material desecado y desmenuzado, por el tamiz al que se refiere.

El suelo disgregado no deberá presentar elementos ni grumos de tamaño superior a los 80 mm La humedad del suelo disgregado, inmediatamente antes de su mezcla con cemento, deberá ser tal, que permita, con el equipo que se vaya a utilizar, su mezcla sea íntima y uniforme. En caso necesario, el suelo se humedecerá previamente para facilitar la mezcla, el agua se agregara, en todo caso, de manera uniforme evitando que se acumule en las huellas dejadas por el equipo de humectación, no podrá procederse a la distribución del cemento mientras queden concentraciones superficiales de humedad.

Los suelos cohesivos se humedecerán, en su caso, el día anterior al de la ejecución de la mezcla, para que todas sus partículas resulten interiormente mojadas.

En los casos especiales en los que la humedad natural del material sea excesiva, se tomaran las medidas adecuadas, para conseguir la disgregación y compactación previstas. La distribución del cemento, que se hará será por medios mecánicos, y perfectamente en forma de lechada, si bien en obras pequeñas o cuando sea conveniente a juicio de Director de las Obras, por un exceso de humedad natural en el suelo a estabilizar, este podrá autorizar su distribución en seco. Solo en zonas de reducida extensión, no accesibles a los equipos mecánicos, el Director de las Obras podrá autorizar la distribución manual, para ello, se utilizara sacos de cemento que se colocaran sobre el suelo formando cuadrículas de lados aproximadamente iguales, correspondientes a la dosificación aprobada, una vez abiertos los sacos, su contenido será distribuido rápidamente y uniformemente mediante rastrillos manuales o rastras de púas remolcadas. En la distribución del cemento se tomaran las medidas adecuadas para el cumplimiento de la legislación que, en materia ambiental y de seguridad laboral, estuviese vigente. Inmediatamente después de la distribución del cemento deberá procederse a su mezcla con el suelo, hasta lograr un material homogéneo, cuando no exista un procedimiento rápido para comprobación de la uniformidad de la mezcla, se continuara esta hasta la total ausencia de grumos en el amasijo, y hasta que esté presente un color uniforme.

En el caso de ser necesaria la incorporación de agua a la mezcla para alcanzar el valor de la humedad de la mezcla fijado por la fórmula de trabajo, deberán tenerse en cuenta las posibles evaporaciones o precipitaciones que puedan tener lugar durante la ejecución de los trabajos, dicha incorporación deberá realizarse, preferentemente, por el propio equipo de mezcla, el Director de las Obras, podrá autorizar el empleo de un tanque regador independiente, en este segundo caso, el agua deberá agregarse uniformemente y deberá evitar que escurra por las roderas dejadas por el tanque regador, asimismo, no se permitirán paradas del equipo mientras esta regando, con el fin de evitar la formación de zonas con exceso de humedad, la mezcla no podrá permanecer más de media hora, sin que se proceda a la compactación y terminación de la superficie o a una nueva disgregación y mezcla, en el momento de iniciar la compactación, la mezcla deberá hallarse suelta en todo su espesor.

La compactación se continua hasta alcanzar la densidad específica en la fórmula de trabajo, y deberá finalizar dentro del plazo de trabajabilidad de la mezcla.

Durante la compactación, la superficie del suelo estabilizado *in situ* con cemento se conformara, mediante refino con motoniveladora, eliminando irregularidades, huellas o discontinuidades inadmisibles, para lo cual el Director de las Obras podrá aprobar la realización de una ligera escarificación de la superficie y posterior recompactación previa con adición del agua necesaria. Una vez terminada la compactación no se permite su recrecimiento, sin embargo y siempre dentro del plazo de trabajabilidad, se podrá hacer un refino con motoniveladora hasta conseguir la rasante y sección definidas en los planos de proyecto, son las tolerancias establecidas, a continuación se procederá a eliminar de la superficie todo el material suelto, por medio de barredoras mecánicas de púas no metálicas, y a la recompactación posterior del área corregida.

Los materiales procedentes del refino deberán ser retirados a vertedero o para su empleo en las aplicaciones que autorice el Director de las Obras.

Las juntas de trabajo se dispondrán de forma que su borde quede perfectamente vertical debiendo para ello recompactarse la parte precisa de la zona ya terminada.

Se dispondrá de juntas transversales donde el proceso constructivo se interrumpa por encima del plazo de trabajabilidad, si se trabaja por facciones de la anchura total, se dispondrán juntas de trabajo longitudinales siempre que no sea posible compactar el material de una franja dentro del plazo máximo de trabajabilidad del material de la franja adyacente puesto en obra con anterioridad.

Terminadas las operaciones de compactación y terminación, se procederá a la aplicación de un riego de curado, hasta su aplicación deberá mantenerse la superficie húmeda, para lo cual deberá regarse con la debida frecuencia.

Una vez ejecutado el riego de curado, no podrán circular sobre el vehículos ligeros en los primeros tres días, ni vehículos pesados en siete, salvo con autorización expresa del Director de las Obras y estableciendo previamente una protección del riego de curado, mediante la extensión de una capa de árido de cobertura. Dicha protección deberá garantizar la integridad del riego de curado durante el periodo mínimo de siete días, será completamente retirada por barrido antes de ejecutar otra unidad de obra sobre el suelo estabilizado *in situ*.

Antes de iniciar la estabilización *in situ* del suelo será preceptiva la realización del correspondiente tramo de prueba para fijar la composición de la mezcla, y comprobar el funcionamiento de los equipos necesarios para la ejecución de las obras.

Durante la construcción del tramo de prueba, se comprobarán la idoneidad de la fórmula de trabajo y de los medios mecánicos propuestos, la eficacia de disgregación, la relación entre el número de pasadas del equipo de compactación y la densidad obtenida, y la conformidad del suelo estabilizado con las condiciones específicas sobre humedad, espesor de la capa, densidad, granulometría, contenido de cemento, resistencia y demás requisitos exigidos.

La densidad media en el espesor de la capa estabilizada en cualquier punto será superior al noventa y cinco por ciento de la densidad obtenida en el ensayo Proctor modificado, para la fórmula de trabajo aprobada, y con este valor se fabricaran las probetas para la determinación de la resistencia a compresión simple o del índice CBR. La resistencia a compresión simple a siete días, o el índice CBR deberán cumplir lo especificado, según el tipo de suelo estabilizado *in situ*.

También se fijan especificaciones geométricas de la unidad terminada, sobre espesor, anchura, rasante y regularidad superficial.

Salvo autorización expresa del Director de las Obras, no se permite la ejecución del reciclado *in situ* con cemento cuando:

- la temperatura ambiente a la sombra sea superior a los treinta y cinco grados Celsius, o inferior a cinco grados Celsius;
- se produzcan precipitaciones atmosféricas.

En casos en que el Director de las Obras autorice la extensión del cemento en seco, su distribución deberá interrumpirse cuando la fuerza del viento sea excesiva,

teniendo en cuenta la legislación vigente sobre seguridad laboral y materia ambiental.

Antes de iniciar su estabilización *in situ* con cemento, se identificara cada tipo de suelo, determinando su aptitud, el reconocimiento se realiza de la forma más representativa posible, mediante sondeos, calicatas u otros métodos de toma de muestreo.

De cada tipo de suelo, sea cual fuere la cantidad de suelo a estabilizar, se tomara cuatro muestras, añadiendo una más por cada cinco mil metros cúbicos, o fracción de exceso sobre veinte mil metros cúbicos de suelo, sobre cada muestra se realizara ensayos de granulometría, límite líquido e índice de plasticidad, contenido de materia orgánica y contenido de sulfatos solubles.

En la ejecución de la estabilización, se tomara diariamente un mínimo de dos muestras del suelo antes de mezclado con el cemento, una por la mañana y otra por la tarde, sobre las que se determinara su granulometría por tamizado, así como la eficacia de la disgregación.

Al menos dos veces al día, se controlara el funcionamiento de las boquillas de inyección de la lechada don la información proporcionada por el equipo para el control del volumen de lechada añadido. En el caso de distribución en seco, se comprobara la dotación de cemento utilizado mediante el pesaje de bandejas metálicas u otros dispositivos similares colocados sobre la superficie, por cada mil metros cúbicos de suelo estabilizado *in situ* con cemento, o cada día, si se estabiliza una cantidad menor. Se tomaran cinco muestras aleatorias del suelo recién mezclado con el cemento sobre las que se determinara el índice CBR a siete días, para suelos S-EST1 y S-EST2, o la resistencia a compresión simple, para suelos S-EST3. En ambos casos, las probetas se confeccionaran según el procedimiento descrito en la NLT-310, con la densidad exigida en obra.

Durante la ejecución de las obras se comprobara con frecuencia:

- La temperatura y humedad relativa de los ambientes mediante un termohigrografo registrador.
- El espesor estabilizado, mediante un punzón graduado u otro procedimiento aprobado por el Director de las Obras.
- La humedad del suelo mediante un procedimiento aprobado por el Director de las Obras.

- La densidad alcanzada por la capa durante el proceso de compactación, para lo que se utilizaran métodos rápidos de control debidamente correlacionados con los métodos de ensayos de referencia.
- La composición y forma de actuación del equipo utilizado en la ejecución de la estabilización.

Se considera como lote de recepción, que se aceptara o rechazara en bloque, al menos que resulte de aplicar los tres criterios siguientes a una sola capa de suelo estabilizado *in situ* son cemento:

- quinientos metros de calzada;
- tres mil quinientos metros cuadrados de calzada;
- la fracción construida diariamente.

Se asignara a cada lote de recepción las probetas fabricadas durante el control de la producción que le correspondan.

Sobre estos lotes se harán ensayos para determinar la humedad natural, la densidad *in situ*, el espesor de la capa de suelo estabilizado, la anchura extendida y compactada y la regularidad superficial, que se compararan con las especificaciones de la unidad terminada.

Se establecen criterios de aceptación y rechazo de la unidad terminada, y tolerancias admisibles respecto de las especificaciones fijadas para la misma, los criterios de aceptación y rechazo relativos al espesor obtenido, están orientados en sentido de admitir reducciones respecto al teórico siempre que no se baje de un mínimo establecido, y que se compense con el aumento de espesor de las capas superiores son incremento de costes para el cliente.

La medida de los índices CBR o de la resistencia a compresión simple, según el caso, deberá ser superior al noventa por ciento del valor especificado por norma y en ningún resultado individual podrá ser inferior a dicho valor en más de un veinte por ciento, en caso contrario, el lote correspondiente será demolido y reconstruido a cargo del contratista. El Director de las Obras podrá autorizar la compensación de la merma de resistencia o de índice CBR, con un aumento de espesor de las capas superiores, sin incremento de coste.

Las zonas que no cumplan las especificaciones de regularidad superficial, o que retengan agua sobre la superficie, deberán corregirse por el contratista, a su cargo, de acuerdo con lo siguiente:

- El recorte y recompactación de la zona alterada solo podrá hacerse si se está dentro del plazo de trabajabilidad; si se hubiera rebasado dicho plazo, se demolerá y reconstruirá totalmente la zona afectada, de acuerdo con las instrucciones del Director de las Obras.
- El recrecimiento en capa delgada no se permitirá en ningún caso, si la rasante de la capa de suelo estabilizado quede por debajo de la teórica en más de las tolerancias admisibles; se incrementará el espesor de la capa inmediatamente superior o se procederá a la demolición y reconstrucción de la zona afectada según las instrucciones del Director de las Obras.

CAPÍTULO 3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

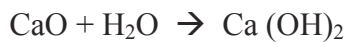
3.1. Estudio comparativo del empleo de los residuos de azucarera (espumas de cal), frente a la cal en la mejora y estabilización de suelos

Se ha realizado un estudio comparativo (Universidad de Ciudad Real, Campus Universitario, Facultad de Ciencias Químicas, A. Acosta) del empleo de los residuos de azucarera denominados incorrectamente “espumas de cal”, frente a la cal, en la mejora y estabilización de suelos.

En este trabajo se pone de manifiesto que las “espumas de cal”, cuya denominación correcta sería carbonato cálcico precipitado de origen azucarero - CCPA, no tienen un comportamiento similar al de la cal en mezclas con suelos y arcillas. Se realiza una caracterización completa de los carbonatos cálcicos precipitados de origen azucarero y se dan los resultados de su comportamiento en el tratamiento de suelos para la obra pública.

El objetivo de este trabajo es hacer un estudio comparativo del empleo de los residuos de azucarera denominados espumas de cal frente a la cal en la mejora y estabilización de suelos. Esta denominación de espumas de cal conlleva a errores a su composición química y comportamiento, ya que introduce a una similitud con la cal, y se espera de ellas propiedades semejantes a la misma. Sin embargo, este material de origen azucarero, no contiene cal, y como se demostró en este trabajo, sus propiedades son bastante diferentes a las de la cal. Las incorrectamente conocidas, como espumas de cal o lodos carbonatados de azucarera son los precipitados inorgánicos resultantes de la purificación de los jugos de remolacha por medio de encalado y posterior carbonatación, a fin de eliminar de los mismos todas aquellas sustancias que no sean azúcares. Su producción se lleva a cabo a partir de piedra caliza, la misión de la piedra caliza es proporcionar el CaO y el CO₂ para llevar a cabo el proceso de depuración de aquellas sustancias no azucaradas del jugo de difusión procedente de la remolacha, pues el CaO formado se transforma en Ca(OH)₂, el cual provoca un aumento de pH, favoreciendo la coagulación de dichas sustancias, el CO₂ hace precipitar el Ca(OH)₂ y con él las sustancias no azúcares, pudiendo separar así el jugo por un lado y el precipitado que es carbonato cálcico precipitado de origen azucarero CCPA o espumas de cal por otro.

La reacción de generación de las “espumas de cal”, cuyo nombre correcto es CCPA, es la siguiente:



Se ha seleccionado un suelo que tras estudio previos ha sido clasificado según PG 3 (Ministerio de Fomento, 2000) como inadecuado, para ver las variaciones de sus propiedades mecánicas con la cal y con el CCPA. La cal utilizada para este ensayo es una cal comercial que cumple la normativa vigente, sus propiedades físicas y químicas entran dentro de la norma y también vemos que las propiedades están dentro de los valores más frecuentes. Los CCPA presentan aspectos polvorientos con tonalidades grisáceas y se aglomeran fácilmente formando terrones. Los métodos utilizados en la caracterización del CCPA han sido difracciones de Rayos X, granulometría, cantidad de materia orgánica, pérdidas por calcinación, pH, microscopia electrónica de barrido, color y ICP-MS para la composición química, en cuanto a las técnicas empleadas en la caracterización del suelo se han seguido las normas UNE, determinación del contenido de materia orgánica, granulometría de suelos por tamizado, límites de Atterberg, proctor modificado, CBR en el laboratorio. El resultado del estudio, por difracción de Rayos X de muestra representativa de CCPA, cal y carbonatos cálcicos tipo calcita, pone de manifiesto la gran similitud de los CCPA con la calcita y su diferencia con respecto a la cal, tras un estudio de las muestras por microscopia electrónica de barrido se ha determinado que los CCPA están formados por cristales escalenoedricos típicos de la calcita. En cuanto a la plasticidad de mezclas de arcillas con CCPA, se observa que la CCPA prácticamente no disminuyen la plasticidad de las arcillas como ocurre con la cal, es decir, el comportamiento de los CCPA en mezclas con arcillas no es similar al de la cal y se asemeja al de un filler carbonatado cualquiera; la cal modifica notablemente la plasticidad y el límite líquido de estas arcillas, mientras que el CCPA apenas provoca variaciones, pudiéndose añadir hasta un 20% de CCPA sin tener variaciones apreciables en la plasticidad ni en el límite líquido.

Con respecto a su comportamiento frente a materiales arcillosos, se hizo el siguiente experimento:

Se añadió una misma cantidad de hidróxido cálcico a diferentes suspensiones:

- suspensión de arcillas en agua;

- suspensión de CCPA en agua;
- suspensión de arcillas + CCPA en agua;
- suspensión de CCP (Carbonato cálcico precipitado industrial) en agua.

Se observó que la floculación y la velocidad de sedimentación de las distintas suspensiones era muy lenta, esta velocidad aumentaba por la adición de hidróxido cálcico, si bien, en el caso de la suspensión de arcillas la velocidad de sedimentación de los flóculos era mayor al adicionar una mezcla de CCPA con hidróxido cálcico que al añadirse simplemente el hidróxido cálcico. En cuanto a su comportamiento en la variación de las propiedades de suelos en la obra pública, se han realizado los ensayos que se describen de forma comparativa utilizando una cantidad estándar de cal y de CCPA como correctores de las propiedades mecánicas del suelo de referencia.

La suspensión con cal y los CCPA tienen grandes diferencias: la cal provoca modificaciones en el suelo apreciables, mientras que el CCPA apenas varía las características del mismo.

Este estudio permitió concluir que las “espumas de cal” tienen una composición característica de un carbonato cálcico precipitado con un contenido importante de materia orgánica.

Esta composición es la correspondiente a su origen en un proceso de depuración de jugos azucarados para adición de lechada de cal y posterior carbonatación en la misma.

El contenido en hidróxido calcio de estos carbonatos cálcicos precipitados de origen azucarero CCPA, es prácticamente despreciable, tras un proceso de maduración, en el que hidróxido cálcico residual se carbonata por la acción atmosférica.

El comportamiento del CCPA en la consolidación y mejora de suelos para obra pública es el propio filler carbonatado, no apreciándose modificaciones sustanciales que puedan suponer una corrección de suelos inadecuados para la obra pública.

En definitiva el CCPA, incorrectamente denominado “espumas de cal”, no puede ser considerado un sustituto de la cal en la mejora y estabilización de suelos para obras.

(Kraemer et al, 2001).

3.2. Estabilización de sepiolita con cal

Se representa los resultados de una serie de ensayos de laboratorio realizados sobre la estabilización de una sepiolita con cal. Este mineral suele encontrarse en la región de Madrid, fundamentalmente en la zona este y sureste, en la actualidad, con motivo de la construcción de nuevas autopistas, se están llevando a cabo importantes movimientos de tierra en los que está presente este mineral. Los resultados obtenidos muestran que la plasticidad disminuye en muy escasa medida, la expansividad que presenta, desaparece con el tiempo, y la presencia de cal, aumenta la resistencia, el coeficiente de permeabilidad aumenta a corto plazo para apuntar una ligera tendencia a disminuir con el paso del tiempo.

La sepiolita es un mineral singular de la arcilla que se encuentra abundantemente en el entorno de Madrid, es un mineral típicamente español y en particular madrileño.

Para el estudio se ha utilizado sepiolita industrial comercializada, que es un filosilicato magnésico fibroso. Esta sepiolita ensayada, es prácticamente pura, con textura granular, muy plástica y moderadamente expansiva.

Se ha analizado también la microfabrica del suelo sepiolítico y su variación con la adición de cal y de la energía de compactación, concluyendo que el efecto de la cal es generador de una textura amorfa con agregados de gran tamaño que proporcionan menor densidad y mayor porosidad de la muestra.

Se ha estabilizado la sepiolita con cal para observar su comportamiento geotécnico mediante una campaña de ensayos de laboratorio, con distintas adiciones.

El efecto de la cal en las propiedades índice geotécnicas del suelo sepiolítico, las consecuencias más importantes son:

- La elevada plasticidad que muestra el suelo original, permanece casi constante al añadirle cal, el límite plástico no se puede cuantificar por los métodos convencionales (bastoncillos), al adicionarle cal.
- La adición de cal hace que aumente los tamaños limo.
- Los valores de la densidad máxima corresponden a la energía de PN disminuyendo ligeramente con la adición de cal, mientras que con la energía de PM no cambian.

Respecto a las humedades óptimas, se producen cambios significativos como consecuencia de la adición de cal, aumentando los porcentajes de agua correspondientes a la óptima en unas 10 unidades para un 5 % de cal.

En cuanto al efecto de la cal en las propiedades geotécnicas del suelo sepiolítico:

- El efecto que domina en el valor de la resistencia a compresión simple, es la densidad que se alcanza, ella depende fundamentalmente de la energía de compactación de manera más determinante que la dosis de cal o el envejecimiento. La resistencia aumenta con el aumento del porcentaje de cal y con el tiempo de curado, siendo más resistente para mayores energías de compactación.
- La sepiolita natural es en ocasiones moderadamente expansiva, este hinchamiento disminuye a medida que aumenta la adición de cal y el tiempo de curado hasta llegar a anularse, en general disminuye para porcentaje reducidos de cal del orden de 2.5%.
- La compresibilidad disminuye, a corto plazo, con el aumento del porcentaje de cal de la mezcla, pero aumenta ligeramente con el tiempo de curado de las muestras, siendo mucho más beneficioso el efecto para un 5% de cal.
- La permeabilidad aumenta, fuertemente, a corto plazo, con la adición de cal, varias decenas de veces, pero disminuye, teniendo probamente hacia su valor original con la edad de la muestra

Las reacciones a corto plazo son más influyentes en cuanto a sus efectos en las propiedades índice y las reacciones a largo plazo, en cambio, respecto de las propiedades ingenieriles, estas últimas son debidas sobre todo a los efectos de tipo cementante. (Kraemer et al, 2001)

3.3. Ejemplos del uso de la cal en la mejora y estabilización de suelos en España

Este documento describe brevemente las últimas y más recientes realizaciones Españolas con estabilización de suelos con cal para formación de explanadas en carreteras. En España es frecuente encontrar, durante la construcción de carreteras, suelos con una alta plasticidad, baja capacidad portante y hinchamiento potencial. El empleo de cal permite que estos suelos inadecuados puedan emplearse como material para carreteras de una forma económica, mejorando la durabilidad, y reduciendo el impacto ambiental.

Recientemente, muchas obras de carretera en España han sido construidas estabilizando suelos con cal, habiéndose obtenido unos resultados satisfactorios, y actualmente esta técnica se emplea ampliamente, mejorando la experiencia y optimizando el uso de la cal para la estabilización de los suelos *in situ*.

Actualmente, son numerosos los ejemplos de estabilizaciones con cal a lo largo de toda la geografía española, con resultados técnicos, económicos y medioambientales muy satisfactorios.

Hace unos años, España con la construcción de redes de infraestructuras de obras lineales como ferrocarril y carreteras, minimizo y compenso al máximo posible el movimiento de tierras debido a consideraciones de tipo económico, ambiental y técnico. Por tanto, se hace cada vez más necesario, optimizar los procesos constructivos en cuestiones de coste, plazo y calidad. La posibilidad de utilizar los materiales que se encuentran directamente en la traza en la construcción de la propia infraestructura, sean cuales sean sus propiedades, mediante su mejora y estabilización permiten además disponer de capas con un comportamiento más fiable durante la vida útil de la obra, y todo ello a unos costes razonables, en el caso de suelos con contenidos apreciables de arcillas y limos, muy frecuentes en toda la geografía, los principales problemas geotécnicos para su empleo en la construcción de carreteras vienen ocasionados por su elevada plasticidad, reducida capacidad portante e inestabilidad de volumen en función de la humedad. El tratamiento y estabilización con cal de estos suelos está demostrando ser una solución muy interesante desde los puntos de vista económico, medioambiental y técnico. La presencia de este tipo de suelo, unida a la adversa climatología imperante en la Península, ha hecho necesaria la ejecución de numerosos tratamientos con cal en sus distintas aplicaciones: mejora, estabilización y secado, con resultados en todos ellos satisfactorios.

La estabilización de suelos es una técnica plenamente en auge, pero que no ha llegado aún a su madurez e implantación habitual en la construcción de obras lineales.

Esta tarea de todos los técnicos implicados, hacer análisis y estudio objetivos sobre las bondades de cada una de las técnicas de construcción de carreteras, de tal forma que podamos disponer en cualquier momento de distintas opciones en función de los condicionantes que tengamos.

El tratamiento de suelos con cal, en sus distintas aplicaciones y formas de ejecución, se está mostrando como una solución muy ventajosa a aplicar en las tareas de construcción y conservación de infraestructuras, los resultados obtenidos hasta el momento, han sido plenamente satisfactorios, a pesar de que la técnica moderna, como tal, se ha comenzado a aplicar en los últimos 20 o 25 años.

Si bien, a priori, parece que la estabilización de suelos siempre es la alternativa más cara, la evaluación correcta y real de todos los costes y afecciones al entorno que suele ser, en muchos casos, que el aprovechamiento de tierras entre la obra, los préstamos y los vertederos, la realidad suele ser, en muchos casos, que el aprovechamiento y estabilización de los suelos de la traza presenta mayores ventajas de tipo técnico, económico y medioambiental, y todo ello sin considerar la reducción que la estabilización de los suelos implica en los futuros costes de Conservación y Explotación de la vía.

Respecto al método de ejecución de las estabilizaciones, la estabilización *in situ* es la más adecuada debido a consideraciones económicas, el mezclado en planta puede resultar ventajoso si el suelo utilizado proviniese de un préstamo en el cual se pudiese realizar la mezcla, la moderna máquina de estabilización reciclado disponible hoy en día, permite obtener excelentes resultados con la ejecución *in situ*, no obstante, es importante reseñar que la ejecución de la estabilización propiamente dicha mediante la Metodología Convencional (preparación del suelo, extendido de cal, mezclado mediante maquinaria especializada, compactada y terminación) se ha comportado de manera más eficaz que otros métodos aplicados en tratamientos particulares. La utilización de maquinaria especializada permite garantizar la calidad de la ejecución y optimizar el aprovechamiento de la cal o cualquier otro conglomerante que se aplique.

Aunque hasta ahora, la tendencia normal en los proyectos de estabilización del suelo ha sido la de emplear cal apagada (hidróxido cálcico), es la más empleada en estas aplicaciones, sus ventajas, anteriormente señaladas, son las derivadas de:

- el valor doble de la densidad de esta respecto de la cal apagada reduce enormemente los costes y los problemas de logística de fabricación y transporte;
- esa mayor densidad también reduce la formación de polvo en la obra, en el caso de la vía seca;
- su reactividad es mayor que de la cal apagada, por lo tanto, se necesitan menores porcentajes de cal, siendo su acción más rápida.

Por otro lado, el empleo de cal viva solo requiere el aporte suplementario de un 30%, en masa de la cal, y de agua para la humidificación del terreno; por el contrario, si el terreno posee un exceso de humedad, muy frecuente en los suelos plásticos, la cal viva ayuda, como ya hemos visto, a reducirla. De esta forma, la cal viva permite ejecutar la estabilización en condiciones climatológicas adversas para otras unidades

de obra, reduciendo plazos de construcción y lo que es más importante, su empleo no extraña peligros especiales de Seguridad y Salud (Kraemer et al, 2001).

3.4. Estabilización con escorias de acería y cemento.

La escoria de acero horno de arco eléctrico es un material caracterizado por una moderada a baja reactividad hidráulica. El objetivo de este estudio de la Universidad de Cataluña, laboratorio de materiales de construcción, 2001, consiste en mejorar la capacidad de soporte y la resistencia de sistemas suelo-cemento por incorporación de escorias 0/5 mm. El suelo elegido es un suelo arcilloso de plasticidad media a baja común en el SO de Barcelona. La estabilidad volumétrica es el punto del estudio de durabilidad, llegándose a la conclusión de que los poros de la matriz sólida creada son suficientes para absorber la expansión a largo plazo de MgO, se evalúa el impacto ambiental por lixiviación con el test NEN-7341.

Los objetivos principales del estudio, son:

- mejorar las propiedades mecánicas de dichas estabilizaciones;
- evaluar su estabilidad volumétrica para garantizar su durabilidad;
- evaluar el impacto ambiental de esta aplicación a través de ensayos de lixiviación;
- reducir volumen de residuos, ahorrar energía y materiales primarios.

Se producen varias fracciones, pero se ha utilizado únicamente la fracción 0/5mm.

Una de las cosas a resaltar entre las características físicas, químicas y mineralógicas de las escorias de acería es la presencia de casi un 5% de MgO, parte del cual aparece como periclasa (Óxido de Magnesio libre), lo que podría representar un peligro para la estabilidad volumétrica de sistema pues ese presenta expansión retardada. Se ha observado que las escorias mezcladas con agua presenta actividad hidráulica. Si se prepara mortero de escorias machacada y arena silíceo tipo en proporción 1:2.4 en volumen y $a/c = 0.40$ se obtiene probetas que a 28 días presentan una resistencia a compresión de 0.5 Mpa; si la escoria se utiliza para sustituir la arena silíceo tipo en un mortero estándar son cemento y se comparan las resistencias obtenidas a 28 días con las de un mortero tipo del mismo cemento y arena silíceo estándar, las primeras resultan un 52% superiores. El estudio por difracción de rayos X y microscopía electrónica de los productos de hidratación de la escoria revela la presencia de CSH y de silicoaluminio cálcico, no presente en la escoria anhidra. El aumento de la resistencia en el mortero con escorias, se explica por una combinación

del efecto de los productos de hidratación con el factor mecánico que introducen la forma angulosa e irregular y la mayor resistencia de las partículas de esta.

El primer objetivo del estudio era probar la mejora introducida por la escoria en el suelo cemento en términos comparativos y dado que los primeros tanteos efectuados hacían concebir muchas esperanzas a nivel de las resistencias alcanzadas se precisó en la utilidad del sistema suelo-escorias-cemento como capa de pavimento rurales. Por tal motivo, se orientaron los criterios de dosificación en función de esta aplicación, sin que por ello se perjudicara al carácter comparativo del estudio, así el cemento elegido II-35 resultaba adecuado, el suelo cumplía los criterios de plasticidad $IP < 15$ y granulometría, se prepararon tres sistemas:

- mezcla 100/0 → 100% suelo + 0% escorias 0/5mm;
- mezcla 70/30 → 70% suelo + 30% escorias 0/5mm;
- mezcla 50/50 → 50% suelo + 50% escorias 0/5mm.

La composición granulométrica de las tres mezclas encaja en el huso.

La humedad óptima de comparación se determina por medio del ensayo PN. Este ensayo se ha efectuado con las tres llamadas mezclas, obteniéndose los valores óptimos

Tabla 3.1 - Humedad Densidad, según mezcla.

Mezcla	Humedad Óptima	Densidad Máxima.
100/0	12 %	1.85
70/30	10.5%	2.10
50/50	9.5%	2.27

Para dosificar la cantidad de cemento se parte de la mezcla 100/0 preparando 3 series de 3 probetas con la compactación PN con el 8%, 10% y 12%. La resistencia a 7 días en MPa fue de 1.38, 1.77 y 2.00 respectivamente, este último valor está en el ámbito de la resistencia media perseguida, se tomó el 12% de cemento en peso como dosificación de referencia, se prepararon 9 probetas con cada mezcla y con el 12% de cemento y se mantuvieron en cámara húmeda a 20 – 23°C de temperatura y 95 +/- 5 % de humedad hasta las edades de rotura de 7, 28 y 90 días. los resultados son:

Tabla 3.2.- Variabilidad de la resistencia.

Mezcla	7 Días	28 Días	90 Días
100/0	2.5	2.75	3.21
70/30	2.17	3.28	3.85
50/50	2.43	3.89	5.01

Todas las resistencias a compresión simple en Mpa y el 12% de cemento.

Como puede observarse la resistencia a compresión simple crece con la cantidad de escoria de la mezcla a todas las edades siendo particularmente significativos el aumento de 28 a 90 días de la mezcla 50/50 y el paralelismo que existe en el comportamiento entre las mezclas 70/30 y 100/0 que aumentan más entre 7 y 28 días que entre 28 y 90 días.

A la vista de los buenos resultados obtenidos se decidió completar el estudio con probetas con 8 y 10% de cemento para las mezclas 70/30 y 50/50 y romperlas a 28 días .

Tabla 3.3.- Resistencia, con respecto % de cemento.

Mezcla	12% cemento	10% cemento	8%cemento
100/0	2.75		
70/30	3.28	2.63	1.91
50/50	3.89	3.14	2.55

Para 100/0 son los datos anteriores al 12% de cemento, estos resultados muestran como ya era de prever la mayor lentitud del aporte de resistencia de la escoria, a la vez que la posible optimización del contenido de cemento a la baja si se apunta a los 2.5 – 2.8 MPa que parecen el mínimo necesario para un tráfico agrícola pesado, superaban el 2.5 MPa, la mezcla 100/0 con el 12% de cemento, la mezcla 70/30 con el 10% de cemento y la mezcla 50/50 con el 8% de cemento. Se preparan 15 nuevas probetas con dichas proporciones y se rompieron a los 7, 28, 90, 120 días y 6 meses.

Tabla 3.4.- Resistencia – Cemento – Tiempo.

Mezcla-cemento.		7días	28días	90días	120días	6meses
100/0	12%	2.0	2.75	3.21	3.45	3.46
70/30	10%	1.655	2.63	2.75	3.82	4.29
50/50	8%	1.935	2.55	3.54	4.11	4.13

En cualquier caso, podemos observar que la dosificación de cemento y escoria puede adaptarse a las necesidades de resistencia de cualquier proyecto con suelo-cemento, siendo muy positiva la aportación de la escoria.

El principal problema de la escoria cuando se utiliza en una matriz de hormigón es su carácter expansivo, en el caso de la escorias de una empresa en concreto es moderadamente expansivo por causa del contenido de MgO que aunque es bajo, basta para crear problemas en el hormigón. Interesaba comprobar si la expansión era tolerable en el sistema suelo-escoria-cemento dado el distinto nivel de huecos y de rigidez.

El ensayo de expansión potencial ASTM D 4792-88, se ha trabajado con dos mezclas, 100/0 y 50/50, y 12% de cemento en cada una de ellas, para poder comparar mejor los valores de la expansión sufrida. En este ensayo, el procedimiento de las probetas es el mismo que para el CBR, una vez confeccionados se sumergen en agua a 70°C y se mantienen en estas condiciones 7 días, como en el CBR se lastran con una sobrecarga de 4.45Kg, el hinchamiento se calcula por diferencia de lecturas y se expresa en porcentaje respecto a la altura de la muestra de 127mm.

$$\text{Hinchamiento (\%)} = (L \text{ final} - L \text{ inicial}) / 127 \times 100$$

Para el ensayo de humedad sequedad NLT – 302/96, se han preparado dos probetas de cada una de las tres mezclas con el 12% de cemento, tras la fabricación se mantuvieron 7 días en la cámara húmeda tras los cuales se pesan y miden, se someten a 12 ciclos de 5 horas en agua a 20°C y 42 horas en estufa a 70 – 73°C, cada ciclo tiene pues 48 horas, al final de cada ciclo se pesan y miden, se cepillaron con un cepillo de púas metálicas y se vuelven a pesar. Finalizados los 12 ciclos se secan a

110 -115°C en estufa hasta peso constante y se determinan su medidas y su peso, la pérdida de peso admisible es del 7% para un suelo arcilloso. (Kcraemer et al, 2001).

CAPITULO 4. FIRMES CON CAPAS DE MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO

4.1. Introducción

Se conoce como capas de materiales tratados con cemento aquellas capas de firme que utilizan cemento como conglomerante para lograr unas determinadas prestaciones y un mayor módulo de elasticidad. Se dosifican de manera que resulte un material de consistencia seca, apto para ser compactado con rodillo, y que cumpla unas determinadas características como una resistencia mínima a una cierta edad.

A los firmes compuestos por una o dos capas de materiales tratados con cemento sobre las que se disponen capas superiores bituminosas se les denomina firmes semirrígidos. En estos firmes, las bases tratadas con cemento son las que fundamentalmente aportan la capacidad estructural al firme, mientras que el pavimento bituminoso proporciona las características superficiales de rodadura cómoda y segura y cierta impermeabilidad.

Las bases tratadas con cemento son sin duda la mejor alternativa en cuanto a capacidad estructural y prestaciones por las ventajas que aportan al firme. Se obtiene una elevada capacidad estructural del firme por un reducido coste. Bajo la acción de las cargas de los vehículos, las bases tratadas con cemento trabajan a flexión, como una losa, disminuyendo y uniformizando muy apreciablemente las tensiones y deflexiones que originan dichas cargas. Por lo tanto, los esfuerzos y deformaciones que se producen en la explanada y, en su caso, en las capas inferiores del firme, son también muy reducidos. Como consecuencia, el empleo de bases tratadas con cemento permite reducir los espesores del firme o aumentar su vida de servicio, lo que les hace muy interesantes desde los puntos de vista técnico y económico.

La fabricación de capas de materiales tratadas con cemento son unidades de obra enfocadas a optimizar el empleo de los suelos, áridos y cementos locales, lográndose una técnica muy sostenible, cuyas ventajas se resumen en las siguientes:

Ventajas medioambientales:

- Permite utilizar una amplia variedad de suelos, áridos y cementos locales que ningún otro tipo de capa de firmes permite utilizar, reduciendo el volumen de mezclas bituminosas necesarias y, con ello, la necesidad de áridos de calidad.
- Son completamente reciclables y reutilizables al final de su vida útil.

- Permite utilizar áridos reciclados en su totalidad.
- Es una técnica en frío con reducido consumo de energía.

Ventajas técnicas:

- Excelente capacidad estructural y elevada vida de servicio.
- Las tracciones que sufren las capas bituminosas superiores se ven muy reducidas, alargando considerablemente en el tiempo su fatiga siempre que estén adecuadamente adheridas entre si y a la base tratada con cemento.
- Las deformaciones de la explanada originadas por las cargas de tráfico son muy reducidas (Fig. 4.2), por lo que se reduce la posibilidad de asientos y descompactaciones en la misma.

Ventajas económicas:

- Costes de construcción considerablemente inferiores a los de otros tipos de firmes con mezclas bituminosas en caliente para todo tipo de tráfico.
- Posibilidad de utilización de suelos, áridos y cementos locales.
- Reducción importante del volumen de mezclas bituminosas, que siempre resultan de elevado coste.
- Posibilidad de empleo en su construcción de equipos (entendedoras, rodillos, etc.) usuales en otras unidades de obra (Fig. 4.1) como el extendido de mezclas bituminosas o zahorras artificiales.



Figura 4.1 - Puesta en obra extendido de suelocemento con extendedora
(Guía Técnica, 2014).

- Posibilidad de construcción por empresas locales que ejecutan con calidad las bases tratadas con cemento.
- Inmejorable relación coste/valor en cuanto a capacidad estructural.



Figura 4.2- Diferencia entre tensiones distribuidas a la explanada por capas granulares y tratadas con cemento (Guía Técnica, 2014).

4.2. Clasificación de los materiales tratados con cemento

La adición de cemento a un material granular tiene como objetivo principal dotarle de cohesión para mejorar sus propiedades mecánicas y su durabilidad. Incluso con contenidos moderados de cemento, se logra que el módulo de elasticidad del material granular aumente de forma notable, lo que se traduce en un mayor módulo de elasticidad de las capas. Los materiales tratados con cemento abarcan una serie de unidades de obra que se diferencian en función de las características del material granular utilizado y/o de los porcentajes de cemento añadidos a la mezcla. Dentro de los mismos se pueden encontrar desde suelocemento, con una resistencia a compresión a largo plazo del orden de 4 MPa y un módulo de elasticidad desde 5.000 MPa, hasta hormigones compactados con una resistencia a compresión a largo plazo superior a 35 MPa y un módulo de elasticidad del orden de 33.000 MPa.

En la Figura 4.3, se esquematizan los diferentes materiales tratados en la normativa española según sus características resistentes.

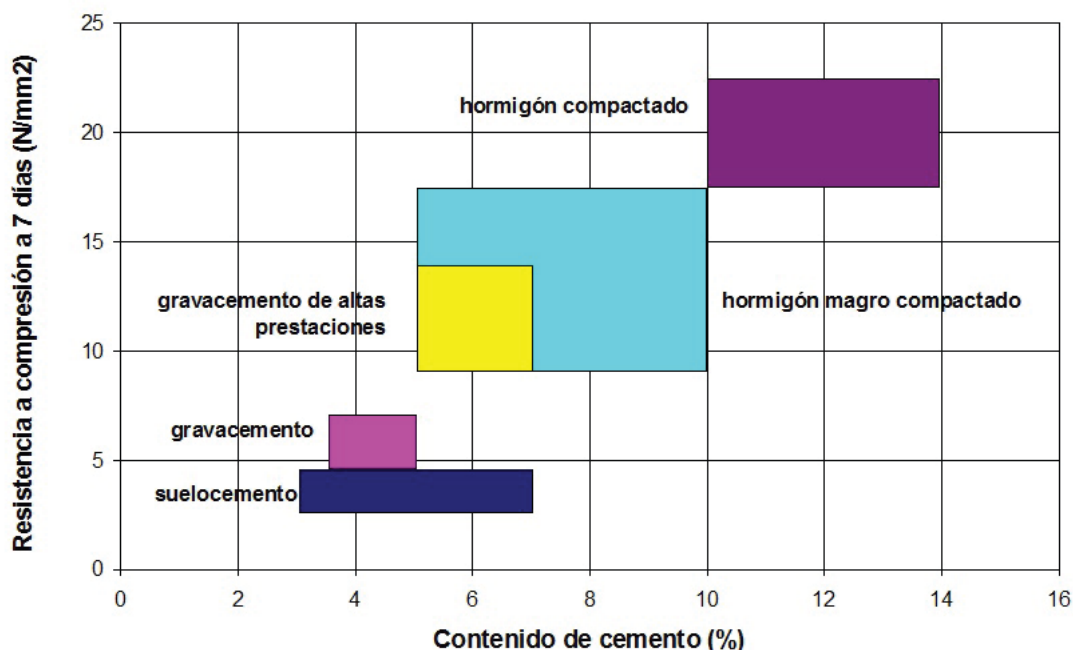


Figura 4.3 - Clasificación de los materiales tratados con cemento (Guía Técnica, 2014).

Desde el punto de vista estructural, las bases tratadas con cemento se pueden clasificar por su resistencia (a compresión o tracción) y por su módulo de elasticidad.

Suelocemento (SC)

Se trata de un material fabricado con suelos granulares o áridos (Fig. 4.4), cuyo contenido en cemento en masa suele variar entre el 3 y el 7%. La resistencia mínima a compresión exigida a la edad de 7 días es 2,5 MPa de acuerdo con la normativa española. A largo plazo, su resistencia a compresión suele ser superior a 4 MPa, y su módulo de elasticidad puede variar desde valores del orden de 5.000 MPa en el caso de emplear suelos arenosos, hasta valores superiores a 12.000 MPa si se emplean zahorras. Su aplicación suele ser como capa de apoyo (subbase) de otros materiales tratados con cemento, o bien como capa resistente (base inferior) bajo capas bituminosas.

En España hay ya una amplia experiencia en su utilización como base y subbase desde los años 70, con resultados muy positivos. Se fabrica normalmente en central, aunque se puede ejecutar *in situ* con equipos similares a los empleados en estabilización de explanadas o en el reciclado de firmes con cemento (“la realización de un suelocemento *in situ*”).

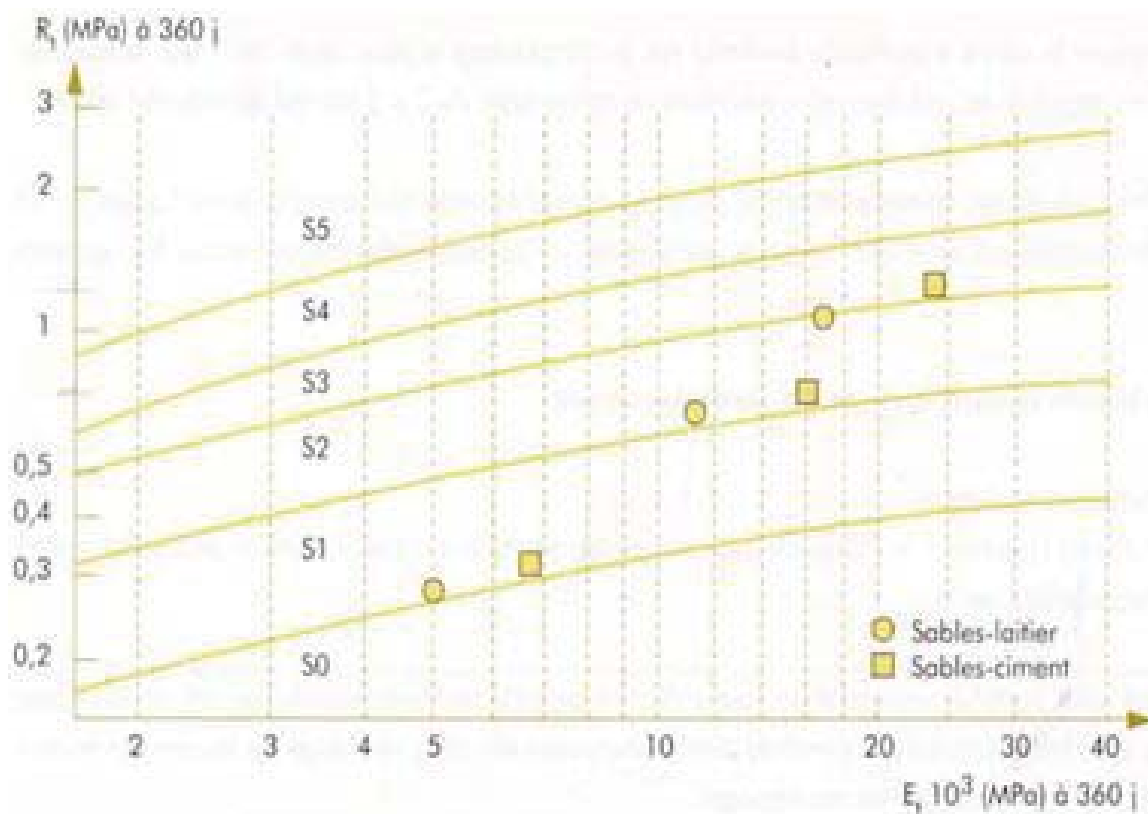


Figura 4.4 - Clasificación Francesa de las diferentes categorías de suelocemento (Guía Técnica, 2014).

Tabla 4.1- Clasificación española de suelocemento.

Tipo SC	Resistencia a compresión (MPa)		Módulo de elasticidad (MPa)
	Rc 7 días	Rc A largo plazo	A largo plazo
SC 1	2.1 - 2.5 - 3.0	4.5	7000
SC 2	4.0 - 5.0 - 6.0	8.5	16000
SC 3	6.0 - 7.0 - 8.0	12.0	23000

Los valores de resistencia a compresión y módulos de elasticidad en MPa (Tabla 4.1), deben considerarse únicamente con órdenes de magnitud (Guía Técnica, 2014).



Figura 4.5- Testigos extraídos de un firme con base de suelocemento (Guía Técnica, 2014).

Aunque en la normativa española todos los tipos de suelocemento se engloban en una misma categoría, en la normativa francesa (Fig. 4.4) se realiza la clasificación en función de su resistencia a tracción y su módulo de elasticidad a largo plazo (el suelocemento español se englobaría en los grupos S1 o S2, de la fig. 4.4). En la fig. 4.5 podemos ver unos testigos extraídos de un firme con base de suelocemento.

Gravacemento (GC)

Se trata de un material constituido por áridos de machaqueo, con una granulometría ajustada sin finos plásticos, y un contenido de cemento que varía entre el 3,5 y el 5%, cuya fabricación se realiza en central (Fig. 4.6).

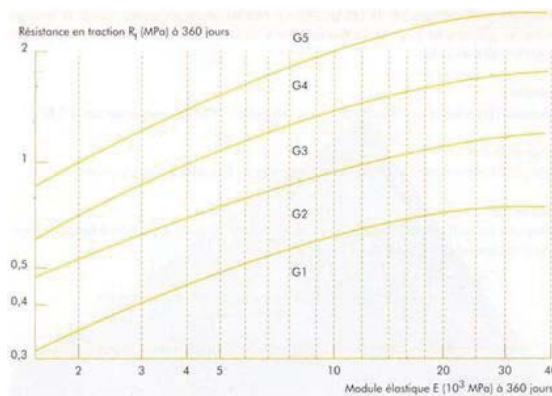


Figura 4.6- Clasificación francesa de las diferentes categorías de gravacemento.

Tabla 4.2- Clasificación española de gravacemento.

Tipo GC	Resistencia a compresión (MPa)		Módulo de elasticidad (MPa)
	Rc 7 días	Rc A largo plazo	A largo plazo
GC 2	3.8 – 4.5 – 5.5	8.0	20000
GC 3	6.0 – 7.0 – 8.5	12.0	25000
GC 4	9.0 – 11.5 – 14.0	20.0	28000

La resistencia mínima a compresión exigida a la edad de 7 días es 4,5 MPa de acuerdo con la normativa española (Tabla 4.2). A largo plazo, su resistencia a compresión suele ser superior a 8 MPa y su módulo de elasticidad es del orden de 20.000 MPa. Con mayores resistencias y dotaciones de cemento entre el 5 y el 7%, se diferencian las denominadas gravacemento de altas prestaciones.

Ambas se emplean como capa de base bajo pavimentos bituminosos. Igual que en el suelocemento, en la normativa española solo se considera una tipología de gravacemento, pero en la normativa francesa (Fig. 4.6) se realiza la clasificación en función de su resistencia a tracción y su módulo de elasticidad a largo plazo (la gravacemento española (Tabla 4.2) se englobaría en los grupos G2 o G3).

Hormigón compactado

Se trata de un material fabricado en central de características muy similares a las de la gravacemento con la particularidad de que se utilizan áridos de mayor calidad, que

deben cumplir las prescripciones exigidas para su utilización en hormigón estructural, y el contenido en cemento es algo superior (Fig. 4.7). Este varía entre el 4% y el 10% en el caso del denominado hormigón magro compactado y entre el 10% y el 14% en el hormigón compactado (Tabla 4.3). Se emplea fundamentalmente como capa de base, aunque en algunas vías de baja intensidad de tráfico se utiliza como pavimento de rodadura (Tabla 4.3). (Guía Técnica, 2014)

Tabla 4.3 - Clasificación española de hormigón compactado.

Tipo HC	Resistencia a compresión (MPa)		Módulo de elasticidad (MPa)
	Rc 7 días	Rc A largo plazo	A largo plazo
HC 3	6.0 – 7.0 – 8.5	12.0	25000
HC 4	9.0 – 11.5 – 14.0	20.0	28000
HC 5	14.0 – 17.5 – 21.0	30.0	30000



Figura 4.7 - Construcción de una base con material tratado con cemento.

4.3. Firmes semirrígidos

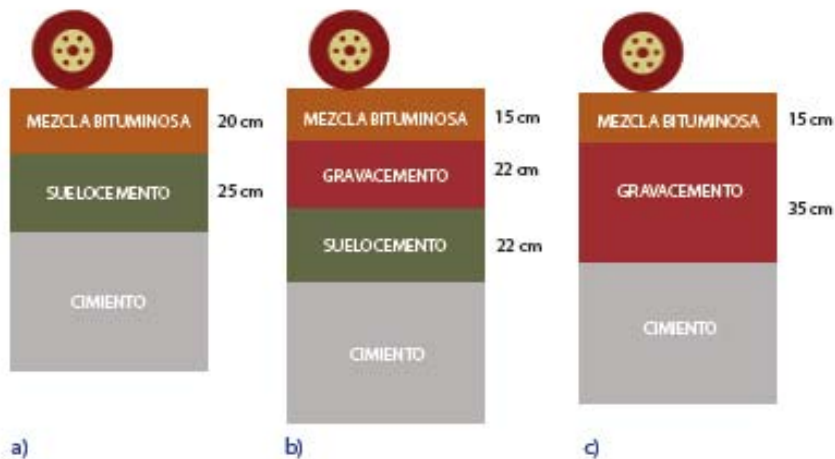
Los firmes semirrígidos son constituidos por los siguientes materiales:

- Mezclas bituminosas en caliente, en una o varias capas. Aportan principalmente las características funcionales de rodadura, si bien también colaboran en las estructurales.

- Materiales tratados con cemento, en capas de base y/o subbase, con las funciones resistentes típicas de estas capas.

Normalmente se han venido utilizando tres tipos de firmes semirrígidos (Fig. 4.8):

- Se suele disponer una sola capa de suelocemento. En estos casos la mezcla bituminosa, que para tráficos pesados muy intensos tiene un espesor importante, comparte el papel estructural con la capa tratada con cemento. Los materiales tratados con cemento son los responsables de la función resistente.



Tipos de firmes semirrígidos: a) con base de suelocemento; b) con base de gravacemento; c) base de gravacemento de elevado espesor (espesores orientativos para tráfico pesado o intenso)

Figura 4.8 - Tipos de firmes semirrígidos (Guía Técnica, 2014).

b) Generalmente se disponen dos capas de estos materiales, aunque con tráficos medios o bajos se puede reducir a una capa única, especialmente cuando se dispone de un buen apoyo. La inferior suele ser de suelocemento y la superior de gravacemento u hormigón compactado. El pavimento de mezcla bituminosa suele tener un espesor relativamente pequeño y su función es la de dotar al firme de una rodadura cómoda y segura y de cierta impermeabilidad.

c) Se dispone una sola capa de gravacemento de 30-35 cm de espesor encargada de soportar todas las cargas del tráfico, que transmite al resto unas tensiones y deformaciones reducidas. El pavimento bituminoso suele tener un espesor reducido entre 10-15 cm.

Los espesores de las capas varían en función del tráfico al que vaya a estar sometido el firme, de la explanada sobre la que se disponga y del tipo de firme semirrígido de que se trate. Como intervalos de variación de los mismos se pueden indicar los siguientes:

- mezclas bituminosas en caliente: 5 a 25 cm en una o varias capas (en firmes de baja intensidad de tráfico pueden sustituirse por tratamientos superficiales con gravilla);
- suelocemento: 20 a 35 cm;
- gravacemento, gravacemento de altas prestaciones y hormigones compactados: 18 a 35 cm en una sola capa (o dos capas perfectamente adheridas).

A igualdad de tráfico pesado de proyecto, los mayores espesores de mezclas bituminosas corresponden a aquellos firmes en los que la única capa de material tratado con cemento es de suelocemento. Sobre bases de gravacemento o de otros materiales de mayor resistencia se disponen espesores de mezcla bituminosa menores que los anteriores, pero en cualquier caso superiores a los estrictamente necesarios desde un punto de vista estructural con el objeto de evitar o retrasar en lo posible la reflexión de las fisuras de retracción sobre la capa de rodadura. Las técnicas de prefiguración en fresco, permiten disminuir estos espesores con respecto a los que han sido habituales en este tipo de firmes.

4.3.1. Características de los materiales granulares para la fabricación de suelocemento.

En todos los países se dispone de normativa que recoge este tipo de secciones semirrígidas. En España, además de diversas normas autonómicas, existe la norma 6.1-IC (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1989), Secciones de Firmes, y el artículo 513, Suelocemento y Gravacemento del Pliego General PG-3 (Ministerio de Fomento, 2004), todas estas normas del Ministerio de Fomento.

Las características de los materiales que se consideran más importantes son:

Suelo - En la fabricación de suelocemento se pueden utilizar prácticamente todos los tipos de suelos, siempre que se alcancen las resistencias exigidas y no se encuentren sustancias perniciosas que modifiquen las características, estabilidad y durabilidad del material, realizando las juntas necesarias (Fig. 4.9). En general, se preferirán suelos granulares o áridos, pudiéndose emplear residuos de demolición u otros subproductos industriales.



Figura 4.9 - Prefisuración de una capa de material tratado con cemento (Sistema Craft).

Para definir los diferentes tipos de suelos se suelen utilizar sistemas de clasificación basados en su granulometría y plasticidad. Respecto a la granulometría, hay tres aspectos que conviene considerar:

- el tamaño máximo de las partículas del suelo;
- el contenido de finos, entendido como el porcentaje que pasa por el tamiz 0,063 mm UNE;
- la continuidad y forma de la curva granulométrica.

En la Tabla 4.4, se presenta una explicación de los motivos y recomendaciones sobre las características que deben cumplir los suelos para que resulte un material con unas características técnicas adecuadas y económicamente admisibles.

En la normativa española del Ministerio (en el artículo 513 del Pliego General PG-3), aunque no en las normativas autonómicas, se definen dos husos: el SC40 (con un tamaño máximo entre 40 y 12,5 mm) para utilizar en calzadas con tráficos pesados o

medios, y el SC20 (con un tamaño máximo entre 20 y 2 mm) para tráfico ligero y arcenes.

Los suelos que no cumplan los criterios señalados se pueden mejorar mediante cribado o mezclado con los materiales convenientes. Por ejemplo, en el caso de arenas muy limpias de granulometría uniforme con una cantidad insuficiente de finos, puede ser conveniente su mezclado con un suelo con un cierto exceso de finos e incluso, con un poco de plasticidad.

Tabla 4.4 - Características recomendables de los materiales granulares para la fabricación de suelocemento (Normativa Ministerio de Fomento EHE, 2002).

CARACTERÍSTICA	LIMITACIÓN	OBJETIVO DE LA LIMITACIÓN
Máximo % de finos (tamiz 0,063 UNE-EN 933-2)	35%	Mejorar estabilidad del esqueleto mineral. Evitar altos contenidos de cemento.
Mínimo % de finos (tamiz 0,063 UNE-EN 933-2)	2%	Evitar dificultades en la compactación. Evitar altos contenidos de cemento.
Tamaño máximo del árido (tamiz UNE-EN 933-2)	20-40 mm*	Mejorar regularidad superficial. Evitar segregaciones. Evitar dificultades de compactación.
Continuidad granulométrica (UNE-EN 933-1)	Huso	Mejorar la compactación. Disminuir el contenido de cemento necesario.
Plasticidad máxima (UNE 103103 y 103104)	IP < 12 LL < 30	Evitar problemas durante el mezclado y extendido del material. Evitar altos contenidos de cemento, Disminuir la sensibilidad del material al agua.
Materia orgánica máxima (método del permanganato potásico) (UNE-EN 103204)	1%	Evitar retraso o falta de fraguado y endurecimiento del material.
Sulfatos solubles Máximo (UNE-EN 1744-1)	Total ≤ 1% Solubles en ácido ≤ 0,8%	Evitar reacciones expansivas. Evitar pérdidas de resistencia del material.
Reactividad del material granular (UNE 146508, UNE 146507-2 EX y UNE 146509 EX)	Realizar estudio petrográfico del árido y si hay posible reactividad realizar ensayos acelerados sobre mortero y sobre prismas de hormigón: expansión inferior a 0,04%	Evitar expansiones y roturas por reacción árido-álcali.

Áridos - Los áridos empleados deben proceder de la trituración de piedras de cantera o gravera (Fig. 4.10), tener buena calidad, y presentar una granulometría ajustada a un huso (Fig. 4.11), especialmente para un empleo en gravacemento u hormigón compactado, donde se deben conseguir resistencias apreciables con limitados contenidos de cemento. Asimismo, se pueden emplear áridos, subproductos industriales

y mineros estables o áridos reciclados. En España hay experiencias o tramos experimentales contruidos con materiales reciclados de firmes, materiales reciclados de residuos de construcción y demolición de la construcción, estériles de mina de carbón o escorias de horno alto.

En la Tabla 4.5 se incluyen las características recomendadas que deben cumplir los áridos, para que al mezclarlos con cemento resulte un material con unas características técnicas adecuadas y económicamente admisibles. No obstante, se tiene conocimiento del buen comportamiento de materiales tratados con cemento con contenidos de estas sustancias algo superiores a los propuestos. Una buena práctica, si se superan estos valores, consiste en comprobar el efecto del agua sobre la resistencia a la cohesión de las mezclas, mediante el ensayo de inmersión - compresión (NLT-312).

En la normativa española, para la gravacemento se definen dos husos, el GC20 (con un tamaño máximo de 20 o 32 mm) para utilizar en bases de calzada con tráfico pesados o medios, y el GC32 (con un tamaño máximo de 20, 32 o 40 mm) para bases con tráfico ligeros, subbases o arcenes. Para el hormigón compactado también se define el huso HC20 (con un tamaño máximo de 20 mm para cuando no haya riesgo de segregación) y el HC16 (con un tamaño máximo de 12,5 o 20 mm debido al cambio de tamices según la norma UNE-EN 933- 2).

En la tabla 4.6 se recogen las curvas granulométricas con algunas modificaciones recomendadas.



Figura 4.10 - Gravas con y sin caras de fractura, en la imagen podemos ver cantos rodados y fracturados.

Cemento - El cemento, mezclado íntimamente con el material granular, proporciona a la mezcla la resistencia mecánica exigida y mejora tanto su durabilidad, entendiéndose por

tal la resistencia a los agentes físicos y químicos agresivos, como la estabilidad dimensional. En los materiales tratados con cemento el tipo de conglomerante tiene una importancia menor en comparación con la dosificación del mismo o la densidad alcanzada en la compactación. Es posible utilizar la gran mayoría de los cementos comercializados en España, por lo que en muchos casos su elección dependerá de la disponibilidad y precio de los mismos. No obstante, algunas recomendaciones de tipo práctico pueden mejorar ciertos aspectos. Así los cementos más adecuados para estas unidades de obra son los que presentan las siguientes propiedades:

- Inicio y final de fraguado suficientemente largos, de forma que se tenga un elevado plazo de trabajabilidad.

Tabla 4.5 - Características recomendables de los áridos para la fabricación de gravacemento y hormigón compactado.

CARACTERÍSTICA (Norma)	LIMITACIÓN	OBJETIVO DE LA LIMITACIÓN
Máximo % de finos (tamiz 0,063 UNE-EN 933-2)	7 - 12% ver (1) en Tabla 6	Mejorar estabilidad del esqueleto mineral. Evitar contenidos excesivos de cemento. Evitar dificultades en la compactación.
Mínimo % de finos (tamiz 0,063 UNE-EN 933-2)	3%	Evitar dificultades en la compactación. Evitar pastas de material cementante poco resistentes. Evitar segregaciones superficiales
Tamaño máximo del árido (tamiz UNE-EN 933-2)	20-40 mm*	Evitar dificultades de compactación. Evitar segregaciones. Mejorar regularidad superficial
Continuidad granulométrica (UNE-EN 933-1)	Huso	Lograr un esqueleto mineral estable Facilitar la compactación. Disminuir el contenido de cemento necesario. Aumentar el rozamiento interno de los áridos
Plasticidad del árido fino (UNE 103103 y 103104 UNE-EN 933-8 y 933-9)	Tráfico pesado: No Plástico y EA>35-40* ó EA>30 y VAM<10g/kg Tráfico ligero: LL<25, IP<6	Evitar problemas durante el mezclado y extendido del material. Evitar altos contenidos de cemento, Disminuir la sensibilidad del material al agua y posibles problemas de durabilidad.
Resistencia al desgaste y a la fragmentación: Máximo coeficiente de Los Angeles (tamiz UNE-EN 1097-2)	40 - 30*	Evitar degradaciones durante la compactación. Mejorar el engranaje en juntas y fisuras y la transmisión de cargas entre losas.
Mínimo % de partículas trituradas (UNE-EN 933-5)	70 - 30*	Lograr un esqueleto mineral estable Facilitar cierta capacidad de soporte durante la compactación. Disminuir segregaciones. Aumentar el rozamiento interno de los áridos y la transmisión de esfuerzos entre fisuras
Forma: Máximo índice de lajas y agujas (UNE-EN 933-3)	30 - 35*	Evitar roturas de áridos durante la compactación Permitir la transmisión de esfuerzos entre áridos y las fisuras o juntas de retracción
Materia orgánica máxima (método del permanganato potásico) (UNE-EN 103204)	1%	Evitar retraso o falta de fraguado y endurecimiento del material
Sulfatos solubles Máximo (UNE-EN 1744-1)		Total ≤ 1% Solubles en ácido ≤ 0,8%
Reactividad del material granular (UNE 146508, UNE 146507-2 EX y UNE 146509 EX)	Realizar estudio petrográfico del árido y si hay posible reactividad realizar ensayos acelerados sobre mortero y sobre prismas de hormigón: expansión inferior a 0,04%	Evitar expansiones y roturas por reacción árido-álcali.

- Moderado calor de hidratación, para limitar los efectos de la fisuración por retracción (apertura de fisuras y distancia entre estas), principalmente en épocas calurosas.
- Desarrollo lento de resistencias y módulos de elasticidad a edades tempranas, recuperándolas a largo plazo. Así se consigue limitar el efecto de la retracción y

soportar bien la fatiga inducida por las cargas del tráfico sobre las bases y subbases.

Los cementos que más se aproximan a las cualidades mencionadas anteriormente, son aquellos con mayor contenido de adiciones activas (escorias de horno alto, puzolanas naturales y cenizas volantes, principalmente). En general se debe procurar emplear cementos de resistencia media o baja (clase 32,5 N según norma UNE-EN 197-1 o, en el caso de los cementos especiales ESP, también la 22,5), dejando los de clase superior para situaciones especiales, como puede ser una puesta en obra en tiempo frío. No se deben emplear cementos de aluminato de calcio, ni mezclas de cemento con adiciones que no hayan sido realizadas en la fábrica de cemento.



Figura 4.11- Fracción fina de áridos (según granulometría).

Agua - El agua debe cumplir las prescripciones usualmente fijadas para hormigones y morteros.

Los retardadores de fraguado son aditivos cuya función principal es retrasar el fraguado (principio y final) del cemento, con el consiguiente aumento del plazo de trabajabilidad de la mezcla. Resulta recomendable trabajar con retardadores a cualquier temperatura ambiente, por la flexibilidad que proporcionan a las diferentes operaciones de extendido y compactación. Con temperaturas ambientes altas, por encima de los 30°C, se hace prácticamente imprescindible su uso.

Tabla 4.6 - Granulometrías de la gravacemiento y hormigón compactado (sin incluir el contenido de cemento).

4 TAMIZCES UNE-EN 930,52-2 (mm) 0,063	GRAVACIMIENTO Y GRAVACIMIENTO DE ALTA RESISTENCIA		HORMIGÓN COMPACTADO ⁽¹⁾	
	GC20	GC25	HC16	HC20
40	-	100	-	-
25	100	76-100	-	100
20	80-100	67-91	100	85-100
16	-	-	88-100	75-100
10	-	-	70-87	60-83
8	44-68	38-63	-	-
5	-	-	50-70	42-63
4	28-51 ó 55 ⁽¹⁾	25-48 ó 55 ⁽¹⁾	-	-
2	19-39 ó 45 ⁽¹⁾	16-37 ó 45 ⁽¹⁾	35-50	30-47
0,5	7-22 ó 35 ⁽¹⁾	6-21 ó 35 ⁽¹⁾	18-30 ó 35 ⁽¹⁾	16-27 ó 35 ⁽¹⁾
0,063	1-7 ó 12 ⁽¹⁾	1-7 ó 12 ⁽¹⁾	10-20	9-19

Las emulsiones más adecuadas para el riego de curado son las fluidas y de rotura rápida, con el objeto de poder conseguir un buen reparto con poca dotación y facilitar un sellado rápido de la superficie.

La dosificación de los materiales tratados con cemento se realiza habitualmente mediante el método de compactación Proctor Modificado (Fig. 4.12), (UNE-EN 13286-2) y la resistencia a compresión simple (UNE-EN 13286-41) a la edad de siete días sobre probetas realizadas con la misma maza Proctor (UNE-EN 13286-50) o con martillo vibrante (UNE-EN 13286-51), aunque hay otros sistemas como la mesa vibrante. Con este método se combinan los constituyentes, optimizando el contenido de cemento, de manera que la mezcla cumpla ciertas condiciones físicas (máxima densidad) para alcanzar las resistencias indicadas.

El procedimiento de dosificación consta de las siguientes fases:

1. Caracterización de los materiales que componen el material tratado con cemento, realizando el ajuste de la composición granulométrica.
2. Determinación de la fórmula de trabajo que contendrá:
 - el contenido óptimo de agua y la densidad máxima a alcanzada;
 - la dosificación de cemento;

- la dosificación del retardador de fraguado, en su caso;
 - el plazo de trabajabilidad a la temperatura esperada en obra.
3. Ajuste de la fórmula de trabajo en la central a la vista del extendido y compactación del material.



Figura 4.12 - Compactación Proctor Modificado (Guía Técnica, 2014).

4.3.2. Proceso de fabricación de suelocemento

En el proceso de fabricación se debe conseguir mezclar íntimamente y en las proporciones fijadas el suelo o los áridos con el cemento y el agua y, en su caso, con el retardador de fraguado correspondiente. El proceso debe garantizar además una homogeneidad y regularidad suficientes a lo largo de la obra. Con un mezclado correcto se aprovechan las mejores cualidades de los materiales, y de forma opuesta, cualquier deficiencia en el proceso puede provocar que, partiendo de buenos materiales, se obtenga una mezcla de insuficiente calidad.

Existen centrales con formas y distribuciones diferentes, pero todas están compuestas al menos de los siguientes equipos o procesos:

- almacenamiento de las materias primas,

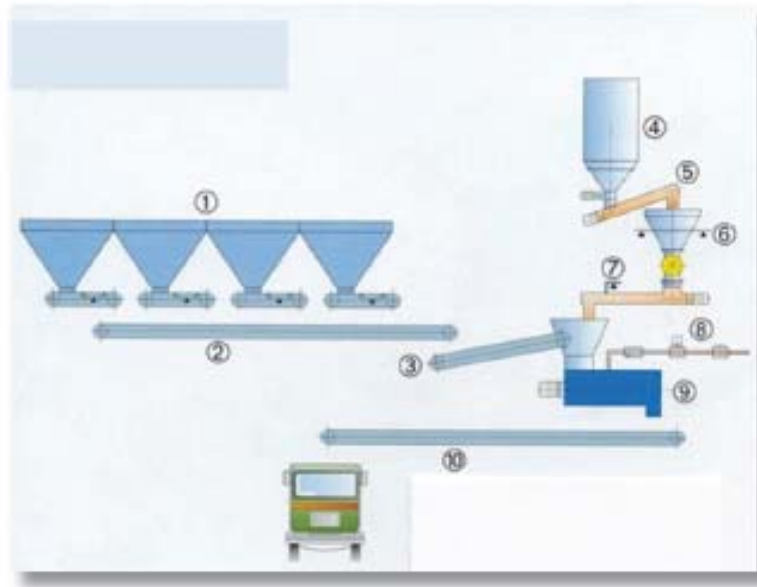
- instalaciones de alimentación y dosificación,
- equipo de amasado,
- sistemas de control de la dosificación.

Centrales continuas - Son aquellas centrales en las que la amasadora no se detiene durante el proceso (no se vacía) y por tanto recibe un caudal continuo de los materiales que integran el producto final (Fig. 4.13). Se emplean en obras de volumen importante en las que se requieren grandes rendimientos (suelocemento y gravacemento) por su mayor relación rendimiento/coste respecto a las discontinuas, aunque conviene estudiar siempre la posibilidad de utilizar centrales de este último tipo por su mayor precisión en la dosificación y calidad en el amasado. Los rendimientos de las centrales continuas varían desde 75 m³/h hasta 300 m³/h.

Las centrales de fabricación continua deben ser de calidad contrastada y no se deben permitir utilizar centrales que dosifiquen de forma volumétrica alguno de los componentes del material tratado con cemento o será necesario un mayor control. El reducido coste que supone adaptar los sistemas de dosificación de las plantas continuas para que estos sean ponderales, no justifica hoy en día seguir empleando los sistemas volumétricos.

La amasadora de una central continua debe de ser el elemento de mayor calidad de la central y se debe prestar especial atención a este elemento fundamental.

Centrales discontinuas - Son aquellas centrales en las que, tras la dosificación de los componentes en las proporciones definidas, se procede al mezclado de los mismos, completándose el ciclo de producción con la descarga del material amasado sobre el elemento de transporte (Fig. 4.14). Una vez esté totalmente vacía la amasadora se inicia un nuevo ciclo. Estas centrales son más precisas en la dosificación y tienen un mejor mezclado de los materiales que las continuas, ya que siempre disponen de sistemas de dosificación ponderal de los áridos y del cemento, y el amasado es mucho más energético logrando una mayor homogeneidad y regularidad de la mezcla. Por eso son las empleadas normalmente en la fabricación de hormigón (con amasadora).



1. Tolvas para suelos, arenas y áridos con cintas pesadoras para cada tamaño de árido y/o arena.
2. Cinta común para la recepción en continuo de los áridos previamente pesados en capas tipo sandwich.
3. Cinta de aproximación para transportar los áridos a la mezcladora.
4. Silo de cemento con sistema que evite la formación de bóvedas.
5. Sinfin para transportar el cemento del silo a la tolva de medición.
6. Tolva de medición ponderal con válvula para controlar el flujo de bajada de cemento al sinfin que controla la cantidad de cemento que entra en la mezcladora.
7. Sinfin con sistema continuo de medida.
8. Sistema de medida del agua y aditivos de alta precisión con posibilidad de corregir en función de la humedad medida en los silos de arena y áridos.
9. Mezcladora en continuo con forro y paletas en buen estado y sistemas de regulación del tiempo de amasado.
10. Cinta transportadora de descarga de la mezcla para transporte a obra.
11. Sistema automático de parada si falta alguno de los componentes y automatización y registro del proceso.

Figura 4.13 - Esquema de todos los elementos que deben formar una planta continúa
(Guía Técnica, 2014).

Al igual que con el resto de unidades de obra para firmes, la ejecución de las capas de materiales tratados con cemento requiere una eficaz organización y control de las diferentes operaciones que conlleva. Para ello, el personal encargado de la ejecución de las obras debe contar con suficiente experiencia.



Figura 4.14 - Central de fabricación discontinua.

El almacenamiento de áridos o suelo se debe realizar con tiempo suficiente antes de comenzar la obra para que al iniciar la fabricación de la mezcla haya un acopio que permita un trabajo continuo de la central. Lo recomendable es tener acopiado como mínimo el volumen de material que se vaya a consumir en una semana de trabajo.



Figura 4.15 - Amasadora de doble eje horizontal.

En la fabricación se debe tratar de obtener un producto de calidad, equilibrando la necesidad de un tiempo de amasado mínimo (Fig. 4.15 y 4.17) que asegure un material homogéneo con la obtención del mayor rendimiento posible para que no se reduzca la productividad del tajo de extendido, y por tanto, del conjunto de la obra. Se debe establecer una adecuada correspondencia entre los medios de fabricación, transporte y

puesta en obra (acopios de áridos Fig. 4.16), de manera que el extendido se realice de manera continua, evitando las paradas.

Por ello, es recomendable utilizar un retardador de fraguado para dar al material suficiente tiempo para el transporte, extendido y compactación y evitar prematuras pérdidas de trabajabilidad.



Figura 4.16 -Acopios de áridos.

Los medios de transporte deben estar siempre adaptados al ritmo de ejecución de la obra. La elección del número de vehículos se debe hacer teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- capacidad de producción de la central,
- distancia desde la central hasta el tajo de puesta en obra,
- rendimiento del equipo de extendido.

Se debe evitar la falta de material para alimentar a la extendedora, ya que genera problemas de regularidad superficial de la capa.



Figura 4.17 - Aspecto del interior de una amasadora de doble eje horizontal forzado.

Los equipos más adecuados para el extendido de este tipo de materiales son las extendedoras (Fig. 3.18), principalmente las de gran poder de precompactación, por las considerables ventajas que ofrecen: mayor precisión en el espesor extendido, mejor regularidad superficial o menor segregación entre otros.

Se debe extender una capa con espesor del orden del 10 al 20% superior al deseado. La reducción de espesor debida a la compactación puede ocasionar problemas de regularidad superficial que se agrava cuando la humedad de compactación se aleja de la óptima. Además, las extendedoras deben trabajar a velocidad constante, evitando cualquier parada que afectara negativamente a la regularidad superficial de la capa. Por ello es necesario compatibilizar su funcionamiento con la producción de la planta y la composición del equipo de transporte.

Las motoniveladoras pueden resultar adecuadas en zonas irregulares o de reducidas dimensiones, así como en ensanches o vías de baja intensidad de tráfico. En otros casos, para asegurar una buena rasante sin depender de la habilidad del maquinista, se deben incorporar sistemas automatizados de guiado por cable o 3D. En ningún caso se debe permitir aportar capas finas (2-6 cm) de material tratado con cemento ya que tiene el grave peligro de no adherirse a la capa de apoyo dejando una capa despegada que puede ocasionar la ruina prematura del firme.



Figura 4.18 – Extendedora de suelo cemento.

Respecto a los sistemas de ejecución, el extendido de una calzada puede realizarse a ancho completo o bien por semianchos. Por otra parte, si el espesor de proyecto no permite compactar en una única capa, la ejecución ha de llevarse a cabo en dos capas, con el mínimo desfase para asegurar la adherencia necesaria entre ambas (caso de algunas secciones de suelocemento empleadas en Castilla y León y de gravacemento/hormigón compactado de 35 cm de espesor en Vizcaya). Para este caso, es imprescindible utilizar retardador de fraguado y regar la superficie del material antes de extender la segunda capa.

La correcta compactación de cualquier capa de material tratado con cemento tiene una importancia decisiva en la calidad final de todo el firme. Una densidad elevada asegura la obtención de una buena resistencia de la capa, su durabilidad y, por tanto, una mayor vida útil del firme.

Se recomienda que para cualquiera de estos materiales la densidad de la capa no sea inferior al noventa y ocho por ciento (98%) de la densidad máxima Proctor Modificado.

La importancia de la compactación se refleja en la Figuras 4.19 donde perder un 5 puntos porcentuales de la densidad Proctor Modificado puede suponer perder entre el 25 y el 50% de la resistencia obtenida con las probetas fabricadas al 98% de la densidad

máxima del Proctor Modificado, lo que se traduce en reducir un 60% la resistencia a la fatiga de la sección. En general, con espesores de capa inferiores a 35 cm, el material se compacta en una sola tongada. Para ello se han de disponer equipos de compactación capaces de conseguir la densidad y la calidad de acabado especificadas, dentro del plazo de trabajabilidad del material. Una vez terminada la compactación de una tongada no debe realizarse ningún recrecimiento de la misma.

Se deben utilizar rodillos metálicos vibratorios con un peso estático mínimo de 10 ton, siendo más recomendables los de 15 ton o más toneladas. Los rodillos pesados, con una carga estática de 350 a 450 N/cm de generatriz, resultan adecuados para capas de 20-30 cm de espesor, empleándose los muy pesados, con más de 450 N/cm de generatriz, para capas de más de 30 cm de espesor. Además se pueden emplear compactadores de neumáticos para cerrar la superficie del material compactado.

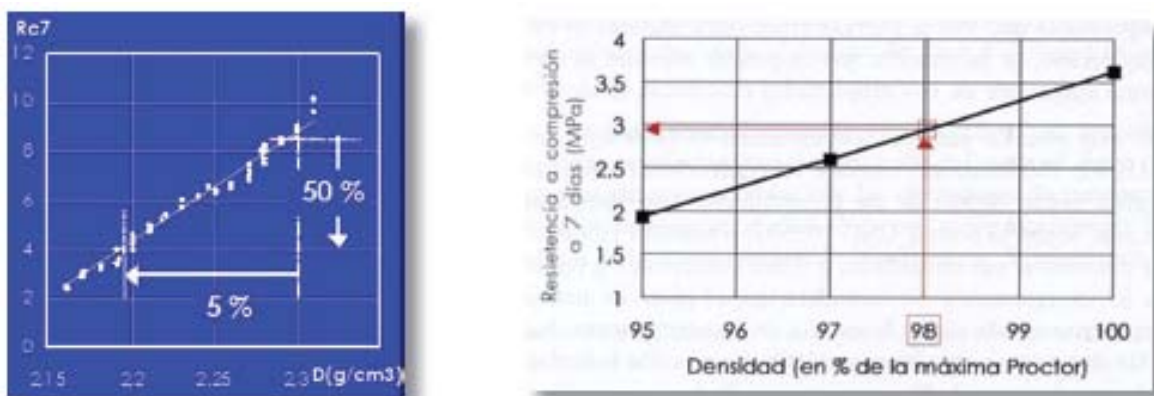


Figura 4.19 - Variación de la resistencia a compresión con la densidad de compactación (Guía Técnica, 2014).

A pesar de los necesarios equipos auxiliares que van surgiendo en el mercado como los compactómetros, es muy importante mentalizar adecuadamente a los maquinistas de la importancia de su trabajo, pues la monotonía del mismo puede llevar a reducir el número de pasadas, con la consiguiente falta de compactación de algunas zonas.

Además de la prefisuración en su caso de las juntas longitudinales y transversales, hay que realizar juntas de trabajo transversales al final de cada jornada, o cuando la obra se interrumpa más allá del plazo de trabajabilidad del material. Estas se deben compactar adecuadamente y hay que dejar una cuna de material para permitir la salida de los equipos de compactación, pero cuando se continúe con el extendido, la junta debe quedar perfectamente vertical, para lo que suele serrarse transversalmente en todo su

espesor y se elimina la cuna (los bordes de junta inclinados constituyen puntos débiles y pueden dar lugar al cabalgamiento de las losas).



Figura 4.20 - Compactación de capa de suelocemento.

La operación de curado se realiza con el fin de evitar la evaporación del agua y permitir el correcto fraguado del material tratado con cemento (Fig. 4.21), después de la compactación y cerrado de la capa (Fig. 4.20). Un curado inadecuado hace que la zona superficial de la capa se debilite, con los consiguientes problemas estructurales y de adherencia entre capas. Para curar la capa se suele regar la superficie con una emulsión bituminosa anionicas (EAR-1) o cationicas (ECR-1) con una dotación no inferior a 600 g/m^2 , lo que aproximadamente equivale a 300 g/m^2 de betún residual.

La aplicación del riego de curado debe realizarse con camión cisterna regador dotado de rampa de distribución, control de la velocidad y dispositivos automáticos de ajuste de la altura e inclinación de la rampa, de la anchura de riego y de la dotación de ligante. Lo ideal es que la operación de curado se realice inmediatamente después de acabar la compactación, y en todo caso antes de transcurrir tres horas, manteniendo mientras tanto húmeda la superficie de la capa. También se pueden emplear otros productos de curado en los pavimentos vistos de hormigón compactado y la difusión constante de agua o plásticos de cobertura en caminos rurales o pequeñas superficies.



Figura 4.21 - Riego de curado camión con barra regadora horizontal.

Con la ejecución del tramo de prueba se persigue un doble objetivo: por una parte, comprobar que el material se puede fabricar de acuerdo con la fórmula de trabajo; y por otra, fijar la forma de actuación de los equipos, y especialmente, el plan de compactación (no pasadas rodillos, modo de empleo, etc.).

El tramo se debe realizar con suficiente tiempo de antelación al inicio de la extensión de la capa, y en las mismas condiciones a las que se vayan a dar en la obra, especialmente en lo relativo a la capa de apoyo. La longitud más adecuada es de unos 150 m, pero en ningún caso debe ser inferior a 50 m.

En la Tabla 4.7, se resumen las comprobaciones que hay que realizar durante esta fase.

Si en el tramo de prueba, la mayor densidad obtenida es menor que la definida en la fórmula de trabajo y esta no se consigue tras las correcciones introducidas (cambio de los parámetros de compactación o del mismo equipo, comprobación de la densidad de referencia y del plazo de trabajabilidad, ...), se debe exigir en toda la obra, la densidad máxima obtenida en el tramo de prueba y realizar las probetas del ensayo a rotura con esta misma densidad. Esto exigirá, en general, un pequeño aumento de la dosificación de cemento para obtener la resistencia especificada. Además es conveniente la extracción de testigos a los 7 días (a los 15 días en épocas frías) que sirvan de referencia posterior de la resistencia del material.

Tabla 4.7.- Comprobaciones que se suelen realizar en el tramo de prueba.

FASE DEL PROCESO	COMPROBACIONES A REALIZAR
Fabricación	Obtención de resistencias a 7 días Ensayo de homogeneidad del producto Funcionamiento de la planta y equipos de transporte
Extendido	Obtención de rasantes Nivel de precompactación alcanzada Velocidad de avance del equipo de extendido
Compactación	Plan de compactación Humedad y obtención de la densidad de referencia Resistencia a 7 días (si no se ha comprobado previamente)

En la Fig. 4.22, podemos ver la comprobación de densidad alcanzada, en la Fig. 4.23, la ejecución de probetas con martillo.

La fisuración por retracción y cambios volumétricos debidos a gradientes térmicos es una característica inherente a las capas de materiales tratados con cemento. La aparición de estas fisuras reflejadas en la superficie bituminosa es posible evitarla, mediante la disposición de juntas a distancias próximas que permitan losas suficientemente cortas a fin de minimizar los movimientos, tanto verticales, como horizontales. La prefisuración consiste en la ejecución de estas juntas en fresco mediante la creación de entallas, con o sin inclusión de algún elemento en las mismas, a distancias cortas de unos 2 a 3 m (Fig. 4.24), antes de la compactación del material tratado con cemento y es, sin duda, la técnica más eficiente para impedir la reflexión de las fisuras en la superficie.

Los parámetros que influyen en la reflexión y por tanto definen la necesidad de prefisurar son (aparte de otros que se suponen correctos como las condiciones de adherencia de las capas):

- las características de la capa de material tratado con cemento (naturaleza y granulometría de los áridos junto a la naturaleza y contenido de cemento);
- características y espesor de las mezclas bituminosas superiores;
- los factores climáticos;
- la intensidad de tráfico pesado.



Figura 4.22 - Equipo nuclear, medidor de densidad y humedad de la capa.



Figura 4.23 - Martillo vibrante con guías para la compactación de probetas en obra.



Figura 4.24 - Extendido y prefisuración con juntas activas en la AP-8.

En la Tabla 4.8, se incluyen ciertas indicaciones que pueden orientar sobre cuándo prefisurar.

Se desaconseja la creación de juntas por serrado en el material endurecido debido a su coste y a que no asegura una buena transmisión de cargas entre las losas. Por su mayor eficacia, sencillez y economía se recomienda la ejecución de juntas prefisuradas en fresco.

Para la prefisuración se pueden emplear equipos que realizan las entallas en casi todo el espesor de la losa introduciendo algún elemento en el surco realizado que impida el fraguado conjunto de ambos lados de la junta creada (emulsión bituminosa, láminas de plástico flexible o perfiles ondulados de plástico rígido). Se recomienda la utilización de sistemas automatizados (Fig. 4.27), como el Craft (Fig. 4.26) y el de Juntas Activas R (Fig. 4.25), que garantizan suficientemente la calidad en el corte de las juntas y se han utilizado con éxito en España. Los sistemas manuales únicamente se deberían utilizar en carreteras secundarias o en tramos de poca longitud, o bien como recurso de emergencia en caso de que se avería el equipo automático.



Figura 4.25 - Testigo extraído de una junta realizada con el sistema de juntas activas.

Tabla 4.8 - Recomendaciones acerca de la necesidad de prefisurar la capa tratada con cemento.

TRÁFICO Vehículos pesados/día	ZONA CLIMÁTICA	RESISTENCIA A COMPRESIÓN a 7 días	
		< 4 MPa	≥ 4 MPa
≥ 200	CONTINENTAL	Obligatorio ¹⁾	Obligatorio
	LITORAL	Recomendable	Obligatorio
≤ 200	CONTINENTAL	No necesario	Recomendable ²⁾
	LITORAL		

¹⁾ No necesario si el espesor bituminoso es ≥ 18 cm

²⁾ No necesario para intensidades de tráfico pesado al día < 25

Además del control de calidad propio de la construcción, es muy recomendable realizar un control de recepción de las bases tratadas con cemento mediante la extracción de testigos al finalizar la ejecución. En épocas calurosas se deben extraer a los 7 días y en épocas frías a los 15 días. De los testigos se obtendrá su espesor y su resistencia a compresión simple, además de confirmar la calidad de la base tratada realmente ejecutada.



Figura 4.26 - Prefisuración en fresco tipo Craft que introduce un chorro de emulsión.



Figura 4.27- Otros equipos de prefisuración en fresco que introducen un chorro de emulsión.

Para que el firme semirrígido funcione como se ha diseñado, es decir, como un todo con diferentes capas y materiales, es absolutamente imprescindible conseguir una buena adherencia entre las capas del firme. Además, una buena adherencia permite minimizar el número de fisuras reflejadas y la gravedad de las mismas.

Para conseguir una buena adherencia (Fig. 4.29) entre la capa de material tratado con cemento y la mezcla bituminosa en caliente MBC, es imprescindible que la superficie del material tratado presente dos características fundamentales:

- Una superficie sana, es decir, sin áridos o mortero sueltos o fácilmente desprendibles;



Figura 4.28 - Testigos de hormigón compacto – 4% cemento. Autopista del Cantábrico.

- Una superficie limpia, es decir, sin ningún tipo de polvo o materiales sueltos (áridos, trozos de emulsión de curado que se desprendan, etc.), que permita que el riego de adherencia se aplique directamente sobre la superficie sana (con buena resistencia superficial), y actué como puente de unión con las mezclas bituminosas en caliente MBC.

Para conseguir una superficie sana y limpia se consideran imprescindibles las siguientes operaciones:

- Limpieza con agua a presión de la superficie del material tratado con cemento para eliminar todo el polvo y/o partículas finas o muy finas que han quedado después del cepillado o por el paso del tráfico de obra (Fig. 4.30);

- Cepillado enérgico (con púas metálicas) de la superficie del material tratado con cemento para eliminar parte del polvo y otros materiales que pueden quedar en la superficie del material tratado con cemento (Fig. 4.31).



Figura 4.29 - Aspecto superficial de un buen riego de adherencia.

Una vez se haya conseguido una superficie sana y limpia, se aplicara el riego de adherencia mediante una emulsión bituminosa de rotura rápida (Fig. 4.29).



Figura 4.30 - Limpieza con agua a presión.

Para asegurar una mejor adherencia y evitar que los vehículos de transporte de la mezcla bituminosa arrastren la emulsión, se recomienda el empleo de emulsiones termoadherentes que se activan con el calor de la mezcla bituminosa. En una superficie sana, limpia y con un buen riego de adherencia, la mezcla bituminosa en caliente se puede adherir muy bien y esta zona de unión es capaz de soportar los esfuerzos tangenciales que le va a someter el tráfico pesado. **Una mala adherencia implica una ruina prematura del firme construido**, en la Fig. 4.32, vemos el ensayo de compactación de la adherencia entre capas de firme.



Figura 4.31 - Limpieza con barredora.

Las mezclas bituminosas más adecuadas en capas colocadas directamente sobre materiales tratados con cemento son las que disponen de contenidos de betún sobre áridos del orden del 4,7% al 5% y huecos próximos al 4%. Estas mezclas reúnen las características adecuadas en cuanto a amortiguación de la propagación de fisuras, resistencia a las deformaciones plásticas y módulo de rigidez.

En épocas calurosas hay que evitar que las altas temperaturas produzcan la desecación del material durante el transporte, extendido y posteriores operaciones de ejecución. Las medidas que se pueden tomar para reducir estos problemas son:

- utilizar retardadores de fraguado (prácticamente imprescindible);

- añadir la cantidad de agua de amasado necesaria para contrarrestar la evaporación que previsiblemente se pueda producir durante el transporte y el extendido;
- extender el riego de curado lo antes posible y mantener la superficie húmeda hasta su aplicación.

Tampoco es conveniente extender el material en épocas muy frías en las que exista peligro de helada, ya que la ganancia de resistencias es muy débil o inapreciable. Además, no hay que olvidar que el material se está colocando en las condiciones de máxima retracción y al llegar la época de calor, o extender encima la capa de mezcla bituminosa a altas temperaturas, el material puede experimentar unas dilataciones importantes. En estos casos, resulta todavía más necesario prefigurar cada 2-3 m y cortar lo más verticalmente posible las juntas de hormigonado para evitar que se produzcan pandeos o cabalgamientos de unas losas sobre otras.



Figura 4.32 - Ensayo de compactación de la adherencia entre capas (Guía Técnica, 2014).

Con lluvia importante hay que detener los trabajos, puesto que se incrementa considerablemente el contenido de humedad y puede además lavarse la superficie. Sin embargo es aceptable extender el material bajo una ligera llovizna, sin tendencia a aumentar.

4.4. Dimensionamiento de firmes con capas tratadas con cemento

Los métodos de dimensionamiento de firmes se pueden clasificar en empíricos y analíticos (Fig. 3.33) modelos, aunque en la práctica lo más habitual es combinar ambos procedimientos.

Existe una amplia variedad de métodos empíricos. En uno de los extremos se encuentran los basados únicamente en la experiencia del ingeniero y cuya evolución en el tiempo se basa en su periódica revisión al ir acumulando experiencia. En el otro extremo están aquellos otros que son el resultado de una recogida sistemática de datos sobre el comportamiento de los firmes y de una adecuada correlación de las variables de diseño con dicho comportamiento. Un ejemplo muy ilustrativo de este segundo caso son las primeras versiones del método de la AASHTO, basadas en regresiones sobre los datos obtenidos en el ensayo del mismo nombre llevado a cabo entre 1959 y 1961, o algunos de los programas de gestión de firmes.

En los métodos analíticos la respuesta del firme, en forma de tensiones, deformaciones o deflexiones de sus capas, se determina a través del uso de modelos matemáticos denominados modelos de respuesta (Fig. 3.33). Estas respuestas se relacionan con el comportamiento de la estructura del firme mediante modelos de comportamiento o deterioro basados en ensayos de laboratorio o en datos de comportamiento en servicio. La observación de dicho comportamiento es necesaria para diseñar firmes de una

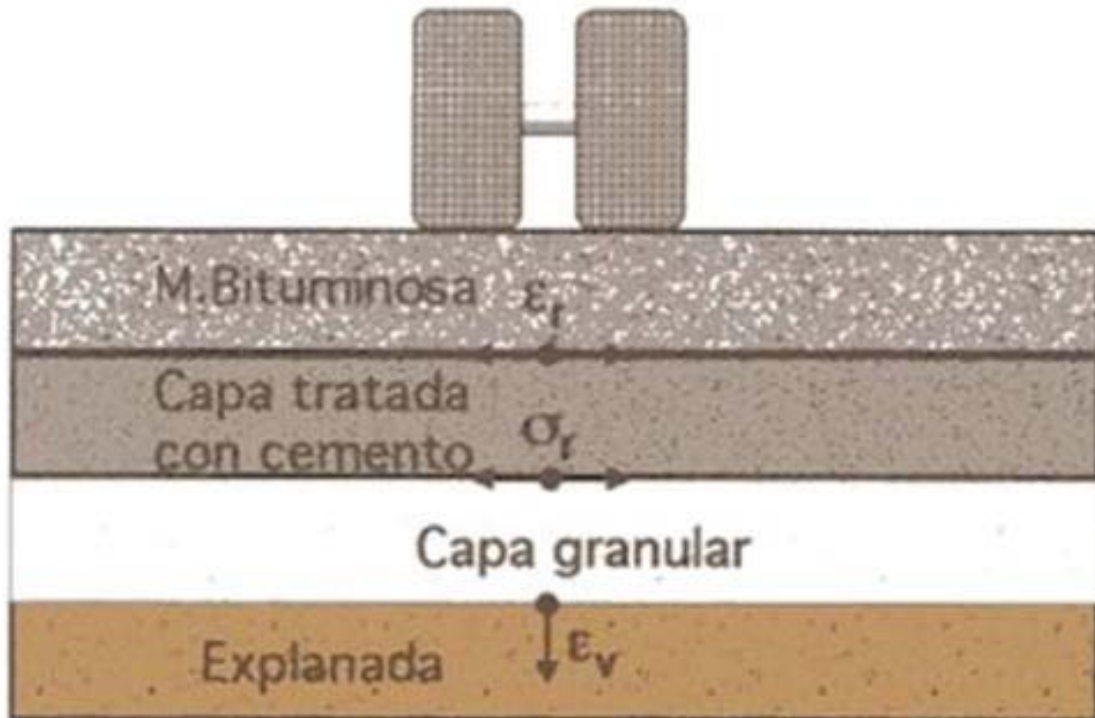


Figura 4.33 - Modelos de respuesta de firmes (Guía Técnica, 2014).

manera realista, extendido (Fig. 4.34). Entre las ventajas potenciales de este método frente a los empíricos se encuentran las siguientes:

- se acomoda a los cambios de los tipos de carga;
- se utilizan mejor los materiales disponibles;
- se pueden incluir nuevos materiales;
- mayor grado de confianza de las predicciones de comportamiento;
- mejora la adaptación a las prácticas de construcción;
- las propiedades de los materiales se relacionan mejor con el comportamiento real del firme;
- se mejora la definición de las propiedades de las capas del firme;
- permite incorporar efectos climáticos y de envejecimiento de materiales.



Figura 4.34 - Extendido de material tratado con cemento.

Sin embargo, en la práctica, su aplicación presenta muchos problemas, debido a la falta de datos sobre las características reales de los materiales (propiedades mecánicas, leyes de fatiga, etc.), y a las carencias profesionales de muchos de los técnicos que los emplean sin ser especialistas en el dimensionamiento de firmes. Por otra parte, estos modelos se deben ajustar de acuerdo con una serie de factores de carácter práctico, como por ejemplo las dispersiones de los materiales y espesores de las capas obtenidos realmente en obra. También hay que tener en cuenta que en la elaboración de los modelos matemáticos son necesarias simplificaciones que, lógicamente, no pueden prever todas las situaciones posibles que se puedan producir en la realidad.

Por los problemas que presentan los métodos analíticos, desde los años 70 en muchos países europeos se ha recurrido al establecimiento de unos catálogos de firmes en cuya elaboración se han tenido en cuenta tanto modelos analíticos como consideraciones empíricas.

En España, el dimensionamiento de firmes mediante catalogo ha sido utilizado desde 1975, disponiendo de una última revisión en el año 2002. Paralelamente, algunas otras Administraciones Regionales han publicado catálogos de firmes, como por ejemplo la Junta de Castilla y León (1996, 2001 y 2004), la Junta de Andalucía (1999 y 2007), el Gobierno Vasco (2006), la Comunidad Valenciana (2009) y el Gobierno de Aragón (2011).

A lo largo de los últimos 50 años se han construido miles de kilómetros de firmes con bases tratadas con cemento en España. Sumando los kilómetros construidos en la Red de Carreteras del Estado y en las Autonómicas se supera ampliamente los 15.000 km de calzada con bases tratadas con cemento (suelocemento y gravacemento). Su empleo abarca todo tipo de viales, como autopistas, autovías, circunvalaciones y carreteras, incluyendo las carreteras secundarias y vías de baja intensidad de tráfico.

Además su aplicación se ha ampliado a otros campos como urbanizaciones, polígonos industriales, puertos o aeropuertos.

Los más de 150 millones de metros cuadrados de calzada construidos con bases tratadas con cemento realizados en toda España dan una idea de la importancia y del valor que aportan este tipo de firmes.

Conclusiones

De todo lo expuesto en este documento sobre las capas de materiales tratados con cemento se puede concluir diciendo que este tipo de capas:

- Tienen una extraordinaria relación coste/valor en cuanto a capacidad estructural.
- Son muy sostenibles pues permite utilizar suelos, áridos y cementos locales reduciendo el volumen de mezclas bituminosas necesarias y, con ello, la necesidad de áridos de calidad.
- Son completamente reciclables y reutilizables.
- Son firmes muy experimentados. En España se han construido más de 150 millones de metros cuadrados, siendo la solución de pavimentación más utilizada.

4.5. Suelocemento *in situ*

El suelo cemento es un material obtenido de la mezcla homogénea de un suelo o material granular, cemento y agua, y eventualmente algún aditivo (como por ejemplo un retardador de fraguado), que convenientemente compactada se utiliza como capa estructural en firmes.

El suelo cemento *in situ* es una técnica de construcción de las capas de suelo cemento en la que, frente a la solución clásica de fabricación en una planta, la mezcla del suelo con el cemento se realiza en el mismo punto de aplicación (Figuras 3.35 a 3.38). Para ello, se utilizan equipos similares a los empleados en estabilización de explanadas (vía

húmeda), fabricándose la lechada de cemento de forma ponderal en un primer equipo dosificador, que inyecta el conglomerante a la cámara del rotor del segundo equipo, en el que se lleva a cabo el amasado.

4.5.1. Ventajas, inconvenientes y contribución a la sostenibilidad

El aprovechamiento de los suelos existentes en su empleo como suelocemento evita el empleo de áridos de calidad, y con ello, la reducción de los recursos naturales disponibles. Se trata de una técnica enfocada claramente a lograr una mayor sostenibilidad, a cuyas ventajas medioambientales y técnicas se suman importantes beneficios económicos.



Figura 4.35 - Suelocemento *in situ* - trabajos maquinaria mezcladora, Wirtgen de picas.

Ventajas medioambientales

Las ventajas del suelocemento, independientemente de que se fabrique en planta o *in situ* (Fig. 4.35), son:

- El empleo de suelos locales o de la traza contribuye a evitar explotar nuevos yacimientos de áridos o a reducir las reservas de los existentes.

- Se disminuye la necesidad de vertederos, al aprovecharse los suelos de la traza.
- Es una técnica en frío que consume poca energía. Se disminuye con ello notablemente la contaminación y las emisiones de vapores nocivos.
- Se trata de una técnica especialmente adaptada al empleo de cementos con alto contenido de adiciones. Esto supone una reducción 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.

A estas ventajas se suman otras debidas específicamente a la realización *in situ*:

- Al limitarse el transporte a una sola operación, en vez de tener que llevar los suelos a la planta y desde esta ultima el suelocemento al punto de puesta en obra, se disminuyen las emisiones de CO₂ y otros contaminantes, se reduce el daño que generan los combustibles y aceites, y desaparecen los impactos colaterales que provoca dicho transporte en los caminos y flora adyacentes (polvo, erosiones y otros), Fig. 4.36, vista después de terminación *in situ*.
- Se reducen los daños que la instalación de una planta de fabricación puede ocasionar al suelo que ocupa y al entorno colindante.



Figura 4.36 - Vista traza después de los trabajos de suelocemento *in situ*.

Ventajas técnicas

Correspondientes a cualquier capa de suelocemento, independientemente del método de fabricación:

- Proporciona una elevada capacidad de soporte al firme, disminuyendo las tensiones que llegan a la explanada y a las capas superiores de mezcla bituminosa. Con ello se aumenta la durabilidad y la vida de servicio de la carretera.
- Se reducen los efectos negativos que sobre el firme tienen los cambios de humedad y las agresiones climáticas. Además se incrementa la resistencia a la helada. Especificas del suelocemento *in situ*, Fig. 4.37 Estabilizadora.



Figura 4.37 - Trabajos maquina estabilizadora Wirtgen.



Figura 4. 38 - Trazado y riego de curado del suelo estabilizado.

- Es posible realizar capas de mayor espesor que en el caso de utilizarse una extendedora de suelocemento.
- Con la realización *in situ* se disminuyen las molestias por el tráfico de obra y los daños a la red de carreteras adyacentes debido a que no se transportan los materiales a una planta de fabricación, ni desde esta a la obra.
- Al no realizarse dicho transporte, se suprime la posibilidad de que el material se puede secar durante el transporte y la extensión en los días de calor. Por otra parte se aumenta el tiempo disponible para llevar a cabo las operaciones de compactación y terminación dentro del plazo de trabajabilidad.
- Se trata de una solución muy adecuada para ensanches de carreteras en los que se prevea además el reciclado *in situ* con cemento del firme existente. En este caso, se debe aportar una zahorra en la caja del ensanche con unas características tales que, tras su mezcla con cemento, el suelocemento resultante tenga unas características resistentes similares a las del firme existente reciclado con la misma dotación de conglomerante. Con ello, es posible realizar cunas de ensanche y modificar el trazado en las curvas por cualquiera de las márgenes, sin necesidad de un ancho mínimo constructivo.

Ventajas económicas

Independientemente del método de fabricación del suelocemento:

- Se reduce el volumen de áridos de calidad a utilizar en la obra y el coste de su transporte.

Específicas del suelocemento *in situ*:

- Se eliminan los costes de instalar una planta de fabricación.
- Se reducen los plazos de ejecución, dado que el suelocemento se realiza con equipos cuyo rendimiento puede ser bastante superior al que es posible conseguir con una planta.
- Es posible programar la obra por fases, sin que ello se traduzca en tener una planta inactiva durante un cierto tiempo.
- Las ventajas técnicas y ambientales citadas también se traducen en beneficios económicos.

Además administrativamente se suprime la necesidad de obtener los permisos medioambientales y del ayuntamiento o del organismo gestor correspondiente para la instalación de una planta de fabricación.

Inconvenientes o limitaciones

- El suelocemento, como todas las capas de materiales tratados con cemento, es muy sensible al espesor, pequeñas variaciones del mismo suponen importantes reducciones en la vida útil del firme (Fig. 4.39). En el caso de realización *in situ*, resulta difícil determinar la profundidad exacta del tratamiento, por lo que se debe prever un sobre espesor que asegure que se obtenga en cualquier punto el espesor mínimo especificado en el proyecto. Además, si la explanada está estabilizada, se debe profundizar unos centímetros en la misma, con el objetivo de que no quede material suelto sin tratar entre ambas capas (situación que no se produce al fabricarse en planta).



Figura 4.39 - Suelos muy plásticos, empleados en la realización de un fallido suelocemento *in situ*.

- La precompactación del material a la salida de la estabilizadora es muy reducida, por lo que el proceso de nivelación para obtener la rasante debe ser más preciso.
- La gran capacidad de los modernos equipos de ejecución *in situ* permite el mezclado de suelos de deficiente calidad con el conglomerante sin que se obtenga en ciertos casos un producto homogéneo y uniforme, y sin que esto sea fácil de detectar sin ensayos numerosos y continuos. Es el caso de suelos muy plásticos que no se deban usar o suelos con terrones de partículas plásticas que son muy difícil de deshacer y distribuir (Fig. 4.39). El control de calidad visual del suelo resulta mucho más complicado.

- No es fácil conocer la cantidad de conglomerante aportado en cada zona o sección. Solo se puede obtener valores medios de consumos por cada cuba de cemento.
- Si alguno de los difusores de la estabilizadora se obstruye y no se detecta el error, se puede estar fabricando una franja de suelocemento sin conglomerante o con un contenido muy pequeño del mismo. Aunque se dosifique algo de lechada por el solape con los conos de distribución de los difusores colindantes, la cantidad de cemento aportada en esa banda es muy inferior a la necesaria.
- Los elevados rendimientos de producción se encuentran en oposición con el plazo necesario para la obtención de los resultados de control marcado por las normas, lo que hace que las reparaciones resulten costosas si, cuando se conocen los resultados, estos no resultan aceptables. Para evitar esta situación, se debe ser generoso en la dotación de cemento asegurando la obtención de buenos resultados.

4.5.2. Materiales y fórmula de trabajo

En el artículo 513 “Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento)” del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3 para obras de carreteras del Ministerio de Fomento (Ministerio de Fomento, 2004), se recogen las características exigidas a los suelos para poder ser utilizados en suelocemento (Tabla. 4.9). Como material granular de partida a mezclar con el conglomerante se pueden emplear zahorras, suelos granulares, subproductos o productos inertes procedentes de desecho, cuyas características deben incluirse en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto.

Tabla 4.9 - Prescripciones de los suelos utilizados para suelocemento.

Propiedad	Pliego PG-3 del M ^o de Fomento Art. 513	Recomendaciones de Castilla y León	Instrucción de Firmes de Andalucía	Norma del País Vasco
Tamaño máximo	< 50 mm	< 50 (40) mm	< 50 mm	< 50 mm
Husos	SC40 y SC20 (1)	--	SC40 y SC20 (= PG3)	= PG3
Pasa # 2 UNE	SC40: entre 17 y 52 %	≥ 20%	> 20%	= PG3
	SC20: entre 36 y 94 %			
Pasa # 0,063 UNE	SC40: entre 2 y 20 %	≤ 35%	SC40: = PG3 SC20: entre 3 y 30 %	= PG3
	SC20: entre 2 y 35%			
Plasticidad	LL<30 IP<15	LL<30 IP<12	LL<30 IP<12 (preferible < 10)	= PG3
Materia orgánica	< 1%	= PG3	Exento	= PG3
Sulfatos (%SO ₂)	< 1% Si > 0,5% cemento SR	= PG3	= PG3	= PG3

(1) granulometrías definidas en el PG-3 para el suelocemento

Cernido ponderal acumulado (% en masa) en tamices UNE-EN 933-2 (mm)										
	50	40	25	20	12,5	8	4	2	0,5	0,063
SC40	100	80-100	67-100	62-100	53-100	45-89	30-65	17-52	5-37	2-20
SC20	-	-	100	92-100	76-100	63-100	48-100	36-94	18-65	2-35



Figura 4.40 - Detalle de suelocemento realizado *in situ*, antes de su compactación y refinado.

El material granular debe estar exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga u otras materias extrañas que puedan afectar a la durabilidad de la capa y no debe ser

susceptible de ningún tipo de meteorización o de alteración física o química, ni de lixiviarse con el agua dando lugar a productos que puedan dañar a estructuras u otras capas del firme. Tampoco deberá tener reactividad potencial con los álcalis del cemento. Prácticamente es posible utilizar la mayoría de los suelos, salvo los que presenten materiales que puedan afectar a la durabilidad del firme. Sin embargo, en algunos casos, ciertas características como una granulometría inadecuada, con ausencia de algunos tamaños intermedios que haga muy difícil su correcta compactación, o una plasticidad excesiva que requiera una dosificación muy elevada de cemento para obtener las resistencias exigidas, pueden hacer económicamente inviable el empleo de un determinado suelo.

Tabla 4.10 - Causas de las prescripciones de los suelos a utilizar en suelocemento.

CARACTERÍSTICA	LIMITACIÓN	CAUSA DE LA LIMITACIÓN
Máx. % de finos	35 %	Obtener un esqueleto mineral de estabilidad adecuada Evitar contenidos excesivos de cemento
Mín. % de finos	3 %	Evitar dificultades en la compactación Evitar contenidos excesivos de cemento
Máx. % arenas 2 mm	65 %	Obtener un esqueleto mineral de estabilidad adecuada Evitar contenidos excesivos de cemento
Mín. % de arenas 2 mm	35 %	Obtener un contenido adecuado de mortero
Tamaño máx.	40 – 60 mm	Mejorar la regularidad superficial Evitar segregaciones Evitar dificultades de compactación
Continuidad granulométrica		Mejorar la compactación Evitar contenidos excesivos de cemento
Plasticidad máxima	IP < 10 - 15	Evitar problemas durante el mezclado y extendido del material Evitar contenidos excesivos de cemento Disminuir la sensibilidad del material al agua
Materia orgánica máxima	< 1%	Evitar retraso o falta de fraguado y endurecimiento del material
Sulfatos o sulfuros	< 1% Suelos cohesivos: ensayo de inmersión - compresión	Evitar reacciones expansivas Evitar pérdidas de resistencia del material

De forma resumida, se incluyen en la Tabla 4.10 las prescripciones exigidas a los materiales granulares a utilizar en suelocemento tanto en el citado artículo 513 del PG-3 (Ministerio de Fomento, 2004) como en diferentes normativas autonómicas.

La granulometría del huso SC 20 definida en el artículo 513 del PG-3 solo se puede emplear en carreteras con categoría de tráfico pesado T3 y T4, además de en arcenes, salvo en la red autonómica de carreteras de Andalucía, que es admisible para todo tipo de tráfico, y en la de Castilla y León, en la que no se prescribe huso granulométrico (solo pase por tamices 2 y 0,063 UNE).

Siempre es importante conocer las razones por las que se introducen estas limitaciones en algunas normativas autonómicas para permitir o no ciertas excepciones (Tabla 4.10). En todas las normativas se limita el contenido mínimo de cemento al 3% en masa respecto del total del material en seco, debiéndose aportar el necesario para conseguir una resistencia mínima a compresión a la edad de 7 días de 2,5 MPa (media aritmética de al menos 3 probetas de la misma amasada obtenida según UNE-EN 13286-41). Este valor puede reducirse en un 15% en el caso de emplear cementos con un alto contenido de adiciones. En el PG-3 se limita además la resistencia máxima a 4,5 MPa, exigencia que se suprime en algunas normativas autonómicas si el suelocemento se prefisura. Las probetas deben fabricarse con la energía que proporcione la densidad mínima requerida que, salvo que el Pliego del proyecto indique otra, debe ser el 98% de la densidad máxima Proctor modificado (UNE-EN 13286-2), y nunca con una densidad mayor, el material para las mismas se debe coger a la salida de la estabilizadora (Fig.4.41).



Figura 4. 41 - Aspectos del suelocemento *in situ* a la salida del equipo, material sin refinar ni compactar.

4.5.3. Proyecto

Los espesores de las capas de suelocemento para firmes de carretera en función de la categoría de tráfico pesado y la calidad de la explanada se recogen en la Norma 6.1-IC, “Secciones de firme” de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1989) o en las respectivas normas autonómicas,. Los espesores varían desde 25 hasta 30 cm.

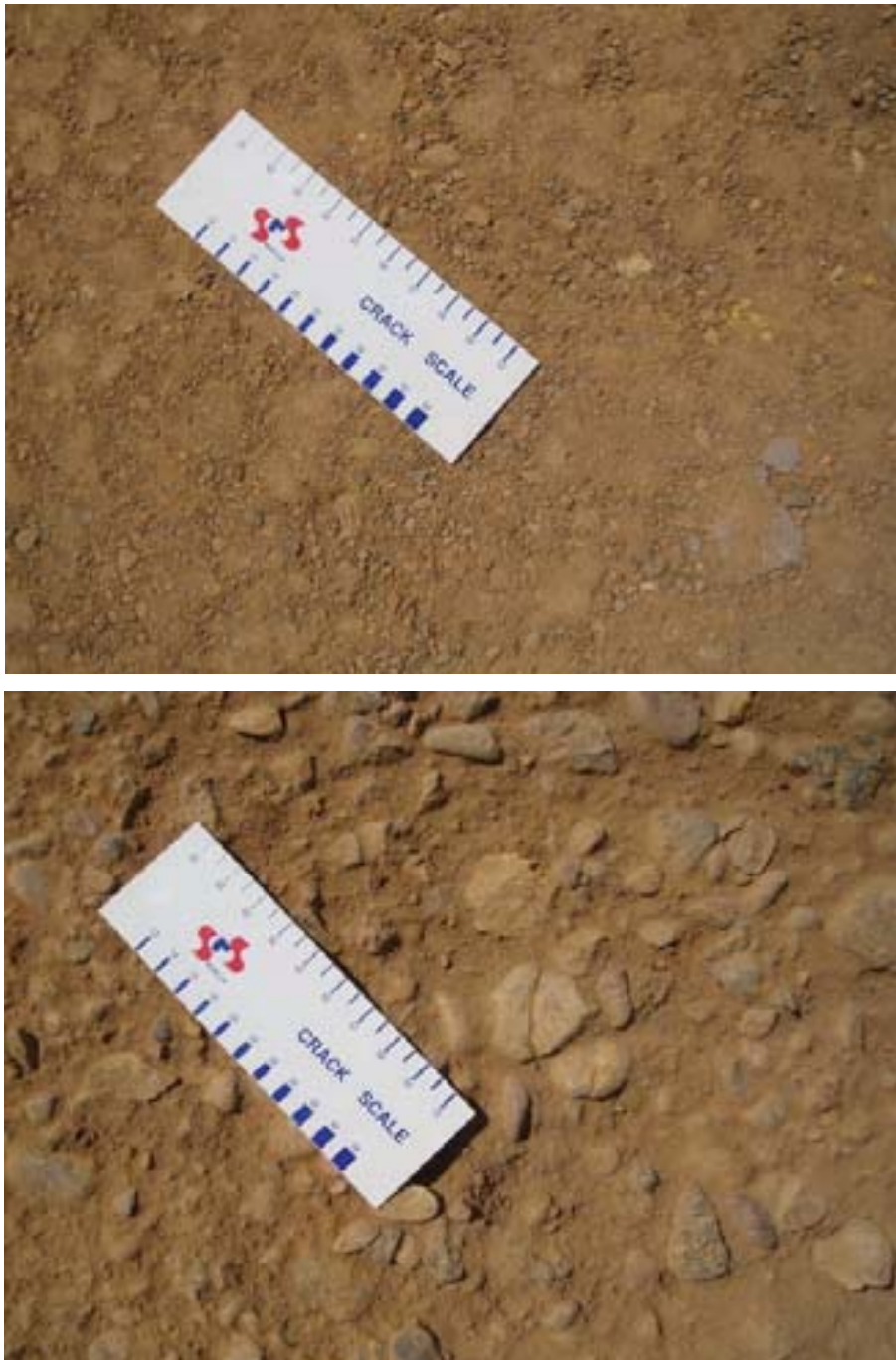


Figura 4.42 - Diferentes tipos de suelocemento realizado *in situ* (barrido y limpios).

La normativa estatal no admite el suelocemento fabricado *in situ* nada más que firmes de arcenes en las categorías de tráfico pesado T1, T2 o T31 (S•EST3 con resistencia a compresión simple a siete días no inferior a 2,5 MPa y prefisurado con espaciamentos comprendidos entre 3 y 4 m, con buena compactación, limpieza y barrido de la superficie terminada Fig. 4.42, 4.43 y 4.44).



Figura 4.43 - Rehabilitación de un carril mediante técnica de suelocemento.

No obstante, para muchas Administraciones autonómicas el suelocemento *in situ* presenta un interés especial, aparte de las ventajas mencionadas anteriormente, puesto que en una parte importante de sus obras el tamaño de las mismas hace inviable en la práctica el montar una planta expresamente para ellas. Por ello han ido incorporando gradualmente esta unidad de obra a sus prescripciones.



Figura 4.44 - Perspectiva de los equipos de compactación y refinado del material.

Fue en las Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos de la Junta de Castilla y León publicadas en 1984 (Junta CL, 1984) donde por primera vez se incluyó el suelocemento *in situ* de forma explícita. En ellas se indica que la mezcla del suelo con el cemento debe realizarse en principio en planta, aunque en ocasiones es aceptable la mezcla *in situ*. Se destaca, no obstante, que si bien con esta última opción se obtienen mayores rendimientos y resulta más económica, es necesario un mayor control para asegurar los espesores y la calidad del material exigidos, especialmente la homogeneidad (del material y de sus resistencias) y la regularidad superficial.

Dada la gran sensibilidad del suelocemento, y por tanto del conjunto del firme a eventuales reducciones del espesor, en las Recomendaciones se exige que, si el suelocemento se fabrica *in situ*, los espesores mínimos indicados en las tablas de

secciones de firme de nueva construcción se incrementen en 3 cm. Debe tenerse en cuenta que dichos espesores son los mínimos una vez compactada la capa.

Este incremento de espesor de 3 cm no se debe traducir en un sobre coste de la obra, dada la mayor economía de la técnica de fabricación *in situ*, por lo que en los cuadros de precios se debe indicar expresamente si se trata de un suelocemento fabricado en planta o de un suelocemento fabricado *in situ*.



Figura 4.45 - Suelo muy fino sin estructura granular, no aconsejable para realizar suelocemento (Guía Técnica, 2014).

Si por circunstancias de la obra no previstas en el proyecto resulta necesario cambiar un suelocemento en planta por un suelocemento *in situ*, en la sección que se construya debe incrementarse el espesor en 3 cm según lo indicado anteriormente, pero sin que el mayor volumen de este material suponga un mayor coste total de la capa.

Este criterio de incrementar el espesor de la capa de suelocemento en 3 cm cuando se realiza *in situ*, ha sido seguido por la Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía y la Norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco (en este caso, solo admite esta solución con tráficos de categoría inferior a T1).

4.5.4. Ejecución

Para la realización del suelocemento *in situ* debe recurrirse a equipos específicos (del tipo de los empleados para la estabilización *in situ* de explanadas o el reciclado de firmes) que efectúen todas las operaciones en continuo, sin intervención manual (fresado, dosificación, distribución del cemento, mezclado y extensión), y que deberán encontrarse en correcto estado de uso (sin ningún tipo de pérdidas), en la figura 4.46, vemos un cata.



Figura 4.46 - Control de espesores, humedad y densidad.

La dosificación del cemento se ha de hacer siempre en forma de lechada, aportando la humedad necesaria mediante equipos que dosifiquen en masa. Los inyectores para introducir dicha lechada en la estabilizadora han de mantenerse siempre limpios.

El mezclado debe realizarse durante todo el tiempo que resulte necesario para lograr la homogeneidad exigida, por lo que la velocidad de avance de los equipos ha de mantenerse por debajo de los 10 m/min.

Siempre que se observe una heterogeneidad o defecto repetido en el mezclado, como cambios de granulometría, defectos de dosificación, etc., se detendrán los trabajos hasta eliminar la causa (desgaste de picas, suciedad de los inyectores, etc.).

Dado que la anchura de trabajo de los equipos obliga a la ejecución por bandas, se deben cuidar especialmente los solapes, que serán de unos 20 cm, para que no queden franjas de suelo sin tratar, pero evitando sobredosificaciones y controlando que su contenido de humedad no sea diferente del resto (Fig. 4.46 y 4.47).



Figura 4.47 - Control de humedad y densidad en obra.

Para la compactación se debe disponer de un rodillo de al menos 17 t de masa, que realice una o dos pasadas dobles vibrando detrás del equipo mezclador y un segundo rodillo de masa superior a 15 t detrás de la motoniveladora que realice el refino. Para

que la superficie quede correctamente cerrada, es conveniente disponer además de un rodillo de neumáticos.

Si debido al elevado espesor de la capa no resulta posible obtener la densidad exigida del 98% (medida con el vástago del densímetro introducido hasta el fondo de la capa), el suelocemento se debe realiza en dos capas que deben quedar perfectamente adheridas.

Si por las condiciones de la obra resultase muy difícil la ejecución en doble capa dentro del plazo de trabajabilidad, se puede permitir la realización de una capa única siempre que la densidad obtenida, midiendo en el fondo de la capa, no resulte inferior al 96% de la densidad máxima Proctor modificado y que las probetas fabricadas con esta densidad del 96% cumplan las exigencias de resistencia establecidas.

Para poder lograr una regularidad superficial aceptable en la ejecución *in situ*, antes de terminar la compactación se debe realizar un refino con motoniveladora, que en el caso de obras de más de 20.000 m² (salvo ensanches) las Recomendaciones de la junta de Castilla y león exige que este dotada de equipos auxiliares de nivelación (por ejemplo 3D), que faciliten la obtención de una rasante adecuada, sin que ello dependa excesivamente de la habilidad del maquinista.

En el refino solamente se debe retirar material, sin realizar aportaciones en capa de pequeño espesor y evitando que se produzcan desplazamientos importantes del material para evitar segregaciones. Una vez llevado a cabo el refino se finalizara la compactación.

Todo el proceso de ejecución de una banda debe completarse dentro del plazo de trabajabilidad del material de la banda adyacente extendida con anterioridad, a fin de evitar la aparición de juntas frías. En caso de no determinarse el mismo mediante ensayos (norma UNE-EN 13286-45), el tiempo máximo transcurrido entre la fabricación del material de la primera banda y el final de la compactación de la banda adyacente extendida después no ha de ser superior a 2 horas.

Por ello se limita la longitud de las bandas de trabajo a 100 m. Esta longitud puede ampliarse si se comprueba que la ejecución se realiza correctamente y la temperatura ambiente no supera los 30°C. Las paradas se deben realizar en secciones transversales completas, en las que se haya finalizado la compactación de todas las bandas.

Siempre que aparezcan segregaciones, nidos de áridos o cualquier otra heterogeneidad o defecto, deberán detenerse los trabajos hasta eliminar la causa que provoque el defecto.

4.5.5. Control de calidad

En las Recomendaciones de Castilla y León (Consejería de Fomento, 1996), se destaca la importancia que el control de calidad tiene en la adecuada ejecución de esta unidad de obra, indicándose una serie de directrices que deben seguirse y que se resumen a continuación.

El suelo debe ser homogéneo en todas sus características, realizándose la disgregación, premezclado o incluso sustitución del mismo en caso necesario.

La homogeneidad se comprobará determinando las características prescritas (granulometría, plasticidad, materia orgánica y sulfatos) sobre un total de 1 muestra cada 2.000 m². Salvo autorización expresa del Director de las Obras no se admitirán variaciones de los resultados obtenidos superiores al 20% del valor medio obtenido.

Además deben controlarse los siguientes aspectos:

- La granulometría y la humedad del material a la salida de la cámara de mezclado de la estabilizadora (Fig. 4.48 y 4.49), realizándose además un ensayo Proctor Modificado al inicio de la obra y otro cada 5.000 m³ de material o semana de trabajo, a fin de evaluar la densidad máxima y la humedad óptima de la fórmula de trabajo.



Figura 4.48 - Probetas de suelocemento con terrones de partículas plásticas no disgregadas.



Figura 4.49 - Dosificador de lechada se hunde en un suelo arenoso.



Figura 4.50 - Fisuras aparecidas por fallo de algún inyector y calicata de comprobación.

- La dosificación de cemento y la homogeneidad de su dotación (Fig. 4.50 y 4.51) (comprobación del correcto funcionamiento y reparto de los inyectores visualmente 2 veces al día).



Figura 4.51 - Fisuras aparecidas por falta de solape en la construcción.

- La densidad obtenida (un punto cada 500 m²), que no debe ser inferior al 98 % de la máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado, y la humedad de compactación. Para ello se debe disponer de equipos de control rápidos, tipo sonda nuclear durante toda la obra (incluso permanentemente durante la realización del tramo de prueba y los primeros días de trabajo). Al inicio de la obra se debe establecer un plan de compactación y comprobar varias veces a lo largo de los trabajos que resulta adecuado. Se debe controlar además periódicamente que el número de pasadas de cada rodillo es el indicado.
- El espesor de la capa, mediante la apertura de calicatas (al menos una cada 8.000 m²), que además sirven para comprobar la homogeneidad de la granulometría, la humedad y el color del suelo. Independientemente del sistema de fabricación del suelocemento posteriormente hay que comprobar los espesores y la homogeneidad mediante la extracción de testigos (1 cada 2.000 m²).
- La resistencia a compresión a 7 días, sobre un total de dos series de 3 probetas confeccionadas cada día (mañana y tarde), con la densidad media obtenida en obra. Es conveniente fabricar también algunas probetas para romper a 90 días a título informativo.
- La regularidad de la superficie acabada, que no deberá rebasar la teórica en ningún punto, ni diferir de ella en más de 15 mm en el caso de tratarse de una base, ni de 20 mm en una subbase. Además se comprobara que la superficie acabada no presenta irregularidades cuando se pase la regla de 3 m superiores a 8 mm en el caso de una base, ni a 12 mm en el caso de una subbase. Estos valores podrán aumentarse respectivamente a 20 y 30 mm (12 y 22 mm comprobados con la regla de 3 m), en tramos de velocidad máxima no superior a 60 km/h.
- Las deflexiones a partir de los 15 días, debiendo obtenerse valores inferiores a 100 (10-2mm) sobre el suelocemento o a 75 (10-2mm) si se miden sobre la primera capa extendida de mezcla bituminosa. En caso contrario, se debe reconstruir el suelocemento (salvo que se pueda compensar con un sobreespesor de mezcla bituminosa).

4.5.6. Aspectos a cuidar en la ejecución *in situ*

Como en todas las capas de materiales tratados con cemento, hay que asegurar que el material de partida cumple con las prescripciones y que determinadas operaciones se realizan adecuadamente para lograr unos resultados satisfactorios.

Entre estas últimas pueden destacarse las siguientes:

- 1 - mezclar de manera homogénea, con la dotación de conglomerante y la humedad necesarias;
- 2 - compactar adecuadamente para obtener la densidad y resistencia prescritas;
- 3 - curar de forma correcta y, aunque no sea una operación específica del suelocemento en sí, asegurar una buena adherencia con la capa superior de mezcla bituminosa.

Si estas precauciones se respetan no debería surgir en principio ningún problema. No obstante, en una serie de obras se han producido ciertos errores al realizar un suelocemento *in situ*. Estos fallos, que en algunas ocasiones se han detectado durante la construcción, pudiendo corregirse a tiempo, en otras solamente se han observado al disponer encima una capa de mezcla bituminosa.

Es probable que en estos casos el paso directo de los camiones de aglomerado sobre la capa de suelocemento haya contribuido a poner de manifiesto los problemas de la misma. No obstante, el número de casos fallidos ha sido muy reducido frente al de obras bien realizadas.

La falta de cumplimiento de alguna de las prescripciones, como las incluidas en las Recomendaciones de la Junta de Castilla y León (Consejería de Fomento, 1996), se traduce prácticamente en todos los casos en la aparición de defectos. A continuación se describen algunos de los problemas más frecuentes.

Empleo de suelos de características no aptas para fabricar suelocemento.

En alguna ocasión se han utilizado suelos muy plásticos, con índices de plasticidad del orden de 15 a 18 y límites líquidos muy superiores a 30, o bien suelos con terrones de partículas plásticas muy difíciles de disgregar (Fig. 4.48 y 4.49). Este defecto es difícil de detectar en obra si no se realiza el control adecuado, puesto que los equipos

modernos de ejecución tienen capacidad suficiente para mezclar el suelo con la lechada de cemento sin que en la realidad los resultados que se obtienen, y en particular las resistencias mecánicas, sean mínimamente aceptables.

El problema es que si no se controla la calidad del suelo (que se puede apreciar visualmente cuando se extrae, transporta y extiende pero puede resultar difícil de comprobar cuando ya está extendido en la traza), los errores se detectan solamente por la caída de resistencias al romper las probetas, es decir, cuando ya ha transcurrido más de una semana y se han realizado varios kilómetros.

En algunas ocasiones, si no existe una comunicación fluida entre el laboratorio de control de calidad y la dirección de las obras, puede pasar demasiado tiempo hasta que se modifica el sistema constructivo o se cambia el suelo, lo que supone que puede estar construida una parte importante de la obra, dado el elevado rendimiento de los equipos.

Este problema es difícil que suceda si se cumplen las prescripciones en cuanto a homogeneidad indicadas anteriormente al hablar de control de calidad, de forma que no se obtengan variaciones de los resultados superiores al 20% del valor medio.

Es decir, si se declara en los ensayos previos o durante la obra que el valor medio del índice de plasticidad (IP) es, por ejemplo, 8, el contenido de materia orgánica (MO) 0,3 y hay ausencia de sulfatos, en las muestras de suelo que se analicen cada 2.000 m² el IP solo podrá variar entre 6,4 y 9,6, la MO entre 0,2 y 0,4 % y no podrá tener sulfatos. Lo mismo ocurre con la granulometría (porcentajes retenidos en los distintos tamices), respecto a la inicialmente declarada.



Figura 4.52 - Prefisuración del suelocemento.

A esta exigencia se suma otra de gran importancia que debe cumplirse en todas las obras: la obligatoriedad de disgregar y premezclar (y por supuesto ensayar) el suelo en acopio antes de extenderlo en la traza. De no hacerse así, el suelo que se extiende en obra puede tener variaciones muy importantes en sus características.

En algún caso, la extracción de suelos mucho más plásticos del fondo de los préstamos, junto con el empleo de suelos procedentes préstamos diferentes sin realizar los controles necesarios ha dado lugar a fracasos de gran importancia, que probablemente hubiera sido más difícil que se produjeran con una fabricación en planta, en donde es necesario el acopio previo de los suelos.

No obstante hay suelos que no permiten la realización *in situ* del suelocemento. Este es el caso de las arenas limpias de granulometría uniforme, prácticamente sin finos, en las que, independientemente de las dificultades para compactarlas que pueden hacer inviable su utilización incluso aunque se fabrique el suelocemento en planta, no permiten el paso de los equipos de ejecución *in situ* por encima de ellas.

Conviene mencionar a este respecto que la estabilizadora tiene que empujar la dosificadora de lechada, que estando a carga completa puede pesar 65 t. Lo mismo sucede con algunos otros suelos en los que el equipo de dosificación se puede hundir en el suelo sin compactar y no avanzar, mientras que en el caso de fabricación en planta, la

extendedora puede trabajar sin problemas porque rueda sobre la capa de apoyo del suelocemento ya compactada.

Ensayos previos no representativos.

Tanto si el suelocemento se ejecuta *in situ* como si se fabrica en central, el estudio de dosificación debe realizarse sobre muestras representativas del suelo. De nada sirve determinar una dosificación concreta de un

suelocemento para obtener la resistencia a compresión prescrita de 2,5 MPa a 7 días, realizando incluso estudios de sensibilidad a las variaciones de humedad o a la densidad obtenida si dichas muestras son muy diferentes al suelo colocado en la obra, o se producen variaciones importantes en los préstamos de donde se obtienen los suelos.

Problemas de dosificación.

Si no se realiza un mantenimiento cuidadoso de los equipos, puede producirse la obstrucción de alguno de los difusores. En este caso, aunque el equipo dosificador siga enviando la lechada con la misma dotación de cemento, esta se distribuye entre el resto de los difusores, pero la franja regada por el obstruido quedara sin conglomerante o con una dotación mínima.

En estas franjas de escasa o nula resistencia mecánica, las cargas de tráfico o las variaciones de temperatura pueden dar lugar a la aparición de fisuras longitudinales.

Los problemas debidos a la falta de dosificación de conglomerante o una baja dotación son muy difíciles de controlar en la ejecución *in situ*. Únicamente se pueden obtener valores instantáneos de consumos en el ordenador del equipo dosificador de lechada (poco fiables si no se realizan contrastes periódicos), o bien valores medios dividiendo las toneladas descargadas por cada cuba de cemento por la superficie trabajada, los cuales deben corresponderse con la dotación media. Pero este valor medio no da una indicación de la homogeneidad de la distribución del conglomerante, por lo que no hay que descartar que puedan aparecer fallos en las zonas más débiles, aun habiendo otras colindantes de mayor resistencia. Es decir, solo es posible comprobar que el contenido de cemento no es inferior al especificado, pero no como se ha distribuido. Por todo ello, y considerando el sobrecoste y los problemas que generan las reparaciones posteriores, siempre es conveniente ser generoso en la dotación de conglomerante del suelocemento,

especialmente en el caso de realizaciones *in situ*, y comprobar frecuentemente el estado de los inyectores de lechada en la estabilizadora.

Suelocemento con un contenido insuficiente de conglomerante.

Se trata del caso más extremo de problemas en la dosificación. Las reacciones de fraguado y de endurecimiento del cemento convierten el material suelto en otro dotado de resistencia mecánica y una capacidad de soporte mucho mayor. Para ello es evidente que hay que añadir al suelo el porcentaje adecuado de cemento.

Este problema de falta de conglomerante se ve agravado si además el suelo contiene muchos finos y estos son plásticos las resistencias obtenidas pueden ser muy pequeñas. La combinación de ambos factores (suelo de mala calidad y escasa dotación de cemento) ha dado lugar a que, en algún caso, el suelocemento pudiese ser excavado manualmente incluso después de haber transcurrido varios meses.

Humedad del suelo.

Para fabricar el suelocemento *in situ* con unas ciertas garantías de calidad es necesario el empleo de equipos modernos de última generación que incorporan el cemento al suelo en forma de lechada. Este método, que se conoce como vía húmeda, es más preciso que el de dosificación en polvo.

En la fabricación de la lechada se requiere utilizar como mínimo dos puntos porcentuales de agua con dosificaciones bajas de cemento, valor que se incrementa hasta el 2,5 – 3,0% con dotaciones mayores de cemento. Dicho agua se incorpora al suelo, por lo que la humedad del mismo deberá estar como máximo dos puntos por debajo de la humedad óptima obtenida en el ensayo Proctor modificado, puesto que, en caso contrario, se incrementaría excesivamente la humedad, haciendo inviable la compactación. La reducción de densidades obtenidas se traduce en un descenso considerable de las resistencias. Por eso, si el suelo tiene una humedad próxima a la óptima Proctor modificado o superior, deberá orearse y secarse previamente, porque de lo contrario no se podrá fabricar el suelocemento *in situ* con unas garantías mínimas de calidad.

Problemas de ejecución.

Como en todas las unidades de obra, la buena construcción de esta capa depende de la profesionalidad y el buen hacer del personal constructor, pero algunos aspectos, que se comentan a continuación, son más difíciles de controlar que cuando el suelocemento se fabrica en central.

Falta de espesor.

Aunque se pueden abrir calicatas detrás del equipo y referirlas a la calle colindante para estimar tanto la profundidad del tratamiento como su homogeneidad, no es viable realizarlas constantemente (aunque inmediatamente después se tapen y se compacten). De alguna manera se depende de la confianza en los equipos que realizan el mezclado, normalmente subcontratado, y en el personal que los maneja.



Figura 4.53- Nivelación de suelocemento con equipo dotado de 3D.

Solapes entre calles de ejecución.

En algunas obras, por un falso sentido de la economía, se han ajustado excesivamente los anchos de los solapes, de forma que ha quedado material suelto sin tratar entre dos calles contiguas. Ello se ha traducido posteriormente en la aparición de fisuras longitudinales en las capas de mezcla bituminosa, separadas aproximadamente 2,50 m.

Nivelación.

Al no existir precompactación en el extendido, si la nivelación depende de la pericia del conductor de la motoniveladora, normalmente resultara peor que la obtenida con extendedora. El apoyo de una buena topografía con suficiente número de puntos de referencia o el empleo de motoniveladora dotada de equipos auxiliares de nivelación, como por ejemplo el 3D, ayuda a resolver este problema. Se trata de asegurar la obtención de la rasante sin depender de la habilidad del maquinista y evitando que la cuchilla de la motoniveladora mueva constantemente el material de un lado para otro con el fin de regularizar la capa, reduciendo el espesor en algunos puntos y provocando segregaciones y nidos de gruesos en la superficie.



Figura 4.54 - Equipos de suelocemento *in situ* en un ensanche.

Normalmente, con las referencias topográficas precisas, no resulta complicado obtener una rasante cumpliendo con las tolerancias especificadas, la cual se mejora además de forma considerable con las capas bituminosas dispuestas encima.

Problemas con la prefisuración.

Para evitar la reflexión de las fisuras de retracción del suelocemento en las capas superiores de mezcla bituminosa, es usual recurrir a la técnica de prefisuración en fresco cuando la categoría de tráfico pesado es superior a la T31 y/o en el caso de clima continental.

Los equipos de prefisuración suelen estar diseñados para cortar con rapidez o bien todo el ancho de la capa o bien al menos media calzada (unos 4 o 5 m), mientras que los equipos de fabricación de suelocemento *in situ* están diseñados para trabajar en calles de 2,5 m (para permitir su transporte sin medidas especiales). Por ello, la coordinación de estos equipos de prefisuración con los de ejecución de suelocemento *in situ* es compleja, porque o bien se van prefisurando calles de 2,5 m, para lo que se requieren muchas operaciones que pueden reducir el rendimiento del conjunto, o bien se recurre a extender dos calles de suelocemento (4,70 m incluyendo el solape) y se prefisuran después ambas a la vez. En este último caso hay que asegurar un plazo de trabajabilidad del suelocemento que permita nivelar y compactar la calle puesta en obra en primer lugar, teniendo en cuenta que estas operaciones no podrán iniciarse en la misma hasta que no se haya mezclado el suelocemento de la calle colindante (la prefisuración en fresco se lleva a cabo antes de compactar el material).

En ambos casos los equipos de prefisuración suelen reducir el rendimiento de la unidad. Ello obliga a asegurar un plazo amplio de trabajabilidad del material para permitir compactar, refinar con la motoniveladora y terminar la compactación, sin que se hayan empezado a formarse todavía enlaces entre las partículas que puedan verse dañados por estas operaciones.



Figura 4.55 - Detalle de la terminación del suelocemento realizado *in situ* correctamente.

Excesivo ritmo de ejecución. Muchas de estas obras son realizadas por subcontratistas (hay más de 60 equipos en España y un gran número de empresas especializadas en estas unidades de obra), que reciben un precio ajustado y normalmente están interesados en una ejecución lo más rápida posible. Hay que evitar que ello se pueda traducir en deficiencias importantes que conduzcan a fracasos. Entre las que se producen en ocasiones están el insuficiente espesor o profundidad del tratamiento para obtener mayores rendimientos, una velocidad de avance excesiva de la estabilizadora que no permita obtener un mezclado correcto, la incorporación de una menor cantidad de cemento, pues aunque este se abone aparte, cuanto más elevada es la dotación menor es el rendimiento y mayor el número de paradas para cargar el equipo de fabricación de la lechada (que puede traducirse en 2,5–3 horas sin trabajar) o el empleo del mismo personal durante más de 10 horas seguidas.

Las restantes precauciones son similares a los del suelocemento fabricado en planta y propios de cualquier material tratado con cemento, como por ejemplo la necesidad de comprobar periódicamente los valores obtenidos en el ensayo Proctor (densidad y humedad), el curado correcto para permitir un buen fraguado y endurecimiento del

material, la necesidad de una correcta limpieza antes de extender la emulsión de adherencia o el asegurar una correcta unión del suelocemento con la capa superior de mezcla bituminosa. En cualquier caso, al igual que en el suelocemento fabricado en planta o cualquier otro material tratado con cemento, se recuerdan los siguientes aspectos:

- La importancia de una adecuada compactación que permita obtener la densidad exigida (Fig. 4.54), puesto que de dicha densidad depende la resistencia y la durabilidad de la capa, capa con buena terminación (Fig. 4.55).
- La necesidad de realizar un buen control de la humedad que permita aproximarse a la humedad óptima del ensayo Proctor modificado, por su influencia en la posibilidad de conseguir las densidades necesarias.

De todos los problemas comentados, cabe pues destacar los siguientes puntos principales a cuidar en la ejecución *in situ*:

- La calidad del suelo a emplear, debiéndose acopiar y homogenizar previamente todo el suelo y realizar ensayos previos que resulten representativos, entre los que se incluyan ensayos de sensibilidad a los cambios de humedad y de densidad con diferentes porcentajes de cemento.
- La dotación, que ha de superar de forma generosa a la mínima estrictamente necesaria.
- El espesor de la capa, que una vez tratada debe ser como mínimo el proyectado, para lo que es imprescindible una buena nivelación del suelo antes del tratamiento. Además se debe profundizar algunos centímetros en la capa inferior para asegurar una buena conexión entre ambas capas y no dejar material sin tratar.
- La idoneidad del subcontratista o contratista que ejecuten el suelocemento.

La Dirección General de Carreteras e Infraestructuras de la Junta de Castilla y León publicó la Instrucción CE-2/2006 sobre prescripciones para el empleo de suelocemento *in situ*, en la que se indican las condiciones a cumplir por el contratista para permitir este tipo de unidad.

4.5.7 . Ideas fundamentales

El suelocemento *in situ* es una técnica altamente sostenible que permite el empleo de los suelos locales para realizar una capa de firme sin necesidad de instalar una planta de fabricación.

Los errores aparecidos en algunos casos son fácilmente evitables como se demuestra con el gran volumen de obras realizadas correctamente.

Por otra parte, los tramos defectuosos de suelocemento *in situ* se han reparado con la misma técnica, lo que demuestra la validez de la misma cuando se ejecuta adecuadamente.

La economía de fabricación del suelocemento *in situ* nunca debe traducirse en una reducción de los parámetros de calidad. La homogeneidad del suelo colocado, junto a una ejecución cuidadosa y un control de calidad correcto, son aspectos imprescindibles para asegurar el éxito.

Las ventajas de la realización *in situ* han promovido la aplicación de esta técnica en todo tipo de carreteras, desde vías de baja intensidad de tráfico hasta autovías.

Cada vez son más las obras en las que a nivel de proyecto modificado o incluso en el diseño original se permite el suelocemento fabricado *in situ* con equipos de reciclado o estabilización.

El hecho de que en las normativas de algunas comunidades autónomas se contemple ya esta posibilidad se traducirá sin duda en un empleo todavía mayor de la misma, siempre teniendo en cuenta que para obtener resultados satisfactorios es necesario respetar escrupulosamente las prescripciones técnicas.

4.5.8. Suelocemento *in situ* frente a suelocemento en planta

El suelo cemento es un material que se adapta perfectamente a las necesidades que se presentan en la construcción de infraestructuras de todo tipo, su empleo se ha generalizado por su economía para tráfico pesados, ahorro de material bituminoso y gran capacidad soporte frente a los firmes compuestos por capas granulares y grandes espesores de mezclas bituminosas.

La capacidad de los materiales con los que hay que fabricar el suelocemento y los controles de ejecución prescritos aseguran la bondad del producto terminado y la durabilidad de la obra construida con él.

La posibilidad de emplear los materiales de la traza y no tener que acudir a préstamos exteriores o canteras hace que sea una unidad de trabajo versátil y de aplicación en cualquier obra.

De manera específica, la fabricación *in situ* frente a planta cuenta con las siguientes circunstancias:

- Fabricación de suelocemento *in situ* frente a la fabricación en planta aporta muchas ventajas, especialmente en obras pequeñas en las que no se dispone de una planta fija cerca de la obra y en aquellas en las que por las circunstancias, el material suelo, ya está colocado y es necesario mejorar sus prestaciones, bien porque el suelo es de mala calidad, bien porque el tráfico real ha resultado ser mayor del previsto en el proyecto.
- También aporta ventajas en los casos en los que haya que dividir una obra grande en varias fases o en las que la climatología adversa pueda dificultar la ejecución cumpliendo los plazos contratados.
- La maquinaria y los métodos de fabricación del suelo cemento *in situ* están suficientemente descritos y contrastados con la realidad.
- El equipo humano encargado de este trabajo cobra especial importancia, como la adquisición de las máquinas para este trabajo se entrega el manual para el correcto uso de las mismas, pero no la capacitación de los operadores, ni la capacidad de resolución de problemas en el momento de la ejecución.
- Los controladores sobre la fabricación y el producto terminado tanto en uno y otro caso han de ser los mismos.

En definitiva, la fabricación de suelocemento *in situ*, debe estar sometida a un control más riguroso, tanto de la ejecución como de las empresas ejecutoras de esta unidad, pudiendo fijarse mayores espesores para la construcción de capas con esta técnica, habida cuenta del diferencial de precio que existe entre la fabricación *in situ* y en planta y como seguridad adicional, ejecución en planta 24-25% superior los costes.

CAPITULO 5. PREFISURACIÓN Y DEFLEXIÓN

5.1. Capas tratadas con cemento, la prefisuración y su efecto sobre el IRI

Desde la publicación de la primera versión de la Norma 6.1-IC de Secciones de Firmes (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1989) como Orden Circular, para los tráficos T2 o superior es obligatorio prefisurar las capas tratadas con cemento en contacto con una capa de mezcla bituminosa a distancias relativamente cortas (3-4 m). A partir de ese momento, una gran longitud de capas tratadas con cemento (especialmente suelocemento) han sido prefisuradas en la red de autovías, para ello se ha utilizado diversos equipos que en muchos casos, son desarrollados propios de las empresas constructoras de las obras, entre estas metodologías se encuentra la de inyectar una emulsión bituminosa mediante una uña o cuchilla, soportada por un vehículo ligero, a la salida de la extendedora.

Entre las realizaciones más notables recientemente ejecutadas se encuentran las capas de suelocemento de la Autovía Ruta de la Plata A66 a su paso por Extremadura. En la presente documento se presenta brevemente el marco de las obras citadas, para posteriormente describir los procedimientos de prefisuración empleados. Seguidamente, se comentan los principios fundamentales de la medida de la regularidad superficial a través del Índice de Regularidad IRI, se analiza la eficacia de la técnica de prefisuración para regular el patrón de fisuración y, partiendo de resultados obtenidos en obra, se comenta su nula influencia en el IRI de la capa de rodadura del firme.

La prefisuración consiste pues en la ejecución de dos tipos de discontinuidades en la capa de suelocemento:

- fisuras transversales;
- fisuras longitudinales.

La regularidad en la capa de suelocemento contribuye claramente a alcanzar una buena regularidad final en la rodadura de una manera más fácil, sin embargo, aun partiendo de una peor regularidad se puede alcanzar el objetivo final, eso sí, a un coste económico mayor. Para comprender lo expuesto es necesario reparar en los sistemas de posicionamiento que se van a utilizar en la ejecución de las capas posteriores de mezclas bituminosas, para la capa base, la extendedora se apoya en un cable que le proporciona una referencia absoluta, esto quiere decir que si se realiza correctamente este proceso de referenciación, la falta de regularidad procede exclusivamente del proceso de ejecución

y de un irregular asiento sobre la capa inferior, para la capa intermedia, al disponer ya de un posicionamiento absoluto la capa inferior, se suele extender con reglas que permiten realizar un suavizado del perfil, evidentemente, son una mayor longitud de la regla se obtiene un plano de referencia más amplio.

Tradicionalmente para la capa de rodadura, se suele trabajar a plancha fija, esto quiere decir que la posibilidad de suavizado queda limitada por la envergadura de la propia extendedora, pero por otro lado, ir a plancha fija permite llevar un riguroso control del espesor de la capa y ajustar los consumos de mezcla bituminosa, llegados a este punto, resulta evidente que la regularidad mejora, empleando la regla larga también en el extendido de la rodadura se consigue un suavizado adicional, claro está, con un mayor consumo de mezcla bituminosa.

Volviendo al proceso de ejecución de las mezclas, los defectos de regularidad pueden provenir del propio extendido o del tren de compactación. Si excluimos defectos debidos a una formulación deficiente de la mezcla, que una vez detectados y corregidos deben tener una influencia local, los defectos en el extendido son achacables al trabajo de la extendedora. Las recomendaciones que se pueden extraer de la observación del funcionamiento mecánico de la regla de la extendedora ya han sido tratadas ampliamente por diversos autores y no los comentaremos aquí, pero hay que señalar que cualquier desajuste del equipo es superable si el personal cuenta con suficiente experiencia, salvó por una manifestó desidia en la operación, la descarga de las bañeras no debe provocar ninguna perturbación a la extendedora, puesto que el camión se debe parar a medio metro de la misma y esperar a ser recogido suavemente con su avance, para ello, evidentemente se requiere también que la extendedora sea capaz de proporcionar cierta inercia.

A nuestro juicio, los equipos de extendido que incorporan reglas de alta compactación requieren de mejoras técnicas, ya que el nivel de vibración hace que las averías, desgasten y desajusten sean relativamente habituales, además de generar un trabajo incómodo. En las paradas y los arranques de tajo resulta muy difícil no dejar huella en la rodadura, por ello la mejor estrategia pasa por evitarlas y reducirlas. Las paradas se evitan con un correcto dimensionamiento del ciclo de alimentación y una buena coordinación con la planta, las paradas de la extendedora para corregir su trayectoria y adaptarse una sirva elevada también dejan marca (ramales, tableros, etc.).

El arranque diario requiere el calentamiento previo de la regla de la extendedora y de un ligero incremento de temperatura en las primeras toneladas de mezcla extendidas, sin

embargo, reducir los arranques implica programar los tajos sin paradas diarias y que las jornadas sean lo más largas posibles, condiciones que se pueden alcanzar en época estiva, estos aspectos tienen también una clara vertiente económica, respecto al tren de compactación, hay que indicar que debe ser adecuado a las condiciones térmicas en que se realizan las operaciones, tanto en tamaño como en distancias a las que se trabaja, para evitar las paradas en la calzada se puede trabajar en abanico para inerte llevarlas al arcén.

Finalmente, realizamos unos breves comentarios específicos sobre el IRI, tal como se ha indicado, la esencia de este índice se encuentra en la calidad con la que se obtiene el perfil de la carretera, deficiencias de tamaño inferior al muestreo del perfilometro no serán reflejadas, y en todo caso, las frecuencias bajas son filtradas. Puede ser habitual que cuando se pasa el perfilometro por una obra, alguna estructura tiene sus juntas ejecutadas, en este caso si es evidente que los hectómetros afectados pueden arrojar un IRI más elevado, pero cualquier otra junta de poca dimensión, o una fisura, pasaran desapercibidas para el perfilometro, incluso para el propio IRI, aunque puede que no para la sensibilidad del usuario. Por ello entendemos que este indicador debe enfocarse hacia la caracterización de defectos globales que a los defectos puntuales, que además normalmente son difíciles de tratar. En ese sentido, un mal valor reiterado refleja una problemática generalizada del tramo, también requiere comentario las condiciones de trabajo de los perfilómetros, los sistemas más modernos establecen una referencia inercial respecto a la que determinan la distancia de los puntos del perfil, por tanto, cualquier alteración de esta referencia inercial, como frenadas o cambios de trayectoria, introduce errores en la lectura. Todo ello haría necesario normalizar también las condiciones en que se realiza la toma del perfil y que filtrados previos se realizan preprocesos, además debería incorporarse un tacografo que recoja las condiciones de velocidad de recorrido.

Admitida la importancia que supone prefisurar una capa de suelocemento, en este trabajo se ha analizado la influencia que tal prefisuración puede tener sobre la regularidad superficial medida a través del IRI. Se ha demostrado en estudios de laboratorios, que partiendo de una capa de suelo cemento como un IRI medio menor de 4.5 dm/hm se puede llegar a cumplir perfectamente las condiciones de regularidad superficial que exige la vigente normativa a las capas de mezclas bituminosas; por el

contrario, partir de valores superiores a 5.5 dm/hm requieren extremar las condiciones de ejecución de las mezclas, y en especial, trabajar con la regla larga en la propia rodadura, en lugar de extenderla a plancha fija.

La técnica de prefisuración mediante inyección de una emulsión bituminosa da buenos resultados, no siendo relevante su efecto sobre la regularidad.

Alcanzar una mejor regularidad hoy en día es un simple problema de costes y de experiencia de los equipos involucrados en la ejecución.

5.1.1. Estudio sobre el comportamiento de capas de suelocemento mediante la medida de deflexiones

Se trata de hacer un análisis sobre los datos de las deflexiones obtenidas durante la construcción de la autovía en las capa de suelocemento, se trata de comprobar los rangos de estos valores y su correlación con los correspondientes a la capa de explanada, todo ello encaminado a un control, más allá del puntual, de estas capas del firme de carreteras.

Datos del estudio:

- en términos muy generales la deflexión patrón asociada a la capa de suelocemento se encuentra entre un 25 y un 50 % por debajo de la asociada a la explanada;
- en términos de deflexión característica el rango es más uniforme situándose en torno al 50 %, esto es así dada la mayor regularidad de ejecución y control del suelocemento en donde la desviación típica no alcanza valores muy altos;
- los valores máximos obtenidos para la deflexión patrón media en la capa de suelocemento son menores de 35 centesimas de milímetro, siendo menores de 30 en el 78 % de los casos (para un tramo de 1Km);
- la homogeneidad de los datos obtenidos puede avalar el empleo de un criterio basado en deflexiones patrón para la aceptación o rechazo de capas de suelocemento.

5.1.2. Experiencias de prefisuración de capas tratadas con cemento en el Norte de España

Sistema CRAFT, consiste en un equipo acoplado al sistema tractor, que realiza las operaciones de ejecución de la junta de forma automática, vertiendo emulsión en las paredes del surco a medida que lo va creando, alto rendimiento tanto acoplado a una retro mixta, como acoplado a una hoja en motos de cuatro ruedas.

Sistemas de las Juntas Activas, consiste en practicar un surco en todo el espesor de la capa, una vez extendida y tras haber sufrido una ligera compactación, introduciendo a continuación en el mismo un perfil ondulado de plástico rígido, posteriormente la misma máquina cierra el surco y se finaliza la puesta en obra de la forma usual. (Retro realiza surco con útil y pala coloca plástico y cierra surco).

Las capas tratadas con cemento se deben prefisurar a 2 o 3 m, aunque lo normal en obra son los 5 m.

Para evitar la deflexión de fisuras en el pavimento o que las fisuras que se reflejen tengan una muy buena transmisión de carga, es imprescindible realizar una correcta construcción del firme, incluida la prefisuración (Jofré Ibañez et al, 2009).

A continuación se exponen una serie de conclusiones que se pueden extraer de la utilización de los sistemas de prefisuración, de prefisuración CRAFT y Juntas Activas .

- Se han prefisurado 1.500.000m² con los sistemas CRAFT y Juntas Activas en Cantabria, Navarra y País Vasco.
- La primera obra de importancia con el sistema CRAFT se realizó en 1991, en la Variante de Irurzun, tramo de la A-10 (Pamplona – Alsasua), con una muy baja deflexión y con un buen comportamiento.
- El comportamiento de los firmes prefisurados son los sistemas CRAFT y Juntas Activas puede calificarse como de muy bueno.
- Uno de los inconvenientes más importantes que presentan los sistemas CRAFT y Juntas Activas es la existencia de pocos equipos.

No hay ni una sola obra prefisurada con los sistemas CRAFT y Juntas Activas donde se hayan producido problemas de consideración en el firme que hayan ocasionado un mal comportamiento estructural.

CAPITULO 6. INSPECCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD

En construcción de todas las obras de ingeniería, grandes o pequeñas, no hay fase más importante que la inspección del proceso constructivo. En una obra de ingeniería es más crítica esta actividad de vigilar el bien hacer, que el mismo diseño.

La inspección es la actividad por medio de la cual se logra que una obra se realice de acuerdo a los planos, materiales y procedimientos prescriptivos por el diseño: i) si la obra es grande, como el pavimento de una autopista o aeropista, se requiere una inspección formada por un grupo numeroso de hombres; ii) si la obra es pequeña como el pavimento de un estacionamiento de una residencia o fabrica, la inspección queda en manos del mismo arquitecto o ingeniero residente.

Desde antes de escribir las especificaciones, se debe pensar en la inspección de la construcción de un pavimento, indicando en ellas, el tipo que se necesitará. Si no se cuenta con un cuerpo de inspectores adecuados, se puede contratar los servicios de inspección de un laboratorio u oficina de inspección.

El Inspector, debe ser un hombre con los conocimientos y experiencia suficientes para interpretar y conocer perfectamente los planos y materiales por usar en una obra, y vigilar al constructor para que emplee procedimientos adecuados de construcción, no cualquier persona está capacitada para esta importante labor, además del entrenamiento y conocimiento, auxiliados por una inteligente actitud para los problemas que se presenten en una obra, ese hombre necesita tener una alta calidad moral para no aceptar ningún favor u obsequio de parte del contratista, que lo obligué a permitir el uso de materiales inadecuados o de incorrectos métodos constructivos.

En esta modesta obra se quiere señalar, que actualmente existe una corrupción y control de calidad de los pavimentos hechos en nuestro país, en las grandes obras de pavimentos, provocando por la inmoralidad y afán de lucro de algunas compañías constructoras de pavimentos. Se ve con tristeza como el pavimento de una obra que debería durar 20 años, al año empieza a fallar, a pesar de que en nuestro país se conocen a la perfección las tecnologías para diseñar y construir correctamente cualquier pavimento, quizá en estas pavimentaciones convendría el uso de un laboratorio

comercial, altamente calificado, que hiciera una inspección y control de calidad, en forma repentina, en tramos escogidos al azar.

Control de calidad, en construcción de pavimentos, se reconoce actualmente que al usar locales, lo común es la gran variedad de resultados, al reconocer lo anterior, se ha buscado la manera de construir los pavimentos con mayor precisión y se ha recurrido a las teorías matemáticas de probabilidad y estadísticas para el control de su calidad, de esta manera la tendencia en el mundo de la construcción de carreteras es el uso de modernas especificaciones de tipo estadístico, el año 1970 marca la separación entre las antiguas especificaciones que empezaron a utilizarse en 1920, y las nuevas especificaciones estadísticas que son la tendencia actual.

Muestreo y ensayo. El control de calidad de un pavimento es básicamente un problema de muestreo y ensayo, aunque la inspección se hace, desde el inicio abarcando visualmente toda la obra, es necesario tomar una pequeña cantidad de todos los materiales y ensayar para determinarle sus características importantes.

Muestra, es una parte pequeña tomada de un volumen grande de material, y que tiene las mismas características de este al momento de tomarse. Hasta 1960, las muestras tomadas en la construcción de un pavimento, se decía que eran representativas, del lote correspondiente. El muestreo lo hacía, en el mejor de los casos, un inspector o laborante, el cual, mediante su experiencia y criterio, tomaba la muestra, que generalmente representaba la calidad promedio del todo. Estas muestras, tienen el inconveniente de no representar ni lo más malo ni lo más bueno del material, no permitiendo apreciar la variabilidad, inevitable, del todo, de esa manera no podría aplicarse al control de calidad las técnicas estadísticas y probabilísticas, que en la actualidad son la base en la producción y construcción de todo lo que sale de las industrias.

Para un control de calidad estadístico, se requiere un muestreo aleatorio: una muestra tomada al azar, no requiere ser tomada por una persona experta y juiciosa, en este muestreo moderno se elimina el factor personal, la muestra al azar, representa lo más malo y lo más bueno, así como lo intermedio, permitiendo igual que la representativa determinar la condición promedio, pero también permite fijar el grado de variabilidad

de la calidad del material. Una de las limitaciones del control estadístico de la calidad es que se necesitan muchos muestreos y en las obras pequeñas no es práctico ni necesario ese exceso de muestreo.

6.1. Conservación de pavimentos

Hay dos tipos de conservación de pavimentos:

- conservación preventiva;
- conservación correctiva.

La conservación preventiva, tiende a prevenir o retardar.

La conservación correctiva se aplica cuando han ocurrido los fallos en un pavimento, y se dan los pasos para localizar y definir el tipo de fallo y lo que la causó, haciendo la reparación necesaria.

Uno de los aspectos más importantes de los pavimentos es el fallo existente en ellos. Una pregunta muy discutida es ¿está fallando un pavimento?. Lo primero que tenemos que acordar o definir es lo que constituye realmente un fallo en esas estructuras. Esto es muy importante, tanto que su franco reconocimiento por los ingenieros de pavimentos, ha causado que al fallo, como factor de diseño, se le dé tanta importancia, como a los otros factores que influyen en el diseño.

Se reconocen dos tipos o familias de fallos:

- Funcionales, son leves relativamente, cuando un pavimento ha perdido su función inicial o asignada de antemano, se acepta que tiene fallo funcional. Generalmente está localizada en la capa superficial, ya sea carpeta asfáltica, losa de concreto, capa adoquinada o empedrada. Si una carpeta asfáltica se coloca en una pavimento para que proporcione un tránsito cómodo y seguro, y resulta que esa carpeta después de un tiempo de uso, esta arrugada, boluda o resbaladiza, entonces tiene falla funcional. Estos fallos pueden ser progresivas o no, además no imposibilitan a los pavimentos para usarse, simplemente perdieron su cómoda tersura, que es muy importantes, sobre todo en calles o carreteras de mucho tránsito.

- Estructurales, que pueden localizarse y originarse en una o varias capas, si son graves, consisten en el rompimiento del pavimento por el fallo estructural de la subbase o base. También puede fallar estructuralmente el cuerpo de un terraplén o el suelo que lo soporta. Estos fallos si imposibilitan al pavimento, cuando están muy avanzadas.

Para juzgar el tipo y lugar de un fallo, tiene que hacerse un estudio de campo y laboratorio, dirigido por una persona con muchos conocimientos de pavimentos y de laboratorio.

Existe una relación entre el diseño, construcción y conservación de pavimentos. Estos tienen una vida determinada, después de la cual hay que sustituirlas por otras estructuras, mejorando la nueva.

En algunas ocasiones el daño que tiene un pavimento es leve, y con una renovación superficial se puede alargar muchos años de vida útil. En pavimentos con carpeta asfáltica, esto puede consistir en un simple riego de sellado.

CAPITULO 7. EXPERIENCIAS EN OBRAS

En este capítulo, realizaremos una analítica de las diferentes obras realizadas tanto a nivel Nacional como Regional. Existen unos factores en estas obras, como en todas las Obras de este tipo, que son determinantes como son la climatología y la geografía, estas debemos tenerlas en cuenta a la hora de proyectar y ejecutar, incluso analizar, que es lo que realizaremos en este trabajo. Analizar los resultados y comportamiento de estas obras, transcurrido un tiempo desde su ejecución, lo cual ayuda a plantearse en virtud de los resultados obtenidos, si la técnica, la sección proyectada y el método constructivo han sido los adecuados para conseguir los resultados esperados. Es mediante esta valoración y auto análisis con la que se consigue mejorar y corregir los errores que una falta de experiencia nos hace cometer.

7.1. Experiencia en España en el Reciclado de Firmes con cemento, en carreteras de montaña, carreteras Regionales, Vías de baja intensidad de Tráfico y carreteras locales

7.1.1. Experiencia en el Reciclado de firmes con cemento en la Red Provincial de Córdoba (España)

En la ejecución de obras de reparación mediante reciclado con cemento en la red provincial de carreteras de Córdoba, algunas de las obras realizadas, como son las carreteras CP 26 De Los Villares (Carretera conexión de las aldeas y con Baja intensidad de tráfico, IMD estimado de 200 con un 7% de pesados) y CP 149 De Castro del Río a Cañate de las Torres (Carretera de unión de los pueblos, con baja intensidad de tráfico, IMD estimado 138 y 49% de pesados), fueron pioneras en el reciclado de firmes. Esta falta de experiencia provoco que el método de ejecución y sección proyectado no fuesen las más idóneas para la funcionalidad de estas carreteras. El análisis del estado debe servir para rectificar los errores cometidos y conseguir aprender de los mismos. Actualmente, pasados dos años de la reparación, las carreteras presentan problemas localizados y puntuales, en determinadas zonas, y siempre en las márgenes de la carretera, han aparecido ciertos blandones y asientos localizados. La falta de un cajeo para eliminar la franja de terreno que en origen no formaba parte del firme, o en su defecto, la falta de cordones de zahorra artificial de aportación, pueden ser las causas

de estos problemas. Se está reciclando un material que no correspondía con las características del que se había analizado perteneciente al firme. Este material presenta un contenido excesivo de arcillas limosas y su IP era muy superior al de las muestras tomadas del firme, lo que ha provocado que su reciclado con cemento no fuese el tratamiento idóneo, igualmente se han producido de forma puntual y a lo largo de la calzada, asientos localizados debido a la escasa capacidad portante del firme existente, la falta de homogeneidad del cimientado, presentando diferentes potencias de la capa de litosuelos se apoyaba sobre dicha roca, el funcionamiento haya sido perfecto, y en aquellos otros donde la profundidad era mayor, ha resultado insuficiente, transmitiendo elevadas cargas al cimientado inadecuado, produciéndose una rotura de la delgada base semirrígida.

La carretera CP 146 De Córdoba a Bujalance -1ª Fase. Esta carretera es básicamente agrícola, la comunicación de estos Municipios no es desde esta vía, sino desde un Autovía N IV y por la carretera Autonómica A306. Después de verano del 2000 se comenzaron a apreciar fisuras longitudinales en un 50% de la calzada coincidiendo que se localizaba a una distancia media de unos 80 – 100 cm del borde, tras varias visitas a esta tanto en verano como en otoño donde se vio que estas fisuras habían desaparecido, la conclusión a la que se llegó, basándose en la aparición de las fisuras al final del periodo seco, y su desaparición al principio del periodo húmedo, es que se trata de fisuras originadas por la respiración del terreno. Esto se explica, durante el verano, debido a su alto contenido en arcillas fue perdiendo la humedad y fue sometido a un proceso de retracción que se manifestó en la capa de firme produciendo esas pequeñas fisuras longitudinales, al principio de otoño, con la llegada de las lluvias, las mismas fisuras dejaron entrar el agua produciéndose el hinchamiento del suelo que traslada al firme produjo que las fisuras se cerraran, no se observaron en ningún caso fisuras en sentido transversal.

7.1.2. Experiencia en Teruel (España)

Los reciclados *in situ* con cemento suponen una alternativa de rehabilitación estructural para los firmes, especialmente en los flexibles que se encuentren deteriorados debido fundamentalmente al agotamiento por fatiga de las capas granulares y bituminosas que

las componen, tienen ventajas como son las económicas, ambientales y estructurales, son complementadas por la facilidad y rapidez de la ejecución en obra.

Este tipo de rehabilitación se ha utilizado recientemente en la carretera TE V 1331, en el tramo Andorra – Ventas de la Pintada (Teruel); más de medio tramo se realizó de nuevo trazado con sus desmontes y terraplenes.

El acondicionamiento de la carretera ha implicado tres actuaciones: modificación de la traza ensanche de la calzada y finalmente, rehabilitación estructural del firme, esta obra permite confirmar, una vez más, que el reciclado con cemento es una alternativa eficaz a las actuaciones refuerzo convencional, como ya se conocía, siendo la finalidad técnica del reciclado la de restituir las propiedades originales del material que se fresa o incluso mejorarlas, estas propiedades son básicamente:

- la capacidad estructural, vinculada a la resistencia mecánica (estabilidad);
- la resistencia a la acción del agua;
- la resistencia a la fatiga, parcial o totalmente consumida en el material original.

Los resultados obtenidos muestran que la calidad final del firme rehabilitación mediante un reciclado *in situ* en frío es análoga, cuando no superior, a la que se obtiene mediante los procesos convencionales, los valores para el módulo de rigidez de una mezcla reciclada con cemento puede llegar a 6000 – 7000 MPa, tras el correspondiente periodo de maduración de la mezcla.

Sin embargo, el dimensionamiento de firmes reciclados no es una tarea sencilla, ya que no existe un comportamiento caracterizado a la fatiga de un material tan heterogéneo, es por ello que para poder aproximar y optimizar una solución de este tipo debe de disponerse, como premisa fundamental, de la mayor información posible de partida (auscultación deflectometría, edad del firme, caracterización de los materiales, espesores de la capas, etc.), para así poder disponer de las herramientas disponibles, ya sean analíticas o de instrucciones o recomendaciones existentes, para definir una solución de reciclado.

El problema de la reflexión de la fisuración por retracción debe evitarse en todo momento, mediante la realización de juntas o cortes transversales en el material reciclado, pero operativamente es poco viables, para conseguir, pues no se debería efectuar un refuerzo de mezcla bituminosa, sobre capa de reciclado, con espesores inferiores a 8 cm, evitando así en lo posible la reflexión de las grietas en la superficie de rodadura, tal y como se hizo en la presente obra.

7.1.3. Reciclado con cemento de una Carretera de Montaña en Alicante (España)

Carretera CV 770 de Villajoyosa a la CV 70 por Sella, en la comarca de la Marina Baja, Alicante. La plataforma era estrecha entre 5 y 6 m, y el firme de la misma muy heterogéneo, con sucesivos tramos superficiales sobre una base de macadam y gran cantidad de parches localizados, el peralte solo existía en ciertas curvas muy singulares. Con el firme reciclado se han obtenido las ventajas siguientes:

- La mejora sustancial del trazado, se ha mejorado el perfil longitudinal al definir una rasante geométrizada, que no existía en el proyecto inicial, también se han ajustado los peraltes a la norma.
- Economía, se ha reducido en un 25% el coste para la administración del capítulo de firme.
- Estructural, el firme ejecutado es mucho más homogéneo que el previsto inicialmente, la recicladora realizaba una mezcla en profundidad y también un solape entre bandas de reciclado, en cuanto a la capacidad de la sección, se ha justificado su mayor competencia respecto a la del proyecto inicial.
- De plazo, el contratista ha cumplido los plazos contractuales, mejorando eventualmente los producidos con la opción del proyecto inicial.

Como inconveniente, tenemos principalmente las dudas y dificultades planteadas en la definición del nuevo firme y en el control de calidad, en cierto modo, y frente a alternativas más tradicionales, nos queda la incertidumbre en la interpretación de los resultados. Para concluir diremos, que se trata de un procedimiento constructivo atractivo y en carreteras de montaña con dificultad de obtención de materiales granulares y con la imposibilidad de cerrar la carretera al tráfico circulante, es un sistema, más ecológico, más rápido y según las circunstancias, mucho más barato, los resultados, de montaña, dos años después, son excelentes.

7.1.4. Experiencia en el reciclado *in situ* de firmes con cemento en carreteras regionales de Castilla y León

Experiencias llevadas a cabo en la provincia de Palencia (España) por parte de la Consejería de Fomento de la Junta de Castilla y León, a través del Servicio Territorial de Fomento en Palencia. Estas actuaciones han tenido lugar en carreteras de baja intensidad de tráfico (menos de 250 vehículos día, con un porcentaje de pesados inferior

al 10%), con claras puntas estacionales al ser zonas eminentemente agrícolas, con un firme muy antiguo formado por macadam recebado de espesor variable.

La nota común en todas las actuaciones realizadas ha sido la utilización de un tren de trabajo compuesto por el mezclador de suspensión agua-cemento marca Wirtgen WM400 y una recicladora Wirten WR2500.

Una vez realizados casi 80000 metros lineales por la Junta de Castilla y León, lo que ha supuesto una gran inversión económica, los técnicos han llegado a la conclusión:

- El reciclado *in situ* con cemento es una solución adecuada para la rehabilitación de firmes antiguos a base de macadam y diversos tratamientos superficiales, en vías de baja intensidad.
- Esta operación puede considerarse económica para la conservación.
- Se debe de prestar especial atención en el riego de curado, con el fin de evitar desecaciones.
- A la hora de determinar el espesor y anchura del reciclado se debe tener en cuenta las bermas, compuestas con materiales no adecuados para formar firme, puede dar lugar a fallo.
- Un inadecuado control diario de la humedad del terreno, provoca de la resistencia a compresión de las mismas.
- Siempre que sea posible realizar los trabajos sin tráfico en zonas recién tratadas.
- Mínimo impacto ambiental, se aprovechan los materiales, no crea vertederos.

El buen resultados obtenido en la obras realizadas en la provincia de Palencia, ha animado a la Junta de Castilla y León a adjudicar dos nuevos tramos.

7.1.5. Experiencias en el reciclado con cemento de Vías de Baja Intensidad de tráfico en Jaén (España)

Las obras se realizaron en las carreteras JV 2334 Villardompardo – Fuente del Rey, JV 3131 Úbeda – Aguas Blanquillas y Camino de Lupión a Guadalimar, en esta provincia la particularidad de los materiales o recursos de la zona es su comportamiento arcilloso de los terrenos.

Como ya hemos dicho anteriormente, el reciclado *in situ* con cemento es un técnica que ofrece tres tipos de ventajas: Técnicas, Económicas y Ecológicas, como ventajas técnicas podemos decir que el reciclado permite rehabilitar un firme fatigado, deformado e inadaptado al tráfico que debe soportar, a través del mismo es posible

obtener una capa tratada homogénea y estable, con unas características mecánicas similares a la de un gravado, se evita la reducción de los anchos de calzada al no tener que elevar la rasante actual, y se reducen al mínimo las perturbaciones causadas por las operaciones de construcción a las demás capas del firme existente, y el daño causado a otros tramos de carretera por el paso de la maquinaria de obra.

Dentro de las ventajas económicas podemos citar que es una técnica en frío y que en consecuencia consume poca energía, supone un importante ahorro, al reducir al mínimo el volumen necesario de nuevos áridos a utilizar en la obra y el costo de su transporte, conviene recordar a este respecto, la dificultad cada vez mayor de encontrar suministros de áridos de calidad no demasiado alejados de las obras, esta gran reducción en el transporte de áridos contribuye a la conservación de la red de caminos y carreteras situada en las proximidades de la obra. Como ventaja ecológica, al ser una técnica en frío, se disminuyen notablemente la contaminación y las emisiones de vapores nocivos, y la reutilización de materiales *in situ* reduce el volumen de áridos que hay que extraer de yacimientos.

Con la puesta en marcha de la ejecución de estos proyectos se quiere establecer un punto de partida para la aplicación de esta Técnica, de forma que podamos optimizar tanto los recursos naturales como la posibilidad de poder rehabilitar en un futuro la mayoría de los caminos y carreteras, aprovechando los materiales existentes y respetando los anchos de calzada sin aportar espesores de calzada que irían en detrimento del ancho actual.

7.1.6. Experiencia *in situ* de firmes con cemento: en dos carreteras locales de Castilla y León (España)

Experiencia en la carretera SG 321 del cruce con NVI a Muñopedro y SG 322 del cruce con N110 a Muñopedro, ambas en la provincia de Segovia, obras en agosto del 2000 y febrero 2001, carreteras locales pertenecientes a la Red de carreteras de Castilla y León. El objetivo principal fue el refuerzo y renovación del firme que se encontraba muy deteriorado. Para el estudio y diseño del firme se realizó una campaña de auscultaciones, obteniendo deflexiones cada 100 m, en tramos con deflexiones inferiores a 200 (1 / 100 mm), se consideró un refuerzo de 5 cm de mezcla bituminosa en frío y en tramos con deflexiones superiores se consideró un reciclado *in situ* con

cemento en un espesor de 25 cm. Este proceso de reciclado nos ha permitido obtener un firme con una base de características mecánicas y resistentes sensiblemente mejores y un coste sensiblemente menos al que corresponde si esta base se hubiera construido sobre el firme existente.

Entre las conclusiones más interesantes que se han desprendido de los trabajos realizados están las siguientes:

- El reciclado es una técnica muy competitiva en coste frente a soluciones de refuerzo convencionales, máxime si añadimos los costes ambientales.
- El reciclado es una técnica suficiente desarrollada para utilizar en distintos tipos de carreteras.
- El reciclado es una técnica bastante más rápida, y por tanto con menos molestias al usuario de la carretera, que otras alternativas de reconstrucción.
- El reciclado mantiene la cota de rasante antigua con la eliminación de problemas en las anchuras de las obras de fábrica.

7.1.7. El Reciclado con cemento en las vías de Baja Intensidad de Tráfico

Aplicaciones a la Red de carreteras de la Junta de Castilla y León (España).

La relación de 32 tramos de reciclado, con una longitud total aproximada a los 350 km en vías de baja intensidad de tráfico (intensidad media inferior a 100 vehículos pesados por día y carril), junto con los proyectos ya realizados para la iniciación de otros 100 km, arrojan una considerable experiencia en la aplicación de dicha técnica que resuelve correctamente los requisitos exigidos, por otro lado, es una técnica con importantes ventajas ambientales, perfectamente respetuosa con el entorno, de fácil aplicación.

7.2. Experiencias en la ejecución de estabilizaciones y suelocemento de Extremadura

La utilización de capas de materiales tratados con cemento se ha venido realizando en las obras de la Demarcación de Carreteras del Estado en Extremadura muy paralelamente a su introducción y desarrollo por la normativa técnica, a principio de los años 90, varios tramos de la Autovía de Extremadura, incorporaban en su paquete de firmes subbases de suelocemento, herederas de la tradición la Autovía de la Plata y la Autovía

Trujillo – Cáceres, han mantenido en su diseño explanadas mejoradas y subbases de suelocemento. Dado que los aspectos generales sobre la ejecución de estas unidades ya han sido abordados en este documento, el objetivo del presente punto se centra en resaltar los resultados que se pueden alcanzar en los ensayos de control.

La principal conclusión a que se llega es que los tratamientos con cemento proporcionan una mejora sustancial de las propiedades mecánicas del material, pero debido a los procedimientos actuales de mezclado, se detecta una relativa dispersión en los resultados de auscultación. Esta situación obliga a una cuidada elección de los contenidos de cemento para asegurar el cumplimiento de las resistencias exigidas a la mayor parte del material.

En esa misma línea, la fabricación de suelocemento *in situ* puede conllevar mayores dispersiones que en el caso de hacerlo en central, con los riesgos que ello conlleva para esta capa de alta sensibilidad estructural.

En las vías de alta capacidad parecen indiscutibles las ventajas que presenta el suelocemento frente a una capa de material granular, salvo quizás en situaciones puntuales de ejecución en zonas de elevada pluviometría.

Los tratamientos con cemento proporcionan una mejora sustancial de las propiedades mecánicas del material, pero debido a los procedimientos actuales de mezclado se detecta una relativa dispersión en los resultados de auscultación.

Ante ello, se aconseja que en la adopción de la fórmula de trabajo se asegure una cantidad de cemento, que aunque siga manteniendo dispersiones en los resultados, garantice las resistencias exigidas a la mayor parte del material.

La fabricación de suelo cemento *in situ* puede conllevar mayores dispersiones que en el caso de hacerlo en central, con los riesgos que ello conlleva para esta capa de alta sensibilidad estructural.

En esta comunidad se describe varias experiencias diferentes de tratamientos con cemento desarrolladas en Extremadura por tres Organismos distintos (Consejería de Obras Públicas, Consejería de Agricultura y Diputación de Badajoz), en las que se han reciclado firmes existentes, se han estabilizado explanadas o se han ejecutado *in situ* subbases tratadas con cemento, en todos los casos, la subbase se ha completado con capas de aglomerado en caliente de diferentes calidades y ha supuesto un ahorro económico para la obra, mejorando la calidad del firme proyectado inicialmente, la nota

común en todas estas realizaciones fue la utilización de equipos Wirtgen WR 2500 y XIM 400 y como conglomerante el cemento tipo CEM IV-B 32.5.

Hay que resaltar que estas son las primeras experiencias realizadas por estos organismos y su éxito ha posibilitado que se estén utilizando en otras obras y que los proyectos que se están elaborando, consideran estas técnicas de estabilización y reciclado de forma asidua, además se añade la circunstancia de la mayor escasez y aumento de precio de materiales granulares de graveras o canteras y la decisión de la Consejería de Medio Ambiente de ir restringiendo cada vez más la autorización de nuevos yacimientos.

Esto augura un importante auge de estas técnicas que aprovechan al máximo los recursos disponibles en una comunidad como Extremadura que ha hecho de la protección del medio ambiente una de sus principales prioridades.

En el presente documento, se presentan experiencias en estabilización y reciclado en una comunidad que no se ha caracterizado por el impulso de las distintas administraciones hacia estas técnicas.

Cabe realizar la excepción de los servicios territoriales del Ministerio de Fomento en esta Comunidad que se han empleado estas técnicas al compas de experiencias coetáneas en el resto del país, y por esto, nosotros nos basaremos en las experiencias con el resto de administraciones que prácticamente coinciden con las llevadas a cabo por la empresa Joca.

Hay que hacer e interés demostrado por estas empresa ha conseguido romper las reticencias iniciales y estrenar estas técnicas en las administraciones regionales y provinciales implicadas, afortunadamente, los resultados han sido satisfactorios en todos los casos, consiguiendo que hoy día resulte bien recibido algún planteamiento de este tipo en las administraciones mencionadas.

Hay que hacer que estas reticencias iniciales tenían una justificación en experiencias anteriores de estabilización *in situ* con cemento o cal utilizando gradas que habían resultado nefastas (una de las carreteras que se realizo estabilización con gradas fue en la EX 372 Tramo Portezuelo – Acehúche, dada las características arcillosas de parte de su trazado, y no profundizando las gradas más de 20 o 25 cm, ni realizando la dosificación correcta por metro cuadrado de material, la experiencia fue muy mala, el contratista Carija, al poco tiempo de terminar la obra realiza un refuerzo e gran espesor,

dando origen a una gran capa de mezcla bituminosa en caliente, de más de 25 cm y grandes escalones en los bordes de explanado, lo que aumento los costes de la obra y a largo el plazo de entrega de la misma), estas actuaciones se habían realizado sin tener en cuenta la diversidad de suelos que existían en esta región y el diferente comportamiento que cada uno tenía en una estabilización, se había creado cierta psicosis hacia los tratamientos con conglomerantes hidráulicos hasta el punto de estar prácticamente desechados por los proyectistas y no ser bien considerados en las propuestas variantes de la licitaciones.

La Comunidad de Extremadura tiene unas peculiaridades climáticas y geológicas que es preciso considerar al tratar estas técnicas. Esta región situada en la franja Oeste de la Península Ibérica, limitada por Portugal (Alentejo), Andalucía, Castilla la Mancha y Castilla León representa una extensión de aproximadamente 40000 Km² de superficie divididas en dos provincias, Cáceres y Badajoz, con bajas tasas de población.

Esta situación geográfica interior determina un clima continental seco y extremo con grandes variaciones térmicas entre Verano e Invierno y prácticamente desaparición de las estaciones intermedias de Primavera y Otoño, se podía afirmar que únicamente se perciben dos estaciones largas Verano e Invierno con características antagónicas y muy determinantes a la hora de considerar la ejecución de una obra.

Esta región está articulada por dos autovías a modo de cruz que la cruzan de Este a Oeste (N – V), y de Norte a Sur (Autovía de la Plata A 66 - N 630) que absorben las mayores demandas de tráfico (T0 y T1, superiores a 800 IMD pesados).

En segunda estancia, existe una red de carreteras regionales y comarcales que comunican las poblaciones de la región con estas dos vías principales en las que el tráfico baja notablemente a intensidad inferior a IMD pesados 100, salvo my contadas excepciones.

Estas características determinan los criterios de diseño de esta red de carreteras regionales en la cual se han llevado a cabo las experiencias mencionadas.

7.2.1. Experiencia 1ª: Carretera EX 324 de Alburquerque a Herreruela

Cliente: Consejería de Obras Publicas de la Junta de Extremadura.

Esta experiencia llevada a cabo en el año 1998 consistió en construir una subbase de 20 cm de suelo estabilizado sobre una explanada E 3 CBR > 20.

Esta zona, está en pleno macizo granítico entre las Sierras de Alburquerque y San Pedro y resultaba propicio el empleo de granito descompuesto Jabre, como suelo.

Se construyó una explanada E3 con este material de gran calidad que esta zona alcanza un CBR de entre 25 y 35, y posteriormente se aporta este mismo jabre para formar la capa de 20 cm a estabilizar con la maquina WIRTGEN WR – 2500. En los ensayos previos de dosificación utilizando cemento IV-B-32.5 se fijo un porcentaje de 3.5% de cemento en peso y se detecto una gran sensibilidad de resultados en función de la humedad, con el fin de garantizar la homogeneidad de resultados se acordó aportar al suelo un 15% de gravilla artificial de tamaño 12 a 40 mm para mejorar el esqueleto del material, facilitar la compactación y garantizar las resistencias.

Se estabilizan con esta técnica 23 Km de carretera con resultados satisfactorios consiguiendo resistencias a 7 días entre 2.7 y 3.2 Mpa, se mantuvo cortada al tráfico durante 14 días para evitar la rotura del material.

7.2.2. Experiencia 2º: Carretera Local y camino agrícola entre Alcornera y La Lapa

Cliente: Consejería de Agricultura. Junta de Extremadura.

Esta actuación resulto muy interesante por la circunstancia del tipo de suelo utilizado pero, además porque constituyo la 1ª experiencia de este organismo y ha servido para abrir paso a esta técnica en su campo muy propicio, son numerosas las actuaciones de caminos agrícolas que se realizan y es fundamental en el diseño el aprovechamiento de los materiales de la zona evitando canteras o extracciones, estas cualidades las aportan precisamente los métodos de estabilización y reciclado *in situ*. Es este caso, hablemos de una carretera de 4 Km en una zona con abundancia de suelos de pizarra que presentan unos índices de plasticidad IP de entre 5 y 7, desgaste de los Ángeles NLT 149 de entre 20 y 25 y un % de finos inferior al 5%.

Con este material pretendíamos diseñar una subbase estabilizada con cemento entre unas explanada E 2 de esta misma pizarra y unas capas de rodadura de mezcla bituminosa en caliente, los ensayos propias aconsejaban una dosificación en cemento del 3.5% al 4% y pretendíamos no ir a resistencias altas sino simplemente entrar en el abanico de 1.5 y 2.5 Mpa a los 7 días.

Se construyó esta subbase de 20 cm con la maquina WIRTGEN WR-2500 y una dosificación de 3.75% en el tipo IV; esperábamos expectantes los resultados pues el tipo

de suelo empleado ya había resultado nefasto en ocasiones y arrastraba una cierta Leyenda negra entre los técnicos de esta región.

Las roturas de probetas a 7 días confirmaron nuestro acierto al acotarse todos los resultados entre 1.7 y 2.1 MPa dándonos por satisfechos en estos niveles de resistencia para este suelo y confirmando una vez más la bondad de este tipo de maquinaria en la mezcla y homogenización de suelos.

7.2.3. Experiencia 3ª: Carretera Provincial Aceuchal – Villafranca

Cliente: Diputación Provincial de Badajoz.

Esta experiencia constituyó la primera vez que estas técnicas se emplearon en el Organismo Provincial.

La Diputación de Badajoz tiene a su cargo una extensa red de carreteras comarcales de escaso tráfico y muy determinadas.

En el año 1998 licito a concurso la adecuación y mejora de 40 carreteras con un global de cerca de 500 Km a tratar. La actuación planteada consistía únicamente en mejora de firme a base de refuerzos de aglomerado y lechadas bituminosas y algún ensanche de arcenes en el mayor tráfico, la empresa Joca, se presentó a la licitación ofertando como proyecto variante el reciclado del firme existente en la carretera mencionada, resultando adjudicataria de las obras.

El trabajo consistía en el ensanche de arcenes con zahorras artificiales y posterior reciclado con la WIRTGEN WR 2500 de todo el ancho de plataforma en 18 cm de profundidad utilizando una dosificación en cemento del 3%, a continuación recibiría una capa de aglomerado asfáltico en caliente como rodadura. Este tratamiento tenía la dificultad de la heterogeneidad de materiales a tratar, pues si en los arcenes estaba claro que estábamos trabajando con una zahorra artificial aportada por nosotros y perfectamente identificada, no ocurría lo mismo en el centro de plataforma donde existían zonas de sucesivos refuerzos en aglomerado en frío o lechadas y otras zonas donde afloraba directamente el macadam originario de la carretera. Además estas heterogeneidades variaban el apoyo a considerar como explanada en cada zona previamente comportamientos distintos según el punto de la plataforma.

A la vista de los resultados de los ensayos de dosificación realizados sobre la zahorra artificial aportada en los arcenes y extrapolando al resto de la plataforma, se adoptaron

los 18 cm como profundidad aconsejable y el 3% de dosificación en cemento tipo IV, el proceso de ejecución no presento ninguna problemática especial mejorando incluso la homogeneidad el efecto de compensación transversal que hace la maquina en el ancho del tambor en la zona de arceles, los resultados de resistencia a 7 días fueron dispares, partiendo siempre de un mínimo de 2.0 MPa pero llegando en algunas zonas a 4.5 y 6.5 MPa, se mantuvo cortado el tráfico durante 10 días, y se colocaron las mezclas de aglomerado asfaltico utilizando betún modificado.

Manteníamos la duda del resultado final sobre todo a la vista de las resistencias obtenidas, sin embargo, no ha llegado a reflejarse agrietamiento por retracción en la plataforma, únicamente se produjo una grieta longitudinal en una zona en el punto de unión del ensanche del arcén con la plataforma a un defecto del reciclado, se podría haber producido igualmente con la ejecución del refuerzo convencional, en el fondo, todas las partes intervinientes quedaron satisfechas del resultado final a la vista de las dificultades que planteaban a priori.

7.2.4. Experiencia 4ª: Carretera Provincial Oliva de Mérida – Villagonzalo

Cliente: Diputación Provincial de Badajoz.

Este caso es similar al primero expuesto pero aporta la singularidad de ser un suelo tolerable distinto, esta carretera discurre en las inmediaciones del Rio Guadiana y condiciona la posibilidad de utilizar un material granular a modo de zahorra natural con un IP de 5, esta carretera se diseña con una explanada E 3 CBR > 20, una subbase estabilizada de 24 cm y aglomerado en caliente en intermedia y rodadura.

En los ensayos previos se determino una dosificación de cemento del 3% aunque en el momento de la ejecución se subió al 3.5 % por recomendación del laboratorio de Diputación.

La ejecución se llevo a cabo en una plazo corto de 2 días para los 30000m² a tratar utilizando una maquina WR 2500 de último modelo y nueva.

La plataforma ha permanecido cortada al tráfico 2 semanas y la rotura de probetas ha disparado los resultados por encima de 4 MPa en todos los casos y estando la media en 6 MPa.

Seguramente, no solo no debíamos haber subido el cemento en medio punto, sino habernos replanteado utilizarlo por debajo del 3% en virtud del importante esqueleto que tenía el suelo con una granulometría muy continua, la ejecución se hizo 30 días

después y no ha generado hasta el momento ningún problema de fisuración, sin duda hemos tenido un material excelente para una estabilización con cemento.

7.2.5. Conclusiones de las Experiencias en Extremadura

Estas experiencias han constituido la punta de lanza de estas técnicas en Organismos de carácter regional. Todas han sido llevadas a cabo por empresas pioneras, que ha hecho de la implantación de esta técnica en Extremadura un empeño constante a la vista de la ventaja económica que representa para el contratista y la Administración, aportando un plus de calidad si se ejecuta con rigor.

Actualmente, se puede considerar que los organismos públicos mencionados ya conocen la técnica y no tienen reparos en la aplicación por lo que animo a las empresas a los proyectistas a usar esta técnica.

7.3. Obra Nueva. Carretera EX 346 Quintana de la Serena (Badajoz – España)

La técnica utilizada en la Obra Nueva, fue el suelocemento de planta y presento en este punto los tipos de ensayos, muestras, formulas de trabajo, roturas, tratamientos de los resultados, fotos, etc.

7.3.1. Situación de las Obras

Quintana de la Serena está situada en el corazón de la comarca de La Serena, al suroeste de la provincia de Badajoz. Se asienta sobre un batolito granítico y los únicos accidentes orográficos que presenta son las sierras de Agalla y Arroza, sierra de los Vuelos y sierra del Recorvo con 650 m.

El clima es de tipo mediterráneo subtropical con temperaturas suaves. Las dehesas de encinas constituyen uno de los principales comederos de la grulla común que invernana en La Serena.

SUPERFICIE TÉRMINO: 115,3 KM.

DISTANCIA CAPITAL: 140 KMS.

PROVINCIA: Badajoz.

La población de Quintana de la Serena está actualmente en 5.347 habitantes, la cual en los últimos años está manteniendo una dinámica de crecimiento, que no es ajena a la gran vitalidad económica de la localidad, y que se traduce en una total ausencia del fenómeno migratorio, un mayor índice de nacimientos, con el rejuvenecimiento de la población al que conlleva, así como el aumento del “efecto retorno” de emigrantes.

La estructura económica de la localidad gira en torno a las canteras de granito, de las cuales se extrae la variedad denominada “Gris-Quintana”, de gran calidad, utilizado tanto en construcción como en la decoración (José Ruíz Garmendia, 2013).

7.3.1.1. Estudio Geotécnico de la zona

El presente documento, tiene por finalidad el estudio de las características geotécnicas de los materiales y terrenos atravesados por La carretera EX-346 (tramo desde el cruce con la EX - 348 a Quintana de la Serena.) de forma que se clasifiquen y valoren los materiales presentes. Para ello nos basamos en las observaciones realizadas por personal técnico, en el lugar de las obras y en la cartografía geológica existente.

La zona de las obras se encuentra situada en la provincia de Badajoz, concretamente en la comarca de la Comarca de la Serena. Sita a 87Km al Sur-Este de Mérida, entre las localidades de Villanueva de la Serena y Quintana.

El tramo objeto del proyecto abarca desde la intersección con la EX-348 (carretera de Magacela) hasta Quintana de la Serena, con una longitud aproximada de 15 Km.

Marco geológico general.

A gran escala, la zona de estudio se encuadra en el sector centro-occidental de la submeseta sur, más concretamente al sur del río Guadiana, en el límite norte de la comarca conocida como “La Serena”.

De las distintas zonas en que ha sido dividido el macizo Hercínico o Hespérico son dos las presentes en la comunidad extremeña, la zona Centro Ibérica y la zona de Ossa-Morena. El área de estudio se encuentra en la Zona Centro Ibérica. Al Sur, fuera de la zona de estudio se encuentra la denominada Zona de Ossa-Morena.

Litología del área en estudio

Se ha determinado la existencia de distintos tipos de materiales en las inspecciones prospecciones de campo realizadas sobre la traza.

Los materiales presentes se disponen en la siguiente sucesión:

COLUMNA ESTRATIGRAFICA GENERAL del área de estudio:

- Glacis degradado / Glacis (Q).
- Aluvial / Coluviones (Q).
- Metacalizas, mármoles y calcoesquistos (Unidad S^a de la Lapa – Ord. Med-Sup.) No se ha identificado de forma clara en las prospecciones realizadas por tratarse de una unidad de baja extensión superficial.
- Pizarras negras, filitas violáceas o grises, pizarras arenosas moscovíticas (Unidad S^a de la Lapa – Ord. Med-Sup.).
- Leucogranitos de dos micas (Macizo de La Haba).
- Granito de dos micas con megacristales (Macizo de La Haba).
- Granodiorita biotítica horblendica (Macizo de los Pedroches).
- Leucogranitos (Macizo de los Pedroches). Se encuentra muy meteorizado (grado de alteración mayor de IV e inhumado por materiales cuaternarios de recubrimiento).
- Diques de Cuarzo.

Así, para el mejor entendimiento de la distribución y disposición de los materiales de la traza se agrupan según sus características litológicas en cuatro grupos:

1. Materiales metasedimentarios de edad Paleozóico Inferior.
2. Macizo Plutónico de La Haba.
3. Macizo Plutónico de Los Pedroches.
4. Materiales recientes de recubrimiento (Cuaternarios –Q).

Hidrología

La zona de estudio pertenece en su totalidad a la cuenca del río Guadiana, siendo el río Ortigas la arteria principal existente en la zona de actuación. Aparte, existen múltiples arroyos que vierten sus aguas a dicho río por ambas márgenes.

La escorrentía superficial viene marcada tanto por el grado de infiltración en el subsuelo como por la existencia de pendientes naturales que actúan conduciendo la escorrentía hacia los colectores naturales que son los cauces fluviales.

En este caso se debe señalar que en la zona se encuentra una red de drenaje bien jerarquizada y desarrollada, donde el río Ortigas constituye el principal cauce colector en la zona. A pesar de todo pueden existir algunas zonas de escasa superficie que funcionan como áreas semi-endorreicas, donde en épocas de lluvias abundantes pueden darse encharcamientos temporales. Estas áreas de escaso drenaje natural suelen estar directamente ligadas a vaguadas de pequeños cauces o zonas de bajas pendientes. Esto condiciona un drenaje favorable, que únicamente en puntos localizados puede pasar a aceptable.

Hidrogeología

La zona estudiada entraría en lo que tradicionalmente se conocen como formaciones impermeables, constituida por materiales que forman el zócalo cristalino Hercínico (materiales metasedimentarios y macizos ígneos intrusivos). Los materiales cuaternarios de recubrimiento que pueden presentar un cierto comportamiento acuífero están escasamente representados en zonas de vaguada en las proximidades de los cauces así como en mantos de alteración de los macizos ígneos.

Campaña de campo

La campaña de campo realizada ha consistido en una inspección visual del recorrido del trazado delimitando las distintas formaciones atravesadas por este, así como una campaña de cateo sistemático distribuida por toda la longitud del trazado. En estas calicatas además de proceder al levantamiento del perfil geológico de los materiales encontrados en el subsuelo se ha procedido a la toma de muestras representativas de los distintos materiales que se han encontrado. Estas muestras se han trasladado al laboratorio para la posterior realización de los correspondientes ensayos geotécnicos.

Los materiales encontrados en el trazado son los que anteriormente se han expuesto en la columna estratigráfica de la zona. Además, el espesor de los niveles de alteración de los materiales rocosos y de las formaciones de cobertera recientes (aluviones cuaternarios) reflejado en las fichas de las calicatas que se acompañan cabe indicar su distribución longitudinal sobre el trazado.

Tramo:

Del P.K. 0+000 al P.K.2+700: Macizo Plutónico de la Haba

Del PK. 2+700 al P.K.2+900 (Río Ortigas): Cuaternario (Aluvial)

Del PK. 2+900 al P.K.6+500: Macizo Plutónico de la Haba.

Del PK. 6+500 al P.K.9+100: Materiales metasedimentarios del Paleozoico Inferior.

Del P.K.9+100 al P.K.12+500: Macizo plutónico de Los Pedroches con recubrimientos aluviales cuaternarios.

Del P.K.12+500 al P.K.15+000: Macizo plutónico de Los Pedroches.

Conclusión

En conclusión, se ha podido comprobar que la traza discurre sobre materiales correspondientes a la zona Centro Ibérica, una de las que componen el macizo Hercínico Ibérico o Hespérico. Así la mayor parte del recorrido se establece apoyándose sobre materiales correspondientes al zócalo cristalino hercínico (en tres zonas litológicas diferenciadas), y en menor proporción sobre materiales de cobertura de edad reciente (Cuaternario).

Así, los materiales sobre los que se apoya la traza se encuadran dentro de alguno de estos cuatro grupos:

- Materiales metasedimentarios de edad Paleozoico Inferior.
- Macizo Plutónico de La Haba.
- Macizo Plutónico de Los Pedroches.
- Materiales recientes de recubrimiento (Cuaternarios – Q).

Procedencia de los materiales:

Préstamos

En función de la descripción de los terrenos atravesados por la traza se pueden establecer dos posibles zonas de préstamos que coinciden con los dos macizos plutónicos de a Haba y los Pedroches.

Estas zonas presentan suelos de buena calidad que se podrán clasificar como adecuados y seleccionados.

La propia traza de la carretera podrá suministrar este tipo de materiales, al menos para la construcción de los terraplenes o rellenos.

En caso de necesidad de material para la explanada (suelo estabilizado) se podrá complementar el suelo obtenido de la traza con préstamos específicos.

Visitada la zona del proyecto, se observa que el relieve alomado del tramo correspondiente al Macizo de la Haba presenta formaciones superficiales de granitos descompuestos (jabres) de potencia variable, susceptibles de ser explotada como préstamos.

En el estudio geotécnico realizado se han tomado catas y realizado ensayos de caracterización de varias zonas.

Canteras

La zona de obras se halla en una posición intermedia entre las canteras de roza industrial de Quintana de la Serena (Granitos de Quintana) y gravera silíceo de Don Benito y Villanueva de la Vega del Río Guadiana.

Las graveras del Guadiana en la zona de Don Benito – Villanueva, son de árido silíceo, y fabrican tanto zahorra artificial como áridos para mezcla bituminosa en caliente y hormigones.

Las explotaciones graníticas de Quintana de la Serena tienen una larga tradición de funcionamiento como productoras de roca industrial. Son generalmente explotaciones de mediano o pequeño tamaño ubicadas al norte del núcleo urbano.

El paisaje está conformado por grandes superficiales salpicadas por las distintas explotaciones en las que se diferencia los frentes de cantera y los acopios de material de

rechazo. Este material de rechazo supone un serio problema por su impacto paisajístico, ocupación de suelo y sobrecoste de su retirada.

En los últimos años los propios canteros, apoyados por las corporaciones locales y la Junta de Extremadura, han implantado un sistema de retirada de estos restos inertes que no consiste en otra cosa sino en la fabricación de zahorra artificial y áridos a partir de esa matriz granítica. Para ello se han dotado de instalaciones móviles de clasificación y machaqueo de árido.

Estas explotaciones presentan el inconveniente de que su materia prima no se ha tratado para este uso, por lo que los acopios pueden ser heterogéneos o presentan elementos contaminantes no deseados. La utilización de los mismos requiere por tanto el estudio y caracterización previa de acopios.

En la siguiente relación, se recogen las principales empresas dedicadas a la explotación de áridos y producción de hormigones en donde se ubican las obras:

ASFALTOS LOS SANTOS
GRAVERA “CONTRERAS” DON BENITO
CTRA. EX -106 – KM 1,7

HORMIGONES RODRÍGUEZ S.A.L.
06400-DON BENITO BADAJOZ

HORMIGONES CEREZO
06700-VILLANUEVA DE LA SERENA BADAJOZ

ÁRIDOS Y HORMIGONES FELIPE SIERRA E HIJOS, S.L.
PLANTA DE ÁRIDOS DON BENITO
CTRA. N-430 – KM 107
DON BENITO BADAJOZ

ARIDOS ANASTASIO PEDROSA GARCIA
06700-VILLANUEVA DE LA SERENA BADAJOZ

ARIDOS JUAN MARTIN HORMIGONES Y ARIDOS

06950-VILLAGARCIA DE LA TORRE BADAJOZ

ARIDOS JUAN MARTIN MATIAS

06249-CALZADILLA DE LOS BARROS BADAJOZ

ARIDOS ARICESA

06700-VILLANUEVA DE LA SERENA BADAJOZ

ARIDOS ENTRERRIOS S.L.

06400-DON BENITO BADAJOZ

ARIDOS CONTRERAS S.L.

06400-DON BENITO BADAJOZ

ARIDOS GALLARDO S. L.

06460-CAMPANARIO BADAJOZ

Y 06430-ZALAMEA DE LA SERENA BADAJOZ

ARIDOS HERMANOS HERRANZ CATALINA S.L.

06700-VILLANUEVA DE LA SERENA BADAJOZ

ARIDOS QUINTANA

06420-CASTUERA BADAJOZ

ARIDOS DE LA DEHESA DE QUINTANA S.A.

06450-QUINTANA DE LA SERENA BADAJOZ

7.3.1.2. Estudio del Tráfico

De los datos existentes se puede deducir que las vías que mayor tráfico soportan, son la EX-104 y EX-436 con IMD en los accesos a Villanueva de la Serena de 5.000 veh./día y 2.300 veh./día.

La EX-104 disminuye su tráfico en un 15% pasado la Coronada y en Campanario se reparte entre la EX-349, EX-104 y EX-115 en proporciones diversas.

La carretera EX-346 soporta tráfico algo superiores a 2.000veh/día, con una leve disminución tras su cruce con la EX-348.

La carretera BA-057 (sale de La Guarda) presenta IMD muy baja, según el aforo facilitado por la Diputación de Badajoz de 87veh/día, (con seis pesados al día) por lo que no influye apenas en el reparto de tráfico.

Cabe destacar el mayor índice de pesados de la EX-114 al sur de Quintana (recordemos la presencia de numerosas canteras de roca industrial de la zona, principal actividad económica de Quintana de la Serena), porcentaje que disminuye hacia el Norte.

Esto puede ser debido a que el mal estado de la EX-346 hace que se desvíe dicho tráfico por la EX-115 de forma que para acceder el corredor del norte de la N-430 y EX-A2 pasen por Campanario y La Coronada en vez de hacerlo directamente por la EX-346. Hecho éste constatado por las autoridades locales.

De hecho al observar el plano de estaciones de aforo 2007 se comprueba el tráfico pesado Quintana de la Serena – Campanario se deriva prácticamente en su totalidad hacia La Coronada.

Evolución del Tráfico

En la tabla 7.1 se presenta a continuación la evolución del tráfico del corredor de la EX-346.

Tabla 7.1- Evolución del Tráfico EX 346.

	Estación BA-1673	ligeros	pesados	incremento anual	
	total			total	pesados
2002	2007	1800	207		
2003	2199	2002	197	10%	-5%
2004	2199	2002	197	0%	0%
2005	3035	2793	242	38%	23%
2006	2103	2040	63	-31%	-74%
2007	2295	2212	83	9%	32%

	Estación BA-1412	ligeros	pesados	incremento anual	
	total			total	pesados
2002	2319	2088	231		
2003	2459	2238	221	6%	-4%
2004	2294	2157	137	-7%	-38%
2005	1690	1589	101	-26%	-26%
2006	2206	2052	154	31%	52%
2007	2010	1887	123	-9%	-20%

	Estación BA-1423	ligeros	pesados	incremento anual	
	total			total	pesados
2002	1598	1423	175		
2003	1654	1473	181	4%	3%
2004	1654	1473	181	0%	0%
2005	788	765	23	-52%	-87%
2006	1882	1732	150	139%	552%
2007	1966	1817	149	4%	-1%

	Estación BA-1433			incremento anual	
				total	ligeros
2002	474	342	132		
2003	473	346	127	0%	-4%
2004	473	346	127	0%	0%
2005	473	346	127	0%	0%
2006	1884	1734	150	298%	18%
2007	2344	2232	112	24%	-25%

Se observan varias discordancias, a partir del análisis de la Tabla 7.1:

BA-1673: Los años 2003 y 2004 tienen las mismas lecturas.

El año 2005 se produce un incremento exagerado.

BA-1412: El año 2005 se observa una alta disminución.

BA-1423: Los años 2003 y 2004 tienen las mismas lecturas.

El año 2005 se observa una disminución exagerada.

BA-1433: Los años 2003, 2004 y 2005 presentan las mismas lecturas.

Por estas causas a efectos de cálculo, se desechan las lecturas de los años 2004 y 2005, obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2- Aforamiento tráfico

	Estación BA-1673			incremento anual		comparación 2002-2007	
				total	pesados	total	pesados
2002	2007	1800	207				
2003	2199	2002	197	10%	-5%		
2006	2103	2040	63	-4%	-68%		
2007	2295	2212	83	9%	32%	14%	-60%

	Estación BA-1412			incremento anual			
				total	pesados		
2002	2319	2088	231				
2003	2459	2238	221	6%	-4%		
2006	2206	2052	154	-10%	-30%		
2007	2010	1887	123	-9%	-20%	-13%	-47%

	Estación BA-1423			incremento anual			
				total	pesados		
2002	1598	1423	175				
2003	1654	1473	181	4%	3%		
2006	1882	1732	150	14%	-17%		
2007	1966	1817	149	4%	-1%	23%	-15%

	Estación BA-1433			incremento anual			
				total	ligeros		
2002	474	342	132				
2003	473	346	127	0%	-4%		
2006	1884	1734	150	298%	18%		
2007	2344	2232	112	24%	-25%	395%	-15%

Con os datos de la Tabla 7.2. se observan grandes vaivenes de tráfico.

Comparando el primer y último año de la serie se observa una disminución de vehículos pesados.

Esta contradicción puede deberse al progresivo deterioro de la carretera actual que ha tenido como consecuencia la derivación de tráfico hasta otras vías.

Dado que el orden de magnitud de los aforos es el mismo en general para las distintas estaciones, vamos a considerar para los datos de partida de estimación de tráfico los valores de la Tabla 7.3., dando preferencia a la estación BA-1673 por su carácter de permanente:

Tabla 7.3.- Datos de partida EX 346.

	total	ligeros	Pesados	% pesados	comparación 2002-2007	
2002	2300	2100	200	10%		
2007	2300	2172	130	6%	0%	-36%

Se ha considerado que el tráfico de pesados es la media de las tres estaciones de aforo del tramo La Haba-Quintana de la Serena.

Con estos datos partimos de la base que el número total de vehículos se ha mantenido constante y que los vehículos pesados han sufrido una tasa de decrecimiento del 7'7% anual.

Siendo lo marcado en el Pliego de Prescripciones Técnicas del Proyecto se establece las siguientes hipótesis:

- Periodo de proyecto: 20 años.
- Crecimiento medio anual: 1'5, 2'5 y 3'5
- Inducción 10% durante los tres primeros años.

Se supone igualmente que la construcción de la carretera inducirá un aumento del tráfico pesado que elegirá esta vía para acceder al complejo Don Benito - Villanueva de la Serena.

Suponemos que el tráfico pesado de la EX-115 en su tramo Quintana de la Serena - Campanario se desviará por la diferencia de los aforos BA-1753 y BA-6023; es decir:

$$0'8(0'1 \times 820 - 0'02 \times 515) = 58$$

Con estas hipótesis se obtienen los resultados presentados la Tabla 7.4.

Tabla 7.4.- IMD.

tasa crecimiento 1,5%					
	año	IMD	pesados	veh. Pesados	IMDp por carril
dato inicial	2007	2300	6%	138	69
	2008	2335	6%	140	70
año puesta en servicio	2009	2370	6%	142	71
tráfico inducido 10%		237		58	
total año 2009		2607	8%	200	100
tráfico inducido 10%	2010	2911	8%	233	117
tráfico inducido 10%	2011	3250	8%	260	130
año medio	2019	3661	8%	293	147
año horizonte	2029	4249	8%	340	170

tasa crecimiento		2,5%			
	año	IMD	pesados	veh. Pesados	IMDp por carril
dato inicial	2007	2300	6%	138	69
	2008	2358	6%	141	71
año puesta en servicio	2009	2417	6%	145	73
tráfico inducido 10%		242		58	
total año 2009		2659	8%	203	102
tráfico inducido 10%	2010	2998	8%	240	120
tráfico inducido 10%	2011	3380	8%	270	135
año medio	2019	4118	8%	329	165
año horizonte	2029	5272	8%	422	211

tasa crecimiento		3,5%			
	año	IMD	pesados	veh. Pesados	IMDp por carril
dato inicial	2007	2300	6%	138	69
	2008	2381	6%	143	72
año puesta en servicio	2009	2464	6%	148	74
tráfico inducido 10%		246		58	
total año 2009		2710	8%	206	103
tráfico inducido 10%	2010	3085	8%	247	124
tráfico inducido 10%	2011	3512	8%	281	141
año medio	2019	4625	8%	370	185
año horizonte	2029	6524	8%	522	261

IMD

Un análisis de las tablas nos permite indicar:

- Para el año de puesta en servicio previsto, (2009) la categoría de tráfico de las tres hipótesis es un T31 lindando con el T32.
- Para el año medio, 2019, en los tres supuestos la categoría es T31.
- Para el año horizonte, 2029, para la tasa del 1'5% es T31, para el 2'5% y para el 3'5% corresponde una categoría de tráfico T2.

Para el dimensionamiento del firme se considerará un tráfico tipo T31, tráfico previsto para el año de puesta en servicio, válido para gran parte de la vida útil en las tres hipótesis, máxime cuando al final de la vida útil de la obra de darse el escenario más pesimista se podrá efectuar un refuerzo.

7.3.2. Firmes y Pavimentos

El presente punto, se elabora con objeto de definir el firme a construir en las obras de acondicionamiento de la carretera EX-346 de Don Benito a Quintana de la Serena, en el tramo EX -348 a Quintana de la Serena, en la Provincia de Badajoz.

Para la definición del mencionado firme se toma como documentación de base la instrucción de firmes 6.1 IC (Ministerio de Obras Publicas y Urbanismo, 1989), vigente y en cumplimiento de los tres preceptos indicados en la circular 2-2001 de Redacción de Proyectos en cuanto al diseño de firmes, que la sección tenga una capacidad portante suficiente, que sea posible desde el punto de vista constructivo y de coste razonable.

Se adoptan las siguientes secciones de firme en las que se incluye la explanada:

Explanada

A la vista del Estudio Geotécnico incluido en el proyecto los suelos que constituyen la zona de obras tienen la clasificación de Seleccionados, Tolerables y Adecuados según la tramificación presentada la Tabla 7.5.

Tabla 7.5 - Clasificación de suelos.

TRAMO	CLASIFICACION
PKK. 0+000 al PKK. 2+780	SUELOS SELECCIONADOS
PKK. 2+780 al PKK. 3+000	SUELO TOLERABLE
PKK. 3+000 al PKK. 6+780	SUELOS SELECCIONADOS
PKK. 6+780 al PKK. 8+200	SUELOS TOLERABLES H<1M; ADECUADO H>1M
PKK. 8+200 al PKK. 8+470	SUELO SELECCIONADO H > 1M
PKK. 8+470 al PKK. 8+520	SUELO TOLERABLES H<1.5 M; ADECUADO H>1.5M
PKK. 8+520 al PKK. 8+740	SUELO SELECCIONADO H > 1.5M
PKK.9+480 a PKK. FINAL	SUELOS TOLERABLES (Distintas H)

Según se justifica en el punto “Tráfico”, para el dimensionamiento del firme se considerará un tráfico tipo T31, previsto para el año de puesta en servicio.

Se prevé la consecución de una explanada de las formas presentadas en la Figura 7.1.

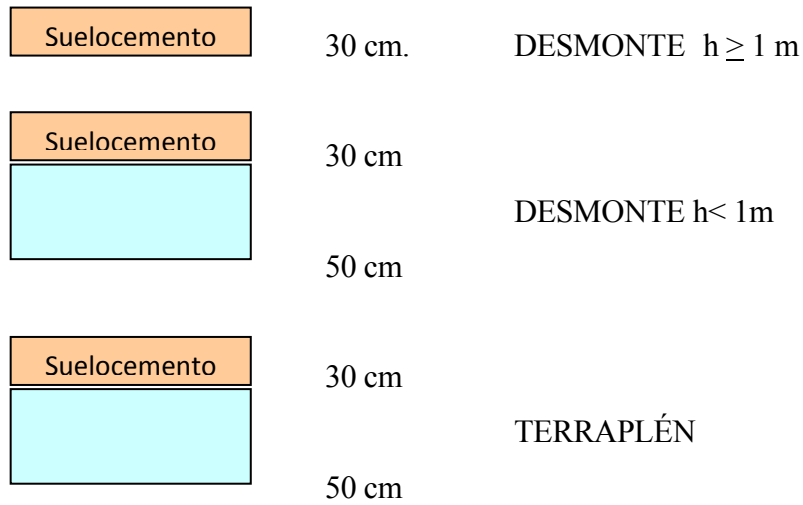
• DEL PKK. 0+000 AL PKK. 6+400: Material Seleccionado. CBR>20

Suelocemento	30 cm.	DESMONTE
Suelocemento	30 cm	TERRAPLÉN
	30 cm	

• DEL PKK. 6+400 AL PKK. 9+100. $h < 1.5$ m tolerable / $h \geq 1.5$ m adecuado, seleccionado

Suelocemento	30 cm.	DESMONTE $h \geq 1.5$ m
Suelocemento	30 cm	DESMONTE $h < 1.5$ m
	50 cm	
Suelocemento	30 cm	TERRAPLÉN
	50 cm	

• DEL PKK. 9+100 AL PKK. 10+200. $h < 1$ m tolerable / $h \geq 1$ m adecuado.



• DEL PKK. 10+200 AL PKK. 14+300. Tolerable.

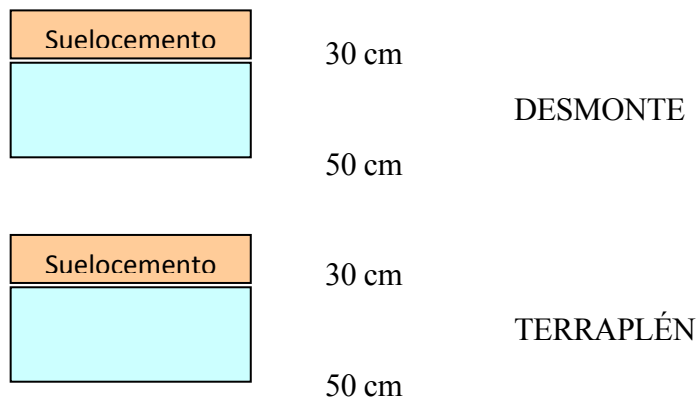


Figura 7.1. -Transversales tipos de explanadas (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1989).

Firmes

Para definir las distintas secciones estructurales de firme, conocidos el tráfico y el tipo de explanada a considerar, se siguen las indicaciones dadas en las Instrucciones 6.1 I.C. de Secciones de Firmes (Ministerio Obras Públicas y Urbanismo, 1989). Se toman las secciones de firme, que se reflejen en la Figura 7.2 de la Secciones Tipo.

Tronco:

5 cm de AC 22 RODADURA 60/70 S

5 cm de AC 22 BASE 60/70 G

30 cm de Suelocemento

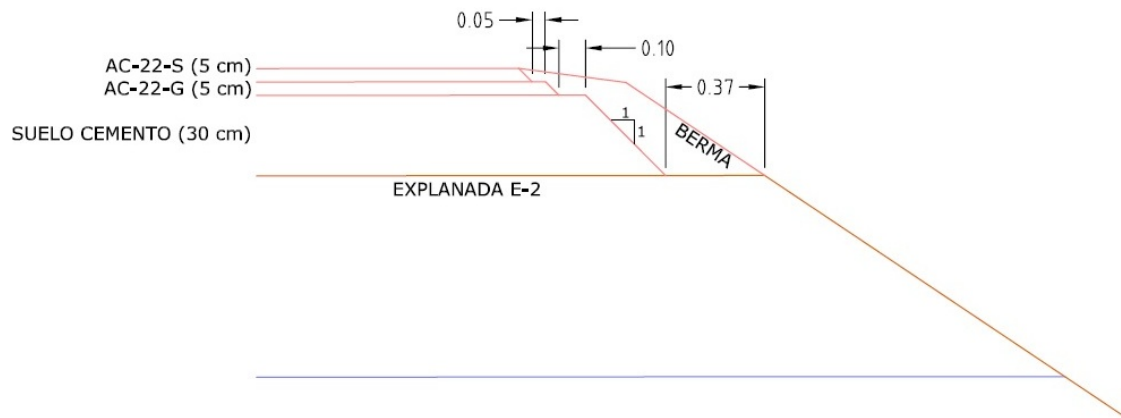


Figura 7.2.- Sección Tipo. Corte Transversal de Firme.

7.3.3. - Proceso de construcción

Este tramo de Obra, desde el cruce de Magacela a Quintana de la Serena, se comenzó a finales del año 2010, los adjudicatarios de la ejecución de Obra, fue la UTE formada por Ferrovial Agroman y Exconsa, la primera empresa Española conocida internacionalmente, la segunda una empresa Extremeña, por parte de la UTE se nombró Jefe de Obra a Don José Contador, por parte de la Administración, en este caso la Junta de Extremadura se nombró como Director de las Obras Juan Carlos Solano, la Asistencia Técnica a la Dirección de las Obras fue EXACO Y DOPEX, S.A. como Jefe de equipo el Ingeniero Don Cándido Julián Marcos y José Ruiz Garmendia y como Ingenieros de equipo en control y calidad Don Pedro Andrés Rodríguez-Arias Julián, Vigilancia Don Juan Antonio Pinero, en seguridad Don Francisco Manzanedo y topografía Don Emiliano Martin, por parte de laboratorio trabajo la empresa Lycsa en cabeza los Ingenieros Don José Luis y Javier, además de personal de obra especializada, como Don Juan Carrasco y Don Paco, por parte de la Administración trabajo como Jefe de equipos Don Joaquín Pagador, en esta obra trabajaron todo este equipo de personal más otras personas de la UTE, así como de las diferentes subcontratas que formaron parte en la ejecución de las mismas.

En cuanto al tema que tratamos en este documento, los áridos de la zona fueron extraídos por las Empresas Exconsa y Sani, en movimientos de tierras, formación de granulometría y machaqueo las plantas de Ferrovial, y ejecución de suelocemento en

planta y extendido mediante extendedora por Ferper. El extendido de esta capa se realizó el verano del año 2012, aunque como he dicho anteriormente, se acopiaron los materiales antes de esta fecha, y después se les dio forma y la granulometría necesaria para esta necesidad del suelocemento de planta.

En primer lugar se tomó el terreno donde realizaríamos los acopios, para según realizábamos estos, poder controlar el volumen de material que teníamos aquí acopiado, con topografía.

Para realizar este material se utilizaron los equipos de Ferrovial, las maquinarias se adjuntan en el **Anexo A**, en este anexo también adjuntamos el Croquis de la Planta de fabricación del Suelocemento, para el control de granulometría de material triturado, se recogían muestras diariamente, e incluso algunos días se cogían más de una muestra, para ver que la granulometría es la correcta para este tipo de material, y demostrar así, que se está trabajando, haciendo un material de granulometría correcta, para ello se adjuntan varias muestras, con ensayos granulométricos y la tabla resumen de todas la recogidas durante la fabricación del material, en el **Anexo B**. Para saber la cantidad de cemento, con que debemos realizar la mezcla se realizan ensayos de Dotación – Formula de trabajo, donde se fabrican probetas, con diferentes dotaciones de cemento y así podemos comprobar la resistencia de estas pasados los periodos que marca la normativa, para romper las mismas, las que estén por encima de la resistencia mínima que marca la normativa, esta sería, la dotación adecuada que debemos realizar en nuestra mezcla en obra, para ello también podemos usar martillo de vibrado o maza, los ensayos están en los **Anexos C**. También es importante que el agua y cemento, que usemos en la mezcla sea la correcta y no produzca deterioros en nuestro material, para ello realizamos también ensayos, adjunto alguno en el **Anexo D**. Todo este proceso se realizaría antes de comenzar los trabajos de extendido del material, después realizaríamos un tramo de prueba para verificar que todo funciona bien y comenzar con este tajo, se toma como tramo de prueba el ubicado casi al final de la obra en la zona cercana a Quintana de la Serena PK 13+900, con una longitud aproximada de 150 m, con un semiancho de calzada, en este tramo definiremos:

- El modo de empleo de cada rodillo, nivel de vibración (frecuencia, amplitud), recorridos de los rodillos, orden de intervención y número de pasadas.

- La velocidad de avance, que nos dará el número de bañeras a trabajar dependiendo de la distancia a la planta.

Para ello es importantísimo contar con personal altamente cualificado y un laboratorio en campo para tomar las densidades y humedades de los materiales.

Después de esto, se realizarían los trabajos de mezclado, transporte que es importantísimo que este material este cubierto con lonas en todo momento en el transporte y en el extendido, yo personalmente controlo las entradas de material cemento a la planta, y los niveles de las tolvas de cemento diariamente, también controlo el número de toneladas que se extienden con el número de camiones y los metros cuadrados de material, que extiende la extendedora de suelocemento, para poder sacar la dotación diaria de cemento que gastamos, adjunto la hoja tipo de control en el **Anexo E**. También se comprueban diariamente con topografía los espesores y anchos de explanada, tanto antes de extender el suelocemento, para comprobar que está a la cota adecuada, como después del extendido para verificar la buena actuación de los equipos y su correcto espesor, si antes de extender esta alto o bajo se debe nivelar de nuevo estos puntos, quedando a la cota correcta y tomando los mismos mediante topografía, en el **Anexo F**. Podemos ver algún ejemplo de puntos tomados por topografía tanto de plataforma de suelo seleccionado como de Suelocemento, a esta capa se les debe tomar las densidades y humedades una vez compactada por el tren de compactación, **Anexo G**. También controlamos diariamente las entradas y salidas de emulsión, para con los metros cuadrados diarios regados, controlar la dotación diaria de riego de curado **Anexo H**. Recogemos muestras de material en el extendido más de una vez al día (mañana y tarde), para realizar el control de resistencias, realizando probetas y rompiéndolas después, adjunto **Anexo I**. Después realizaremos placas de carga, adjunto **Anexo J**. Para tener un control de la capa de suelocemento y recuperación de testigos para comprobar espesores y compactación en los mismos.

Por último el **Anexo K**. en el cual pongo fotografías de la ejecución de la Obra, para que vean todo es proceso constructivo de la misma.

CAPITULO 8. CONCLUSIONES

Este documento presenta tanto teóricamente como de forma práctica, la estabilización de suelos con diversos materiales y sus diferentes técnicas, para la construcción de firmes para carreteras principalmente, aunque pueden ser usados para todo tipo de obra lineal, desde caminos rurales, viales de urbanizaciones o polígonos industriales, autovías, ferrocarriles a otras obras no lineales como puertos o aeropuertos.

En este documento se acompaña de una Bibliografía y Anexos, donde se puede consultar cualquier duda, para completar la comprensión de las diferentes técnicas existentes, con los diversos materiales, además de las experiencias en obras de este tipo y forma de trabajo en una obra con estabilización de suelo, teniendo marcados los ensayos a realizar y seguimiento control de esta estabilización, que es lo que yo he querido explicar no solo con la teoría sino también con el contenido de los anexos, marcando en cada punto los ensayos a realizar, así como el seguimiento de la obra tanto para controlar las dotaciones, los espesores o la topografía de los alzados en cada transversal. La verdad es que para esto solo use los datos de una de las obras de estabilización en la cual estado en estos años de experiencia carretera EX 346, aunque estado trabajando en otras obras, es las cuales se usaron técnicas de estabilización, y rodeado de personal muy cualificado para estas obras desde Encargados a Ingenieros, con gran recorrido laboral en estos tajos, gracias a su ayuda en estos trabajos, pude desempeñar las tareas encomendadas y realizar el buen control de las mismas superando los obstáculos presentados.

Es importante el conocimiento de todos los materiales, así como conocer sus propiedades para comprender los mecanismos de la estabilización, también es importante la temperatura, la calidad del agua y la compactación.

Antes de comenzar los trabajos, realizar ensayos tanto identificativos de los materiales como granulométricos, calidad de la cal o cemento, también del agua, así como realizar fórmulas de trabajos, diferentes dotaciones de material, sacar probetas, para romper y comprobar su resistencia. Una vez que por parte de la Dirección de Obra se tiene claro la dotación, durante la ejecución es importante además de recoger muestras y sacar probetas, también realizar comprobaciones de densidad y humedad óptimas, además de

la importancia de cómo en toda obra tiene el control de calidad por personal cualificado para este tipo de trabajo, y realizar un tramo de prueba para permitir el control de práctica de los procedimientos a llevar a cabo en los tajos, desde compactaciones a distancias entre las juntas.

Los suelos estabilizados, se utilizan normalmente en zonas donde los suelos existentes no tienen las características necesarias para satisfacer las necesidades de la obra (su transporte a grandes distancias encarecería la obra, además de los posible impactos ambientales de realizar prestamos de materiales, por ellos utilizamos los materiales de los que disponemos en la obra), por ello se recurre a la estabilización de suelos, esta se realiza por mezcla con otros materiales para modificar y mejorar las características de los materiales.

Dentro de las ventajas económicas podemos citar que es una técnica en frío y que en consecuencia consume poca energía, supone un importe ahorro, al reducir al mínimo el volumen necesario de nuevos áridos a utilizar en la obra y el costo de su transporte, conviene recordad a este respecto, la dificultad cada vez mayor de encontrar suministros de áridos de calidad no demasiado alejados de las obras, esta gran reducción en el transporte de áridos contribuye a la conservación de la red de caminos y carreteras situada en las proximidades de la obra. Como ventaja ecológica, al ser una técnica en frío, se disminuyen notablemente la contaminación y las emisiones de vapores nocivos, y la reutilización de materiales in situ reduce el volumen de áridos que hay que extraer de yacimientos. Con la puesta en marcha de la ejecución de estos proyectos se quiere establecer un punto de partida para la aplicación de esta Técnica, de forma que podamos optimizar tanto los recursos naturales como la posibilidad de poder rehabilitar en un futuro la mayoría de los caminos y carreteras, aprovechando los materiales existentes y respetando los anchos de calzada sin aportar espesores de calzada que irían en detrimento del ancho actual.

Entre las conclusiones más interesantes que se han desprendido de este trabajo están las siguientes:

- Es una técnica muy competitiva en coste frente a soluciones de refuerzo convencionales, máxime si añadimos los costes ambientales.

- Es una técnica suficiente desarrollada para utilizar en distintos tipos de carreteras.
- Es una técnica bastante más rápida, y por tanto con menos molestias al usuario.
- Mantiene la cota de rasante antigua con la eliminación de problemas en las anchuras de las obras de fábrica, en caso de reciclados de carreteras ya ejecutadas anteriormente, para mejoras de firme.

Con respecto España y mi región que es Extremadura, la ejecución de estas técnicas han sido llevadas a cabo, por empresas pioneras, que ha hecho de la implantación de esta técnica es un empeño constante a la vista de la ventaja económica que representa para el contratista y la Administración, aportando un plus de calidad si se ejecuta con rigor. Actualmente, se puede considerar que los organismos públicos mencionados ya conocen la técnica y no tienen reparos en la aplicación por lo que animo a las empresas a los proyectistas a usar esta técnica.

Pienso que estas técnicas aumentaran día a día, dado que las normativas son más exigentes con los materiales y formación de explanadas, así como el menor impacto ambiental que debemos realizar sobre el medio, por ello creo que este tipo de técnicas tendrá un aumento en los próximos años.

BIBLIOGRAFÍA.

ADUVIRE PATACA, OSVALDO et al (1994) – *Manual de Áridos. Manual de Prospección, Explotación y Aplicaciones*. Segunda edición. Madrid.

AURELIO RUIZ RUBIO et al (2011) – *Recomendaciones Técnicas para el dimensionamiento de firme de la Red*. Gobierno de Aragón.

AYUNTAMIENTO DE VALENCIA (2007) – *Catalogo de firmes y pavimentos*. Valencia.

BRANCO, F., PEREIRA, P., & SANTOS, L. P. (2008). *Pavimentos rodoviários*. Coimbra: Edições Almedina, SA.

COMITÉ DE TECNICOS DE NORMALIZACIÓN - *Norma UNE-EN* (Diferentes años dependiendo de la Norma).

GUÍA TÉCNICA (2014) - *Firmes con capas de materiales tratados con cemento*. IECA. Madrid.

GUÍA TÉCNICA (2013) - *El control del hormigón en la EHE-08 y los ensayos de información complementaria*. IECA. Madrid.

GUÍA TÉCNICA (2013) - *Estabilización de suelo con cemento*. IECA. Madrid.

GUÍA TÉCNICA (2013) - *Reciclados de firmes in situ con cemento*. IECA. Madrid.

GUÍA TÉCNICA (2013) - *Suelocemento in situ*. IECA. Madrid.

JOFRÉ IBÁÑEZ, CARLOS et al (2009) – *Manual de Firmes de caspa tratadas*. 2ª edición. CEDEX. Madrid.

KCRAEMER, C. et al (2001) - *1º Simposio Internacional sobre Estabilización de Explanadas y Reciclado in situ de Firmes con Cemento*. Volumen 1 y 2. Salamanca.

JOSE RUIZ GARMENDIA - ICCP (2013), *Proyecto de Liquidación EX – 346 Quintana de la Serena (BADAJOS), Badajoz*.

MINISTERIO DE FOMENTO (2002) - *EHE.- Instrucción Estructuras de Hormigón*. 5ª edición 7ª revisión. Madrid.

MINISTERIO DE FOMENTO (2004). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG- 3* .- Artículo 512 y 513. “Suelos Estabilizados in situ y Materiales Tratados con Cemento Suelocemento y Gravacemento”. Madrid.

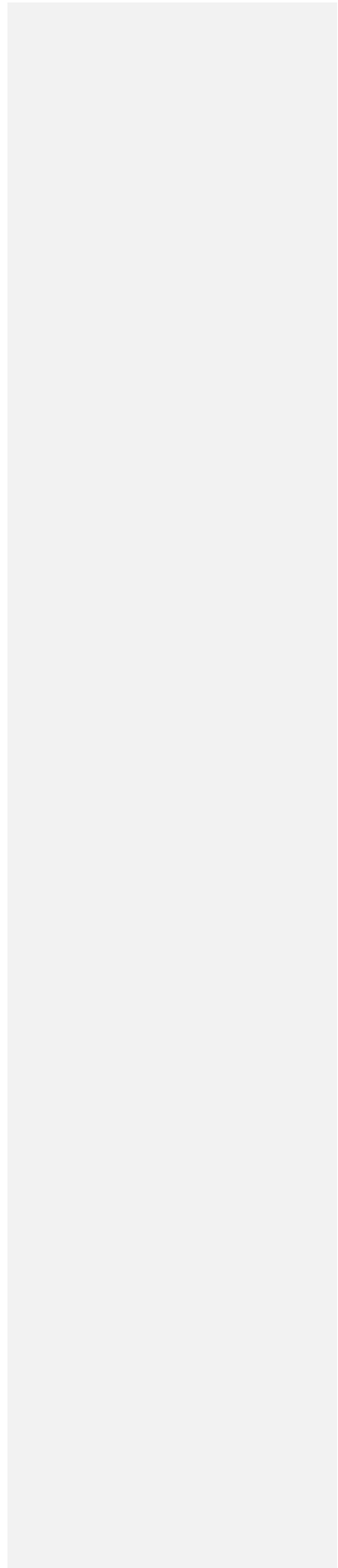
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y URBANISMO (1989) - *Instrucción.- 6.1-I.C. Secciones de Firme*. Madrid.

NEVES, J. M. C. (1993). *Estabilização de solos com cal. Estudo e aplicações rodoviárias*. (Dissertação de Mestrado, não publicada). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal.

SASIAMBARRENA SAN GIL, JAVIER (2008) – *VIII Congreso Nacional de Firmes*.
Tomo I y II. Madrid.

SORIANO CARRILLO, JESÚS - EG (1990) – *Bases y Subbases para Obras Publicas*.
Madrid.

**ANEXO A - Fichas Maquinaria móvil de trituración – Croquis de planta de
Suelocemento**



MÁQUINA GRUPO MÓVIL DE TRITURACIÓN

MARCA SANDVIK

MODELO CM4800i (UH440i)

REFERENCIA

2798

AÑO DE COMPRA
2007

HOJA
1 de 4

C A R A C T E R I S T I C A S



Referencia	Nº de Serie	Año de Fabricación
2798	Z001018	2007

CINTA DE ALIMENTACIÓN

Accionamiento hidráulico.

Longitud:	8.500 mm
Ancho de banda:	1.200 mm
Velocidad:	0 - 0,55 m/s
Volumen tolva:	6 m ³

MOLINO DE CONO

Tipo:	SANDVIK CH 440
Tipo de cámara:	EC (extragruesa)
Tamaño máximo admitido:	215 mm
Excéntricas admisibles:	16,20,24,28,32,36 mm
Cierres admisibles:	Desde 16 a 48 mm
Producciones límite:	114- 413 t/h, según cierre y excéntrica.
Peso total:	13.700 kg
Cierre previsto para aplicación:	32 mm, con excéntrica de 29 mm.
Producción al cierre previsto:	≥ 300 t/h
Potencia necesaria:	220 kW

CINTA DE DESCARGA

Accionamiento hidráulico, velocidad fija.

Altura de descarga bajo tambor:	3.300 – 3.800 mm, elevación hidráulica.
Ancho de banda:	1.400 mm
Longitud de cinta:	11.300 mm
Velocidad:	0 - 2 m/s
Encapsulado contra polvo.	

CRIBA

Tipo:	SC1530
Longitud:	3.000 mm
Anchura:	1.500 mm
Número de bandejas:	1

CINTA DE PRODUCTO

Accionamiento hidráulico.	
Altura de descarga:	3.200 mm
Ancho de banda:	1.200 mm
Longitud de cinta:	8.200 mm

CINTA LATERAL

Accionamiento hidráulico.	
Ancho de banda:	1.000 mm
Longitud de cinta:	4.000 mm

C A R A C T E R I S T I C A S

CINTA DE RETORNO

Accionamiento hidráulico.

Ancho de banda: 800 mm
 Longitud de cinta: 12.600 mm

ACCESORIOS

Detector de metales.
 Equipo de radio control.
 Bomba eléctrica para rellenar el tanque de combustible.
 Paradas de emergencia en puntos estratégicos.
 Alarmas sonoras y visuales para avisar las maniobras.
 Dos focos de 24 V para iluminación nocturna.
 Sistema automático de regulación ASRi.

MOTOR

Marca: VOLVO
 Modelo: TAD 1252 tier III
 Potencia: 313 kW a 1.800 rpm
 Capacidad combustible: 1.125 l
 Consumo combustible: 35- 45 l/h, al 75% de carga continua.

SISTEMA HIDRÁULICO

Dos bombas de pistón axial montadas directamente sobre el grupo. Suministran potencia a:

- Cintas transportadoras
- Orugas tractoras
- Sistema hidráulico y controles

TREN DE RODAJE

Propulsión mediante sistema de orugas.

Ancho de teja: 500 mm
 Distancia entre ejes de ruedas: 3.715 mm
 Presión nominal: 1,5 kg/m²
 Pendiente máxima: 20°
 Velocidad: 1,2 km / h

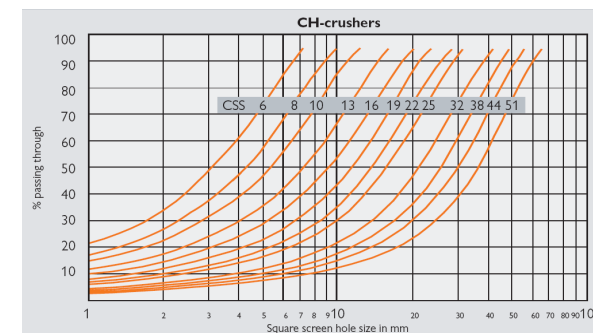
DIMENSIONES FUNCIONAMIENTO

Longitud	17.500 mm
Altura	4.900 mm
Anchura	3.000 mm

DIMENSIONES PARA TRANSPORTE

Peso Total	48.000 kg
Longitud	18.800 mm
Altura	3.800 mm
Anchura	3.000 mm

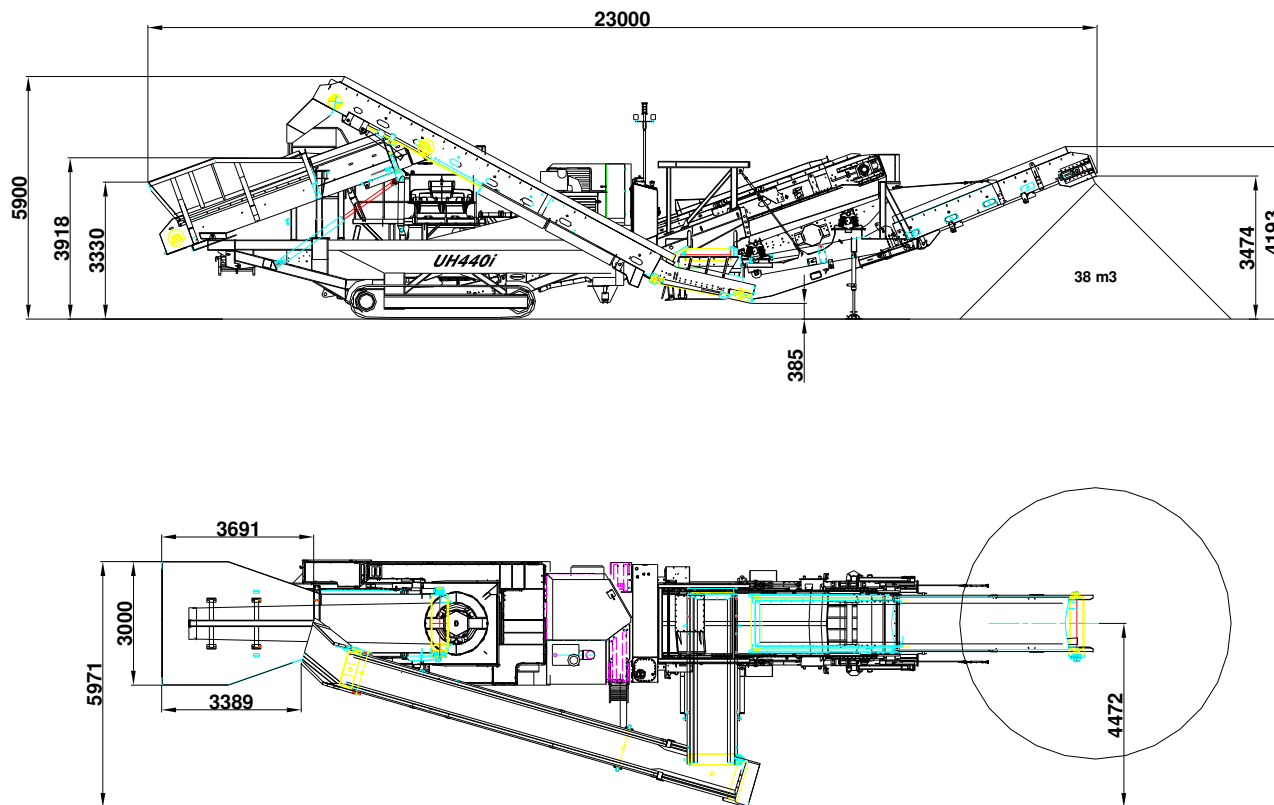
CUADRO GRANULOMÉTRICO



MÁQUINA GRUPO MÓVIL DE TRITURACIÓN		REFERENCIA	
		2798	
MARCA SANDVIK	MODELO CM4800i (UH440i)	AÑO DE COMPRA 2007	HOJA 3 de 4

C A R A C T E R I S T I C A S

MEDIDAS GENERALES EN ORDEN DE TRABAJO



MÁQUINA GRUPO MÓVIL DE TRITURACIÓN

MARCA SANDVIK

MODELO CM4800i (UH440i)

REFERENCIA

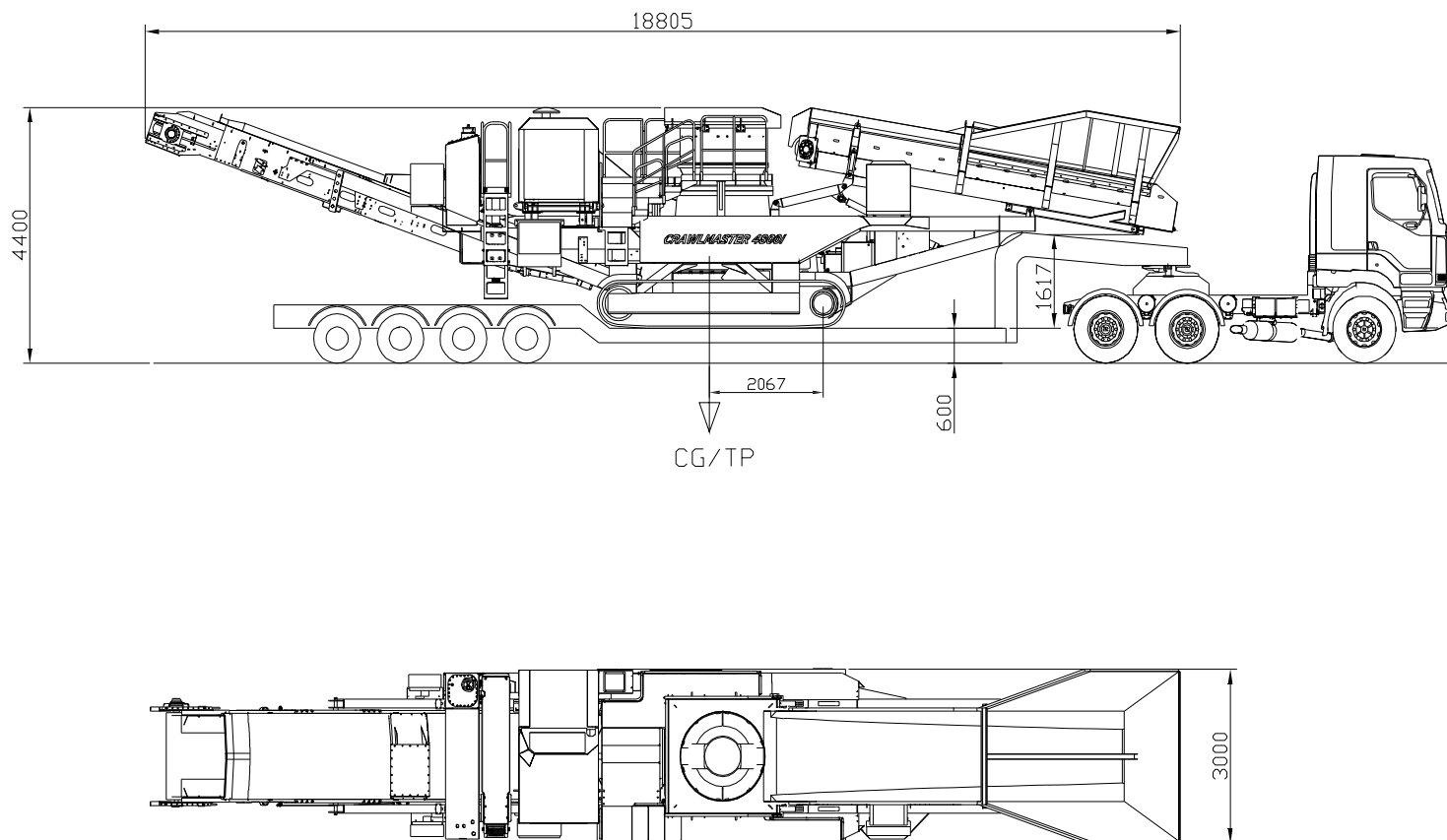
2798

AÑO DE COMPRA
2007

HOJA
4 de 4

C A R A C T E R I S T I C A S

MEDIDAS GENERALES DE TRANSPORTE EN TRÁILER



ferrovial

agroman

FICHA TECNICA

MAQUINA GRUPO MOVIL DE TRITURACION**MARCA** SANDVIK**MODELO** UJ440i**REFERENCIA**

2861

AÑO DE COMPRA
2009**HOJA**
1 de 3

C A R A C T E R I S T I C A S



Referencia	Nº de Serie	Año de compra
2861	C001045	2009

ALIMENTADOR PRECRIBADOR VIBRANTE

Revestimiento de goma.

Longitud	4.600 mm
Ancho de banda	1.200 mm
Volumen tolva de alimentación	6 m ³
Potencia	2 x 6,6 kW
Accionamiento	Hidráulico

MACHACADORA DE MANDIBULAS

Tipo	Simple efecto
Marca y modelo	SANDVIK CJ412
Dimensiones de la boca	1.200 x 838 mm
Tamaño máximo admitido	750 mm
Reglaje mínimo (apertura)	75 mm
Reglaje máximo (apertura)	250 mm
Producción con reglaje a 150 mm	300 t/h
Peso total	26.600 kg
Motor eléctrico	132 kW
Accionamiento directo, mediante acoplamiento hidráulico y correas trapecoidales.	
Reglaje de la machacadora totalmente automático mediante cuñas.	

CINTA DE DESCARGA

Altura de descarga bajo tambor	3,3 – 3,8 m
Ancho de banda	1.400 mm
Longitud de cinta	11.300 mm
Velocidad fija	1,2 m/s
Accionamiento	Hidráulico
Elevación	Hidráulica
Encapsulado contra polvo.	

CINTA EXTRACCION DE FINOS

Canaleta by-pass que conduce los finos a esta cinta sin pasar por la machacadora de mandíbulas.	
Accionamiento hidráulico	
Ancho de banda	800 m
Longitud de cinta	7.200 mm
Abatimiento laterales	Hidráulico

GRUPO ELECTROGENO

Motor diesel.	
Marca	DEUTZ
Modelo	BF6 M 1015 C
Potencia a 1.500 r.p.m.	256 kW
Capacidad combustible	938 l
Consumo combustible	25-35 l/h, al 75% de carga continua

ferrovial

agroman

FICHA TECNICA

MAQUINA GRUPO MOVIL DE TRITURACION**MARCA** SANDVIK**MODELO** UJ440i**REFERENCIA**

2861

AÑO DE COMPRA
2009**HOJA**
2 de 3

C A R A C T E R I S T I C A S

SISTEMA HIDRAULICO

Capacidad tanque de aceite 350 l

Bombas para las orugas

Dos bombas de pistón axial accionadas por sendos motores eléctricos.

Potencia unitaria a 1.500 r.p.m. 75 kW

Capacidad unitaria 138 l/min

Presión máxima de operación 35 MPa

Bombas para estabilizar las patas

Una bomba de paletas accionada por motor eléctrico.

Potencia a 1.420 r.p.m. 3 kW

Capacidad 17 l/min

Presión máxima de operación 5 MPa

TREN DE RODAJE

Propulsión mediante sistema de orugas.

Ancho de teja 500 mm

Distancia entre ejes de ruedas 3.715 mm

Presión nominal 1,5-1,64 kg/cm²

Pendiente máxima 20°

Velocidad 1,2 km/h

DIMENSIONES FUNCIONAMIENTO

Longitud 16.430 mm

Altura 4.240 mm

Anchura 3.000 mm

DIMENSIONES PARA EL TRANSPORTE

Una góndola de perfil bajo con permiso especial sin coche piloto.

Peso total 62.500 kg

Longitud 16.430 mm

Altura 3.800 mm

Anchura 3.000 mm

ACCESORIOS

Detector de metales.

Equipo de radio control.

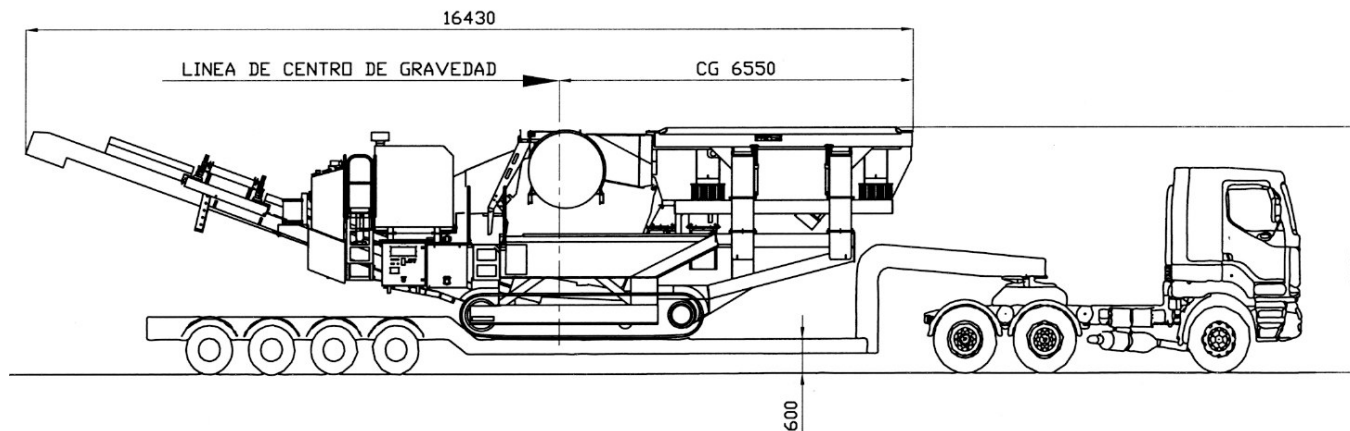
Bomba eléctrica para rellenar el tanque de combustible.

Paradas de emergencia en puntos estratégicos.

Alarmas sonoras y visuales para avisar las maniobras.

Dos focos de 24 V para iluminación nocturna.

Pasarelas alrededor del generador y del cuadro eléctrico.



ferrovial

agroman

FICHA TECNICA

MAQUINA GRUPO MOVIL DE TRITURACION

MARCA SANDVIK

MODELO UJ440i

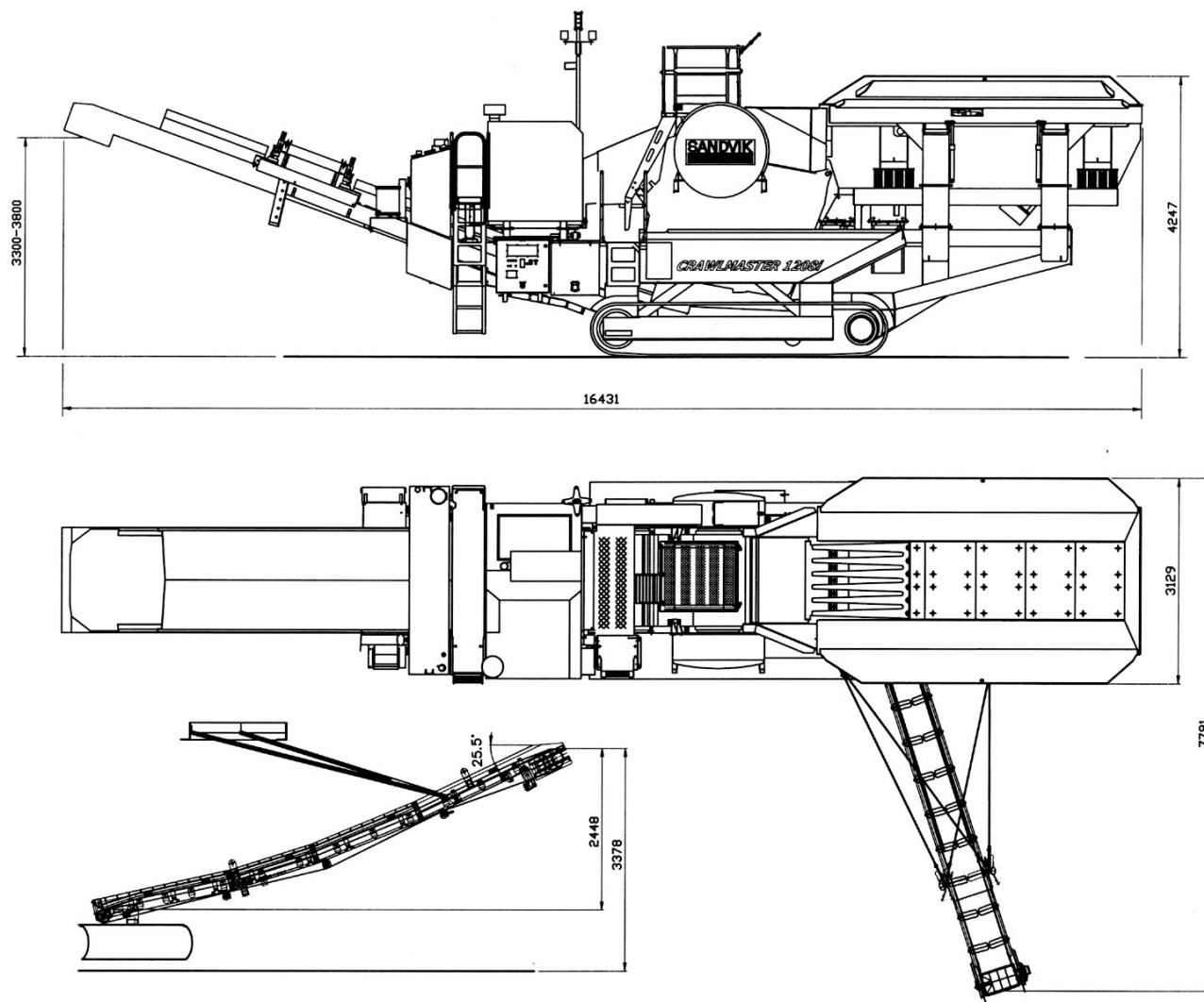
REFERENCIA

2861

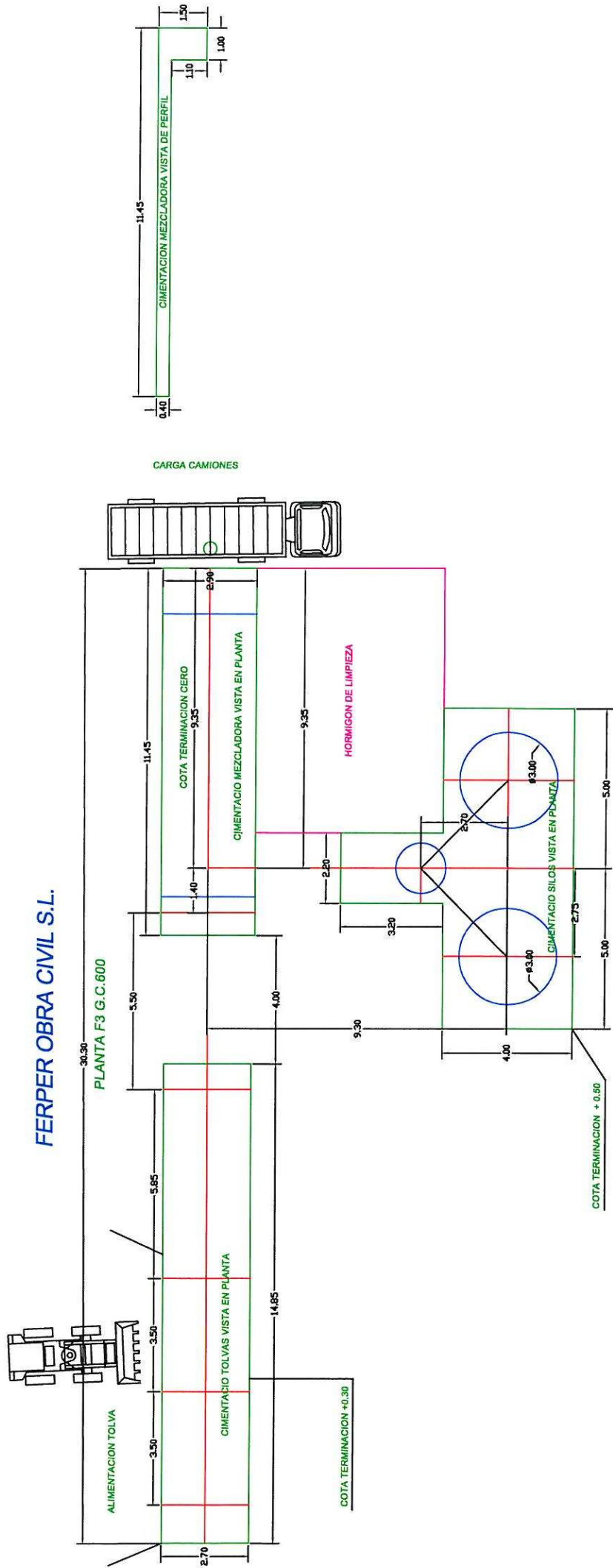
AÑO DE COMPRA
2009

HOJA
3 de 3

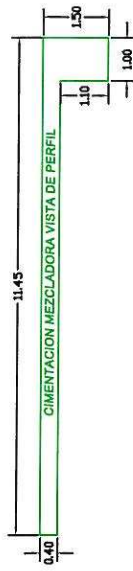
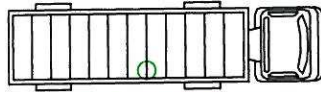
C A R A C T E R I S T I C A S



FERPER OBRA CIVIL S.L.



CARGA CAMIONES



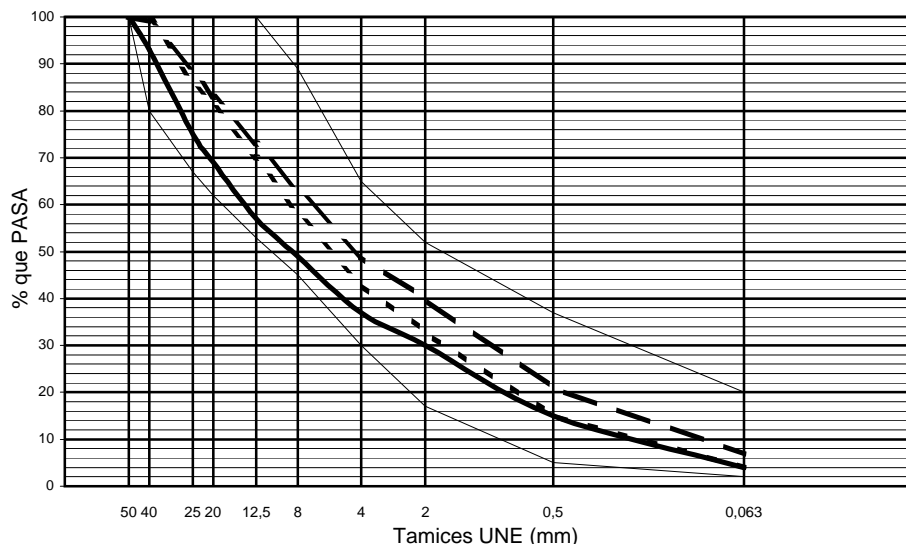
ANEXO - B. Granulometría

Suelo para SUELO CEMENTO SC40

Variación de parámetros después de compactación PROCTOR y MARTILLO V.

Obra : **EX - 346. EX - 348 - QUINTANA DE LA S.** Empresa : _____
 Fecha toma: **28/03/2012** Localización: **PLANTA DE MACHAQUEO EN OBRA**
 Material : **Granito alterado**
 Realizado por: **C. Pérez, J. M. Pérez**

ANALISIS GRANULOMETRICO



	Original	Proctor	Martillo V.
E. A.:			

Límites de Atterberg

	Original	Proctor	Martillo V.
L. L.			
L. P.			
I. P.	N. P.	N. P.	N. P.

Tamices UNE	50	40	25	20	12,5	8	4	2	0,5	0,063	
SC40	100	100	100	100	100	89	65	52	37	20	
	100	80	67	62	53	45	30	17	5	2	
% que PASA	Original ———	100	93	75	69	57	49	37	30	15	4,0
	Proctor - - -	100	99	89	83	73	63	49	40	21	6,8
	Martillo V.		100	86	81	70	58	43	33	15	4,0

PROCTOR	Normal	Modificado
Densidad Máx.		
Humedad Opt.		

Energía	% Absorción	% Hincham.	C B R

Sales Solubles		Yeso		Materia Orgánica	
----------------	--	------	--	------------------	--

Observaciones: Ensayos contraste con LYCCSA y ELABOREX

En Badajoz, a 16 de abril de 2012

EL SUPERVISOR GENERAL
DEL LABORATORIO

Fdo.: Joaquín Pagador Iglesias

Ntra.Ref. 12/0815

IDENTIFICACION MUESTRA: SC-40
Tomada después de compactación con kango

PETICIONARIO: EXACO - DOPEX

OBRA: 10014 SV

FECHA DE TOMA: 29-03-12

Acondicionamiento Ctra. EX - 346. Don Benito a Quintana de la Serena

Ensayos solicitados y normas aplicadas:

Limites de Atterberg (UNE 103-103/94,

UNE 103-104/93):

Límite líquido: %

Límite Plástico: %

Índice de Plasticidad: %

Clasificación de Casagrande:

Desgaste de los Angeles (UNE EN-1097-2)

Granulometría

Desgaste %

Materia Orgánica (UNE 103-204)

Materia Orgánica %

GRANULOMETRIA (UNE 933-2):

Ensayo Proctor Modificado (UNE 103-501/94)

Densidad Máxima: gr/cm³

Humedad Óptima: %

Determinación Caras de Fractura. (UNE EN-933-5/99)

Coef. de Caras de fractura %

Coeficiente de limpieza (UNE 146130/00)

Coeficiente de limpieza %

Índice de lajas (UNE EN-933-3/97)

Índice de lajas %

Densidad Aparente

D.A. gr/cm³

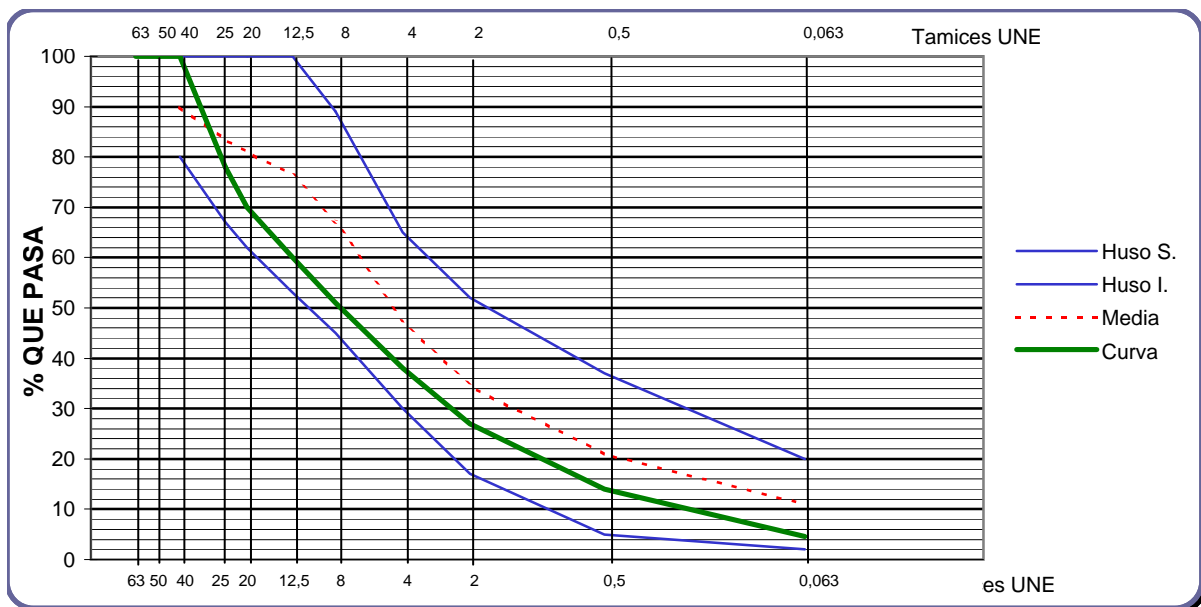
Equivalente Arena (UNE 933-8/00)

Contenido Sulfatos (UNE-EN 1744-1)

Contenido Sulfatos

UNE	63	50	40	25	20	12,5	8	4	2	0,5	0,063
MAXIMO			100	100	100	100	89	65	52	37	20
MINIMO			80	67	62	53	45	30	17	5	2
MEDIA			90	83,5	81	76,5	67	47,5	34,5	21	11
%PASA	100	100	100	78	70	60	51	38	27	14	4,6

SC-40



OBSERVACIONES:

Badajoz, a 11 de abril de 2012

EL ENCARGADO DE AREA
Gonzalo Manso Vera

EL DIRECTOR DEL LABORATORIO
Vº Bº Javier Casco Redondo

Ntra.Ref. 12/0816

IDENTIFICACION MUESTRA: SC-40
Tomada después de compactación con maza

PETICIONARIO: EXACO - DOPEX

OBRA: 10014 SV

FECHA DE TOMA: 29-03-12

Acondicionamiento Ctra. EX - 346. Don Benito a Quintana de la Serena

Ensayos solicitados y normas aplicadas:

Limites de Atterberg (UNE 103-103/94,

UNE 103-104/93):

Límite líquido: %

Límite Plástico: %

Índice de Plasticidad: %

Clasificación de Casagrande:

Desgaste de los Angeles (UNE EN-1097-2)

Granulometría

Desgaste %

Materia Orgánica (UNE 103-204)

Materia Orgánica %

Ensayo Proctor Modificado (UNE 103-501/94)

Densidad Máxima: gr/cm³

Humedad Óptima: %

Determinación Caras de Fractura. (UNE EN-933-5/99)

Coef. de Caras de fractura %

Coeficiente de limpieza (UNE 146130/00)

Coeficiente de limpieza %

Índice de lajas (UNE EN-933-3/97)

Índice de lajas %

Densidad Aparente

D.A. gr/cm³

Equivalente Arena (UNE 933-8/00)

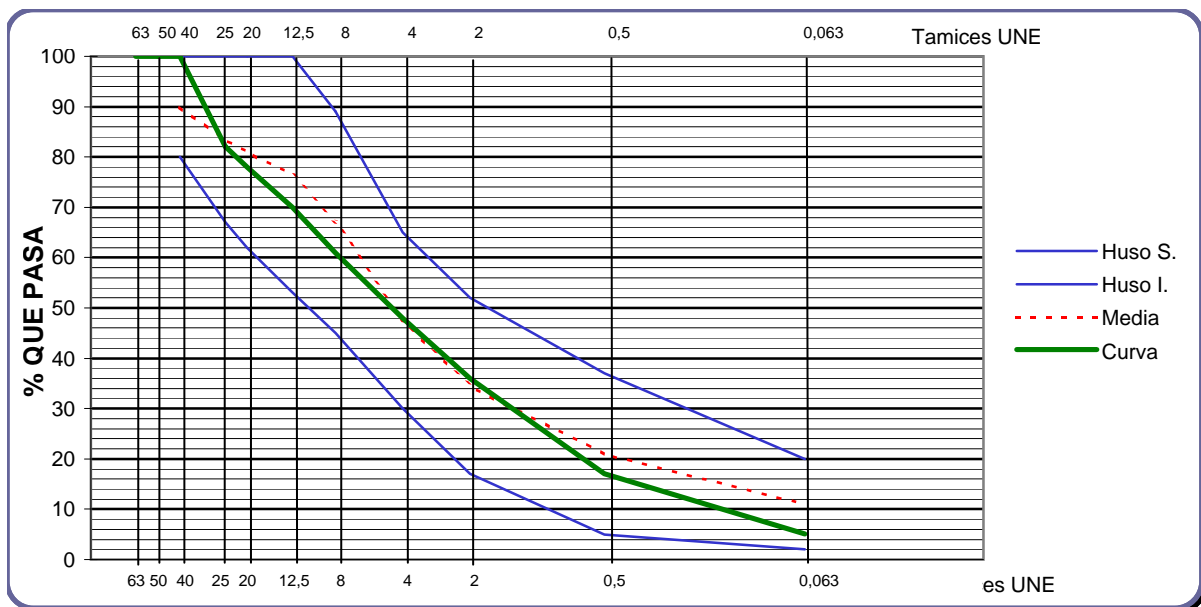
Contenido Sulfatos (UNE-EN 1744-1)

Contenido Sulfatos

GRANULOMETRIA (UNE 933-2):

UNE	63	50	40	25	20	12,5	8	4	2	0,5	0,063
MAXIMO			100	100	100	100	89	65	52	37	20
MINIMO			80	67	62	53	45	30	17	5	2
MEDIA			90	83,5	81	76,5	67	47,5	34,5	21	11
%PASA	100	100	100	82	78	70	61	48	36	17	5,1

SC-40



OBSERVACIONES:

Badajoz, a 11 de abril de 2012

EL ENCARGADO DE AREA
Gonzalo Manso Vera

EL DIRECTOR DEL LABORATORIO
Vº Bº Javier Casco Redondo

Ntra.Ref. 12/0817

IDENTIFICACION MUESTRA: SC-40
Tomado en obra (acopio)

PETICIONARIO: EXACO - DOPEX

OBRA: 10014 SV

FECHA DE TOMA: 29-03-12

Acondicionamiento Ctra. EX - 346. Don Benito a Quintana de la Serena

Ensayos solicitados y normas aplicadas:

Limites de Atterberg (UNE 103-103/94,

UNE 103-104/93):

Límite líquido: N.P. %

Límite Plástico: N.P. %

Índice de Plasticidad: N.P. %

Clasificación de Casagrande:

Desgaste de los Angeles (UNE EN-1097-2)

Granulometría

Desgaste %

Materia Orgánica (UNE 103-204)

Materia Orgánica %

Ensayo Proctor Modificado (UNE 103-501/94)

Densidad Máxima: gr/cm³

Humedad Óptima: %

Determinación Caras de Fractura. (UNE EN-933-5/99)

Coef. de Caras de fractura %

Coeficiente de limpieza (UNE 146130/00)

Coeficiente de limpieza %

Índice de lajas (UNE EN-933-3/97)

Índice de lajas %

Densidad Aparente

D.A. gr/cm³

Equivalente Arena (UNE 933-8/00)

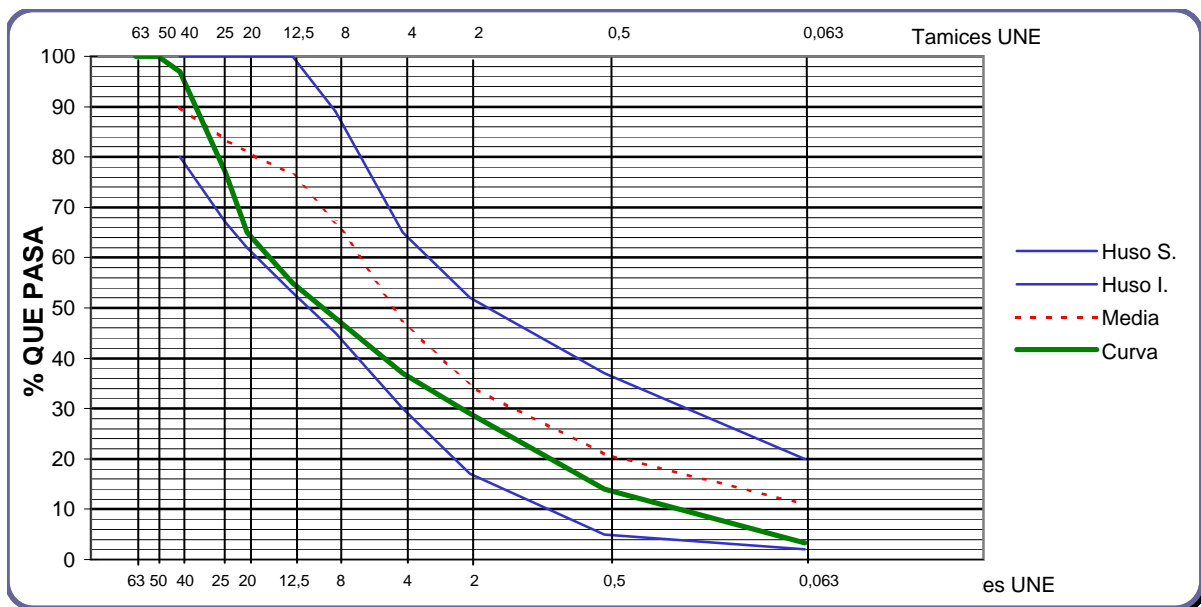
Contenido Sulfatos (UNE-EN 1744-1)

Contenido Sulfatos

GRANULOMETRIA (UNE 933-2):

UNE	63	50	40	25	20	12,5	8	4	2	0,5	0,063
MAXIMO			100	100	100	100	89	65	52	37	20
MINIMO			80	67	62	53	45	30	17	5	2
MEDIA			90	83,5	81	76,5	67	47,5	34,5	21	11
%PASA	100	100	97	77	65	55	48	37	29	14	3,3

SC-40



OBSERVACIONES:

Badajoz, a 11 de abril de 2012

EL ENCARGADO DE AREA
Gonzalo Manso Vera

EL DIRECTOR DEL LABORATORIO
Vº Bº Javier Casco Redondo

EX -346, DE LA INTERSECCIÓN DE LA EX -348 A QUINTANA DE LA SERENA.



SUELO-CEMENTO

		80	63	50	40	25	20	10	5	2	0.4	0.08
09/02/2012	RECHAZO SUELO	100	100	100	100	94	90	74	54	36	16	7.5

ENSAYOS DE IDENTIFICACIÓN DE SUELO-CEMENTO SC-40

CATA	FECHA	63	50	40	25	20	12.5	8	4	2.00	0.5	0.063	OBSERVACIONES
MAXIMO				100.00	100.00	100.00	100.00	89.00	65.00	52.00	37.00	20.00	NORMA UNE
MINIMO				80.00	67.00	62.00	53.00	45.00	30.00	17.00	5.00	2.00	NORMA UNE
MEDIA				90.00	83.50	81.00	76.50	67.00	47.50	34.50	21.00	11.00	NORMA UNE
ACOPIO	09/02/2012	100.00	100.00	93.00	84.00	79.00	71.00	63.00	52.00	40.00	20.00	5.90	ENTRA
ACOPIO	09/02/2012	100.00	100.00	90.00	82.00	76.00	70.00	65.00	50.00	41.00	22.00	6.60	ENTRA
ACOPIO	09/02/2012	100.00	100.00	91.00	84.00	78.00	74.00	61.00	54.00	43.00	24.00	7.00	ENTRA
ACOPIO	17/02/2012	100.00	100.00	100.00	76.00	64.00	51.00	45.00	33.00	25.00	12.00	4.30	NO ENTRA
ACOPIO	17/02/2012	100.00	100.00	92.00	59.00	52.00	40.00	33.00	25.00	20.00	10.00	3.60	NO ENTRA
ACOPIO	17/02/2012	100.00	100.00	98.00	71.00	67.00	56.00	47.00	34.00	26.00	13.00	4.20	ENTRA
ACOPIO	22/02/2012	100.00	100.00	95.00	81.00	77.00	68.00	59.00	44.00	33.00	19.00	0.60	ENTRA
ACOPIO	22/02/2012	100.00	100.00	96.00	79.00	75.00	66.00	57.00	46.00	33.00	17.00	5.40	ENTRA
ACOPIO	22/02/2012	100.00	100.00	97.00	81.00	76.00	67.00	59.00	44.00	33.00	17.00	5.20	ENTRA
CINTA	22/02/2012	100.00	100.00	93.00	77.00	74.00	66.00	57.00	43.00	32.00	16.00	5.20	ENTRA
CINTA	22/02/2012	100.00	100.00	91.00	75.00	72.00	66.00	55.00	42.00	33.00	18.00	5.00	ENTRA
ACOPIO	27/02/2012	100.00	100.00	89.00	77.00	69.00	56.00	48.00	37.00	29.00	15.00	4.40	ENTRA
CINTA	27/02/2012	100.00	100.00	87.00	76.00	69.00	57.00	48.00	34.00	25.00	14.00	4.90	ENTRA
ACOPIO	27/02/2012	100.00	100.00	95.00	80.00	73.00	58.00	46.00	35.00	25.00	10.00	4.00	ENTRA
ACOPIO	06/03/2012	100.00	100.00	94.00	85.00	82.00	73.00	66.00	49.00	36.00	17.00	6.90	ENTRA
ACOPIO	06/03/2012	100.00	100.00	92.00	83.00	80.00	70.00	65.00	47.00	34.00	20.00	7.10	ENTRA
CINTA	06/02/2012	100.00	100.00	100.00	89.00	72.00	64.00	66.00	52.00	39.00	19.00	6.40	ENTRA

ACOPIO	12/03/2012	100.00	100.00	95.00	83.00	77.00	70.00	62.00	45.00	33.00	20.00	7.20	ENTRA
ACOPIO	12/03/2012	100.00	100.00	93.00	80.00	70.00	62.00	60.00	42.00	30.00	18.00	6.50	ENTRA
CINTA	12/03/2012	100.00	100.00	100.00	91.00	80.00	73.00	61.00	49.00	35.00	21.00	6.20	ENTRA
ACOPIO	19/03/2012	100.00	100.00	92.00	87.00	84.00	75.00	68.00	48.00	36.00	19.00	7.10	ENTRA
ACOPIO	19/03/2012	100.00	100.00	93.00	85.00	82.00	72.00	66.00	46.00	33.00	20.00	7.20	ENTRA
CINTA	19/03/2012	100.00	100.00	93.00	87.00	83.00	77.00	69.00	50.00	37.00	21.00	6.80	ENTRA
DESPUES DE KANGO	29/03/2012	100.00	100.00	100.00	78.00	70.00	60.00	51.00	38.00	27.00	14.00	4.60	ENTRA
DESPUES DE MAZA	29/03/2012	100.00	100.00	100.00	82.00	78.00	70.00	61.00	48.00	38.00	17.00	5.10	ENTRA
ACOPIO OBRA	29/03/2012	100.00	100.00	97.00	77.00	65.00	55.00	48.00	37.00	29.00	14.00	3.30	ENTRA
PLANTA-ORIGINAL	28/03/2012		100.00	93.00	75.00	69.00	57.00	49.00	37.00	30.00	15.00	4.00	ENTRA
PLANTA-PROCTOR	28/03/2012		100.00	99.00	89.00	83.00	73.00	63.00	49.00	40.00	21.00	6.80	ENTRA
PLANTA-MARTILLO	28/03/2012			100.00	86.00	81.00	70.00	58.00	43.00	33.00	15.00	4.00	ENTRA
ACOPIO	01/08/2012	100.00	100.00	100.00	88.00	83.00	72.00	65.00	52.00	40.00	19.00	5.40	ENTRA
8+580	01/08/2012	100.00	100.00	100.00	91.00	89.00	76.00	67.00	54.00	42.00	22.00	7.80	ENTRA
8+580	01/08/2012	100.00	100.00	91.00	75.00	70.00	63.00	55.00	43.00	33.00	16.00	4.00	ENTRA

**ANEXO C - Ensayos de Suelocemento – Formula de trabajo (Dotación –
Resistencia)
Martillo vibrante y Maza**



O B R A : **EX - 346**

T R A M O : **EX - 348 - QUINTANA DE LA SERENA**

PROBETAS DE SUELO-CEMENTO. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

Se relacionan a continuación los resultados de resistencia a compresión simple a 7 días de probetas de suelo-cemento, fabricadas en este laboratorio a partir de una muestra de **jabre de machaqueo** y mezclada con el **3 % de cemento** tipo **CEM II/B-M (P-L) 32,5 N**.

Ensayo de contraste con LYCCSA y ELABOREX. Compactación MARTILLO VIBRANTE

Realizado por: **J. M. Megías, C. Pérez, J. Sanchez**

Probeta N°	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a compresión simple 7 días (MPa)
1	2,220	2,7
2	2,250	3,3
3	2,240	3,3

Observaciones: _____

En Badajoz, a 10 de 2012

EL SUPERVISOR GENERAL
DEL LABORATORIO

Fdo.: Joaquín Pagador Iglesias



O B R A : **EX - 346**

T R A M O : **EX - 348 - QUINTANA DE LA SERENA**

PROBETAS DE SUELO-CEMENTO. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

Se relacionan a continuación los resultados de resistencia a compresión simple a 7 días de probetas de suelo-cemento, fabricadas en este laboratorio a partir de una muestra de **jabre de machaqueo** y mezclada con el **3,5 % de cemento** tipo **CEM II/B-M (P-L) 32,5 N**.

Ensayo de contraste con LYCCSA y ELABOREX. Compactación MARTILLO VIBRANTE

Realizado por: **J. M. Megías, C. Pérez, J. Sanchez**

Probeta N°	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a compresión simple 7 días (MPa)
1	2,230	3,8
2	2,210	3,3
3	2,240	3,5

Observaciones: _____

En Badajoz, a 10 de 2012

EL SUPERVISOR GENERAL
DEL LABORATORIO

Fdo.: Joaquín Pagador Iglesias



O B R A : **EX - 346**

T R A M O : **EX - 348 - QUINTANA DE LA SERENA**

PROBETAS DE SUELO-CEMENTO. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

Se relacionan a continuación los resultados de resistencia a compresión simple a 7 días de probetas de suelo-cemento, fabricadas en este laboratorio a partir de una muestra de **jabre de machaqueo** y mezclada con el **4 % de cemento** tipo **CEM II/B-M (P-L) 32,5 N**.

Ensayo de contraste con LYCCSA y ELABOREX. Compactación MARTILLO VIBRANTE

Realizado por: **J. M. Megías, C. Pérez, J. Sanchez**

Probeta N°	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a compresión simple 7 días (MPa)
1	2,250	4,2
2	2,230	3,5
3	2,244	3,8

Observaciones: _____

En Badajoz, a 10 de 2012

EL SUPERVISOR GENERAL
DEL LABORATORIO

Fdo.: Joaquín Pagador Iglesias



O B R A : **EX - 346**

T R A M O : **EX - 348 - QUINTANA DE LA SERENA**

PROBETAS DE SUELO-CEMENTO. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

Se relacionan a continuación los resultados de resistencia a compresión simple a 7 días de probetas de suelo-cemento, fabricadas en este laboratorio a partir de una muestra de **jabre de machaqueo** y mezclada con el **3 % de cemento** tipo **CEM II/B-M (P-L) 32,5 N**.

Ensayo de contraste con LYCCSA y ELABOREX. Compactación MAZA PROCTOR

Realizado por: **J. M. Megías, C. Pérez, J. Sanchez**

Probeta N°	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a compresión simple 7 días (MPa)
1	2,252	3,1
2	2,256	3,2
3	2,249	2,6

Observaciones: _____

En Badajoz, a 10 de 2012

EL SUPERVISOR GENERAL
DEL LABORATORIO

Fdo.: Joaquín Pagador Iglesias



O B R A : **EX - 346**

T R A M O : **EX - 348 - QUINTANA DE LA SERENA**

PROBETAS DE SUELO-CEMENTO. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

Se relacionan a continuación los resultados de resistencia a compresión simple a 7 días de probetas de suelo-cemento, fabricadas en este laboratorio a partir de una muestra de **jabre de machaqueo** y mezclada con el **3,5 % de cemento** tipo **CEM II/B-M (P-L) 32,5 N**.

Ensayo de contraste con LYCCSA y ELABOREX. Compactación MAZA PROCTOR

Realizado por: **J. M. Megías, C. Pérez, J. Sanchez**

Probeta N°	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a compresión simple 7 días (MPa)
1	2,250	3,2
2	2,253	3,4
3	2,236	3,3

Observaciones: _____

En Badajoz, a 10 de 2012

EL SUPERVISOR GENERAL
DEL LABORATORIO

Fdo.: Joaquín Pagador Iglesias



O B R A : **EX - 346**

T R A M O : **EX - 348 - QUINTANA DE LA SERENA**

PROBETAS DE SUELO-CEMENTO. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

Se relacionan a continuación los resultados de resistencia a compresión simple a 7 días de probetas de suelo-cemento, fabricadas en este laboratorio a partir de una muestra de **jabre de machaqueo** y mezclada con el **4 % de cemento** tipo **CEM II/B-M (P-L) 32,5 N**.

Ensayo de contraste con LYCCSA y ELABOREX. Compactación MAZA PROCTOR

Realizado por: **J. M. Megías, C. Pérez, J. Sanchez**

Probeta N°	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a compresión simple 7 días (MPa)
1	2,247	3,9
2	2,219	3,6
3	2,249	3,7

Observaciones: _____

En Badajoz, a 10 de 2012

EL SUPERVISOR GENERAL
DEL LABORATORIO

Fdo.: Joaquín Pagador Iglesias

ENSAYOS DE SUELO CEMENTO

ENSAYO N.º: 12/ 0818

CLIENTE: EXACO - DOPEX

REF. OBRA: 10014 SV

OBRA: Acondic. Ctra. EX - 346. Don Benito a Quintana de la Serena

DATOS GENERALES

Lugar de Toma: Tomada en obra en chorro de cinta, acopio obra

Fecha toma: 29/03/2012

Tipo:

CONDICIONES DE FABRICACION Y CONSERVACION

Metodo de fabricación de probetas: Maza

Tiempo (s):

Tipo de curado: Cámara húmeda (Humedad >95%)

Fecha fabricación:

02/04/2012

Tipo de cemento: CEM II/B-L 32,5 N

ENSAYOS SOLICITADOS Y NORMAS APLICADAS

Próctor modificado NLT -108

Resistencia a compresión simple NLT-305

RESULTADOS:

Próctor modificado:

Densidad máxima (gr/cm²): 2,23

Humedad óptima (%) : 6,3

% CEMENTO	%	3,0%	3,5%	4,0%
Humedad del suelo en el momento de la mezcla	%			
Humedad de compactación	%	6,3	6,3	6,3
RESISTENCIA A COMPRESIÓN (7 días)	Mpa	3,0	3,7	3,9
RESISTENCIA A COMPRESIÓN (7 días)	Mpa	2,8	3,4	4,0
RESISTENCIA A COMPRESIÓN (7 días)	Mpa	2,9	3,3	4,1
MEDIA A 7 DIAS		2,9	3,5	4,0

OBSERVACIONES:

Muestra tomada en conjunto con Elaborex y laboratorio de Fomento.

Badajoz a 11 de abril de 2012

El encargado de área
Gonzalo Manso Vera

El Director de Laboratorio
Vtº Bº.: Javier Casco Redondo

ENSAYOS DE SUELO CEMENTO

ENSAYO N.º: 12/ 0819

CLIENTE: EXACO - DOPEX

REF. OBRA: 10014 SV

OBRA: Acondic. Ctra. EX - 346. Don Benito a Quintana de la Serena

DATOS GENERALES

Lugar de Toma: Tomada en chorro de cinta, acopio obra

Fecha toma: 29/03/2012

Tipo:

CONDICIONES DE FABRICACION Y CONSERVACION

Metodo de fabricación de probetas: Martillo vibrante

Tiempo (s): 24"

Tipo de curado: Cámara húmeda (Humedad >95%)

Fecha fabricación: 03/04/2012

Tipo de cemento: CEM II/B-L 32,5 N

ENSAYOS SOLICITADOS Y NORMAS APLICADAS

Próctor modificado NLT -108

Resistencia a compresión simple NLT-305

RESULTADOS:

Próctor modificado:

Densidad máxima (gr/cm²): 2,23

Humedad óptima (%): 6,3

% CEMENTO	%	3,0%	3,5%	4,0%
Humedad del suelo en el momento de la mezcla	%			
Humedad de compactación	%	6,3	6,3	6,3
RESISTENCIA A COMPRESIÓN (7 días)	Mpa	2,8	3,7	4,1
RESISTENCIA A COMPRESIÓN (7 días)	Mpa	3,1	3,8	4,1
RESISTENCIA A COMPRESIÓN (7 días)	Mpa	2,9	3,6	4,2
MEDIA A 7 DIAS		2,9	3,7	4,1

OBSERVACIONES:

Muestra tomada en conjunto con Elaborex y laboratorio de Fomento.

Badajoz a 11 de abril de 2012

El encargado de área
Gonzalo Manso Vera

El Director de Laboratorio
Vtº Bº.: Javier Casco Redondo

EX 346 QUINTANA DE LA SERENA



SUELO CEMENTO

FECHA	LUGAR TOMA PK	TIPO DE CURADO	% CEMENTO	TIPO DE CEMENTO	DENSIDAD	HUMEDAD	RESISTENCIA A COMPRESION 7 DIAS Mpa	LABORATORIO
02/03/2012	OBRA	CÁMARA HÚMEDA	3	CEM II BL 32,5 N	2.19	7.4	2.20	LYCCSA
							2.30	
							2.30	
05/03/2012	OBRA (LYCCSA)	CÁMARA HÚMEDA	3	CEM II BL 32,5 N	2.19	-	2.10	JUNTA
							2.20	
							2.20	
13/03/2012	OBRA	CÁMARA HÚMEDA	3.5	CEM II BL 32,5 N	2.19	7.4	2.90	LYCCSA
							2.80	
							2.60	
13/03/2012	OBRA	CÁMARA HÚMEDA	4	CEM II BL 32,5 N	2.19	7.4	3.40	LYCCSA
							3.70	
							3.40	
13/03/2012	OBRA (LYCCSA)	CÁMARA HÚMEDA	3.5	CEM II BL 32,5 N	2.19	-	2.70	JUNTA
							2.60	
							2.60	
13/03/2012	OBRA (LYCCSA)	CÁMARA HÚMEDA	4	CEM II BL 32,5 N	2.19	-	3.30	JUNTA
							3.30	
							3.30	
03/04/2012	JUNTA-LYCCSA OBRA	CÁMARA HÚMEDA	3	CEM II BL 32,5 N	2.23	-	2.70	JUNTA MARTILLO VIBRANTE
							3.30	
							3.30	
03/04/2012	JUNTA-LYCCSA OBRA	CÁMARA HÚMEDA	3	CEM II BL 32,5 N	2.434	-	3.10	JUNTA MAZA
							3.20	
							2.60	
03/04/2012	JUNTA-LYCCSA OBRA	CÁMARA HÚMEDA	3.5	CEM II BL 32,5 N	2.226	-	3.80	JUNTA MARTILLO VIBRANTE
							3.30	
							3.50	
03/04/2012	JUNTA-LYCCSA OBRA	CÁMARA HÚMEDA	3.5	CEM II BL 32,5 N	2.2463	-	3.20	JUNTA MAZA
							3.40	
							3.30	
03/04/2012	JUNTA-LYCCSA OBRA	CÁMARA HÚMEDA	4	CEM II BL 32,5 N	2.2413	-	4.20	JUNTA MARTILLO VIBRANTE
							3.50	
							3.80	
03/04/2012	JUNTA-LYCCSA OBRA	CÁMARA HÚMEDA	4	CEM II BL 32,5 N	2.2382	-	3.90	JUNTA MAZA
							3.60	
							3.70	

03/04/2012	JUNTA-LYCCSA OBRA	CÁMARA HÚMEDA	3	CEM II BL 32,5 N	2.23	6.3	2.80	LYCCSA MARTILLO VIBRANTE
							3.10	
							2.90	
02/04/2012	JUNTA-LYCCSA OBRA	CÁMARA HÚMEDA	3	CEM II BL 32,5 N	2.23	6.3	3.00	LYCCSA MAZA
							2.80	
							2.90	
03/04/2012	JUNTA-LYCCSA OBRA	CÁMARA HÚMEDA	3.5	CEM II BL 32,5 N	2.23	6.3	3.70	LYCCSA MARTILLO VIBRANTE
							3.80	
							3.60	
02/04/2012	JUNTA-LYCCSA OBRA	CÁMARA HÚMEDA	3.5	CEM II BL 32,5 N	2.23	6.3	3.70	LYCCSA MAZA
							3.40	
							3.30	
03/04/2012	JUNTA-LYCCSA OBRA	CÁMARA HÚMEDA	4	CEM II BL 32,5 N	2.23	6.3	4.10	LYCCSA MARTILLO VIBRANTE
							4.10	
							4.20	
02/04/2012	JUNTA-LYCCSA OBRA	CÁMARA HÚMEDA	4	CEM II BL 32,5 N	2.23	6.3	3.90	LYCCSA MAZA
							4.00	
							4.10	

ANEXO D - Agua y cemento, usados para la mezcla

INFORME DE ENSAYO**REFERENCIA: 201216996**

Lyccsa
Manuel Sanchez Barriga, s/n
Pol. Badajoz

SOLICITANTE:

FECHAS

Recepción: 25 de julio de 2012

Inicio: 25 de julio de 2012

Finalización: 7 de agosto de 2012

MUESTRA

Muestra traída a este laboratorio por personal de la empresa solicitante, en nevera refrigerada cerrada.

DESCRIPCIÓN

Muestra de agua en contenedor de plástico esteril, etiquetado correctamente, en cantidad suficiente y a temperatura adecuada.

ETIQUETADO

Muestra 1. Tomada en Cuba P 13+500MJ Procedencia de la Canter.

ENSAYOS EFECTUADOS

Ensayo	Resultado	Método de Ensayo
Oxidabilidad (mg O2/l)	12,31	PNT-Aguas-09

Fdo: Antonio Gómez Salguero
Director técnico



LABORATORIO DE ANÁLISIS DE AGUA, S.L.

Página 1 de 1



INFORME DE ENSAYO**REFERENCIA: 201216997**

Lyccsa
Manuel Sanchez Barriga, s/n
Pol. Badajoz

SOLICITANTE:

FECHAS

Recepción: 25 de julio de 2012

Inicio: 25 de julio de 2012

Finalización: 6 de agosto de 2012

MUESTRA

Muestra traída a este laboratorio por personal de la empresa solicitante, en nevera refrigerada cerrada.

DESCRIPCIÓN

Muestra de agua en contenedor de plástico estéril, etiquetado correctamente, en cantidad suficiente y a temperatura adecuada.

ETIQUETADO

Muestra 2. Tomada en Cuba PK 12 R00MJ Procedencia Rio Ortigas.

ENSAYOS EFECTUADOS

Ensayo	Resultado	Método de Ensayo
Oxidabilidad (mg O2/l)	11,69	PNT-Aguas-09

Fdo: Antonio Gómez Salguero
Director técnico



LABORATORIO DE ANÁLISIS DE AGUA, S.L.

Página 1 de 1



AENOR CTC-015 "Cementos"	CERTIFICADO DE EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LA PRODUCCIÓN
Empresa: CEMENTOS PORTLAND VALDERRIVAS, S.A.	 Producto Certificado
Fabrica: MORATA DE TAJUÑA	
CEMENTO: CEM II/B-L 32,5 N	
UNE-EN 197-1:2000	
Periodo estudiado: 02/2011 - 01/2012	Certificado AENOR: 015/001811

La Secretaría del CTC-015 certifica que este producto está en posesión de la marca N de AENOR de cementos, que es un distintivo de calidad oficialmente reconocido, a efectos de lo dispuesto en la EHE-08 y el RC-08, según consta en la página www.fomento.es, y que los resultados correspondientes al período considerado, se corresponden con los datos que se muestran a continuación:

CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO

COEFICIENTE λ_{M1} PARA LA OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE SENSIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL ()**

100

Composición Nominal declarada por el fabricante(%):

Clinker	Puzolana	Ceniza	Escoria	Caliza	Esquisto	Humo	Comp. Min.
75				25			

CONTROL POR VARIABLES

Control de producción

Nº de muestras: 124

	Resistencias (MPa)		Fraguados (min.)	
	a 7 días	a 28 días	I.F.	F.F.
Especificación	≥ 16	32,5 < > 52,5	≥ 75	≤ 720
Nº ensayos	124	124	124	124
Valor medio	31,7	41,3	142	181
Desviación típica	2,73	2,6	9	14
V. característico inf.	26,4	36,3	128	160
V. característico sup.	35,9	45,3	156	202

Especificación
Nº ensayos
Valor medio
Desviación típica
V. absoluto inferior
V. absoluto superior

Riesgo del consumidor < 3,25 %

Muestras de contraste

Nº de muestras: 11

	Resistencias (MPa)		Fraguados (min.)	
	a 7 días	a 28 días	I.F.	F.F.
Especificación	≥ 16	32,5 < > 52,5	≥ 75	≤ 720
Nº ensayos	9	9	9	9
Valor medio	30,7	38,9	142	188
Desviación típica	1,59	1,18	14	18
V. absoluto inferior	27,7	37,2	115	165
V. absoluto superior	32,8	40,6	160	225

CONTROL POR ATRIBUTOS (características físicas y químicas):

Control de producción

Nº de muestras: 124

	P.F. (%)	R.I. (%)	CL (%)	SO3 (%)	EXP (mm)
Especificación			≤ 0,1	≤ 3,5	≤ 10
Nº de ensayos			24	124	124
Valor medio			0,00	2,77	0
Nº defectos			0	0	0
Nº defectos admitidos			0	7	7

Muestras de contraste


Nº de muestras: 11

	P.F. (%)	R.I. (%)	CL (%)	SO3 (%)	EXP (mm)
Especificación			≤ 0,1	≤ 3,5	≤ 10
Nº de ensayos			9	9	9
Valor medio			0,00	2,34	0,3
Nº defectos			0	0	0
Nº defectos admitidos			0	0	0

Característica complementaria de Cr(VI) soluble en agua certificada según la norma UNE-EN 196-10 de acuerdo a lo establecido en la Directiva 2003/53/CE. El contenido de Cr(VI) soluble en agua es conforme con el límite máximo de 0,0002% establecido en la Orden Ministerial PRE/1954/2004 de junio que transpone dicha Directiva.

Fdo: ROSARIO MARTINEZ LEBRUSANT
Fecha: 01/04/2012

(**) Non covered by ENAC accreditation

AENOR CTC-015 "Cements"	CERTIFICATE OF STATISTICAL ASSESSMENT OF CEMENT PRODUCTION
Company: CEMENTOS PORTLAND VALDERRIVAS, S.A.	
Cement Plant: MORATA DE TAJUÑA	
CEMENT: CEM II/B-L 32,5 N	UNE-EN 197-1:2000
Evaluated period: 02/2011 - 01/2012	AENOR Certificate: 015/001811

The Secretary of CTC-015 certifies that this product holds the AENOR's N mark which is an official recognized distinctive regarding to which is stated in EHE 08 and RC08 (www.fomento.es), and that the results corresponding to the evaluated period are summarized below:

CHARACTERISTICS OF CEMENT

λ_{11} COEFFICIENT FOR OBTAINING THE ENVIRONMENTAL SENSITIVITY INDEX (EHE 08) (**)

100

Nominal composition (declared by the producer) (%):

Clinker	Pozzolana	Fly ash	Blast furnace slag	Limestone	Burnt shale	Silica fume	Minor constituents
75				25			

INSPECTION BY VARIABLES

Autocontrol samples

Number of samples 124

	Strength (MPa)		Setting time (min.)		
	a 7 días	a 28 días	Initial	Final	
Specification	≥ 16	32,5 < > 52,5	≥ 75	≤ 720	Specification
Number of tests	124	124	124	124	Number of tests
Average value	31,7	41,3	142	181	Average value
Standard deviation	2,73	2,6	9	14	Standard deviation
Lower characteristic value	26,4	36,3	128	160	Lower absolute value
Upper characteristic value	35,9	45,3	156	202	Upper absolute value

Consumer's risk < 3,25 %

Audit samples

Number of samples 11

	Strength (MPa)		Setting time (min.)		
	a 7 días	a 28 días	Initial	Final	
Specification	≥ 16	32,5 < > 52,5	≥ 75	≤ 720	Specification
Number of tests	9	9	9	9	Number of tests
Average value	30,7	38,9	142	188	Average value
Standard deviation	1,59	1,18	14	18	Standard deviation
Lower characteristic value	27,7	37,2	115	165	Lower absolute value
Upper characteristic value	32,8	40,6	160	225	Upper absolute value

INSPECTION BY ATTRIBUTES (Physical and chemical characteristics):

Autocontrol samples

Number of samples 124

	Loss on Ignition (%)	Insoluble residue (%)	Chloride (%)	SO ₃ (%)	Soundness (mm)
Specification			≤ 0,1	≤ 3,5	≤ 10
Number of tests			24	124	124
Average value			0	2,77	0
Nº of defaults			0	0	0
Nº of defaults admitted			0	7	7

Audit samples

Number of samples 11

	Loss on Ignition (%)	Insoluble residue (%)	Chloride (%)	SO ₃ (%)	Soundness (mm)
Specification			≤ 0,1	≤ 3,5	≤ 10
Number of tests			9	9	9
Average value			0	2,34	0,3
Nº of defaults			0	0	0
Nº of defaults admitted			0	0	0

Complementary characteristic of water-soluble Cr(VI) is certified according to UNE EN 196-10 and to the Directive 2003/53/CE. The water-soluble Cr(VI) content complies the limit of 0,0002% stated in the Ministerial Order PRE/1954/2004 which transposes that Directive.


 Signature: ROSARIO MARTINEZ LEBRUSANT
 Date: 01/04/2012

This report is valid until 1 July 2012

**ANEXO E - Control diario de entradas de cemento a la planta, salidas de Tn de SC
de la planta y superficie extendidas diariamente de Suelocemento
Sacando dotación media y espesores teoricos**

SUELO CEMENTO EX 346 QUINTANA DE LA SERENA

FECHA	TN GASTADAS	MD		MI		AREA		DENSIDAD DIA	VOLUMEN	ESPESOR REAL
		PK INICIO	PK FINAL	PK INICIO	PK FINAL	ANCHO	LONG.			
11/07/2012	326.49			13900	13991	5.45	91	2.13	153.28169	0.31
12/07/2012	1362.31	14255	14290	13991	14290	5.45	334	2.11	645.64455	0.35
13/07/2012	1303.5	13906	14255			5.45	349	2.1	620.714286	0.33
16/07/2012	3239.07	13500	13906	13500	13906	10.9	406	2.09	1549.79426	0.35
17/07/2012	3911.87	12970	13500	12970	13500	10.9	530	2.1	1862.79524	0.32
18/07/2012	3390.8	12490	12970	12490	12970	10.9	480	2.11	1607.01422	0.31
19/07/2012	3485.52	11985	12490	11985	12490	10.9	445	2.13	1636.39437	0.34
20/07/2012	3161.17	11595	11985	11595	11985	10.9	390	2.14	1477.18224	0.35
23/07/2012	3688.98	11105	11595	11105	11595	10.9	490	2.12	1740.08491	0.33
24/07/2012	3043.75	10725	11105	10725	11105	10.9	380	2.11	1442.53555	0.35
25/07/2012	3184.56	10230	10725	10230	10725	10.9	495	2.12	1502.15094	0.28
26/07/2012	3176.08	9830	10230	9830	10230	10.9	400	2.09	1519.6555	0.35
27/07/2012	2342.15	9517	9830	9517	9830	10.9	313	2.11	1110.0237	0.33
30/07/2012	1966.56	9265	9517	9265	9517	3131		2.11	932.018957	0.30
31/07/2012	3106.93	8900	9265	8900	9265	4578.5		2.11	1472.47867	0.32
01/08/2012	2948.77	8545	8900	8545	8900	4069.5		2.14	1377.92991	0.34
02/08/2012	1853.52	8325	8545	8325	8545	10.9	220	2.16	858.111111	0.36
03/08/2012	2487.44	8020	8325	8020	8325	3524.5		2.12	1173.32075	0.33
06/08/2012	3216.84	7593	8020	7593	8020	10.9	427	2.16	1489.27778	0.32
07/08/2012	3452.12	7135	7593	7135	7593	10.9	458	2.14	1613.14019	0.32
08/08/2012	3877	6657	7135	6657	7135	10.9	478	2.11	1837.44076	0.35
09/08/2012	3780.64	6202	6657	6202	6657	10.9	455	2.13	1774.94836	0.36
10/08/2012	2250.8	5945	6202	5945	6202	10.9	257	2.16	1042.03704	0.37
13/08/2012	3125.73	0	280	0	280	4075		2.12	1474.40094	0.36
14/08/2012	3032.49	280	470	280	470	4162		2.16	1403.93056	0.34
16/08/2012	3707.25	470	901	470	901	4907.05		2.14	1732.35981	0.35
17/08/2012	2774.91	901	1280	901	1280	10.9	379	2.2	1261.32273	0.31
20/08/2012	4153.36	1280	1832	1280	1832	10.9	552	2.12	1959.13208	0.33
21/08/2012	3975.85	1832	2323	1832	2323	10.9	491	2.15	1849.23256	0.35
22/08/2012	3801.25	2323	2881	2323	2881	10.9	479	2.13	1784.62441	0.34
23/08/2012	3872.14	2881	3347	2881	3347	10.9	466	2.14	1809.41121	0.36
24/08/2012	2184	3347	3703	3347	3703	10.9	356	2.15	1015.81395	0.26
27/08/2012	3960.49	3703	4158	3703	4158	10.9	455	2.14	1850.69626	0.37

28/08/2012	3826.14	4158	4606	4158	4606	10.9	448	2.18	1755.11009	0.36
29/08/2012	1795.36	4606	4843	4606	4843	10.9	237	2.15	835.051163	0.32
30/08/2012	3052.52	4843	5275	4843	5275	10.9	432	2.15	1419.77674	0.30
03/09/2012	3451.36	5535	5945	5535	5945	10.9	410	2.15	1605.28372	0.36
04/09/2012	2410.17	5275	5535	5275	5535	10.9	260	2.15	1121.0093	0.40

113679.89

0.3357

tn al 3,0%	20180.73	605.4219
tn al 3,5%	93499.16	3272.4706
	3877.8925	

TN DE CEMENTO SE NECESITAN PARA REALIZAR

113679.89

FECHA	TN
09/07/2012	25.92
	27.66
	28.02
12/07/2012	28.28
	27.56
	28.36
	28.04
13/07/2012	28.1
	27.82
16/07/2012	28.7
	28.24
17/07/2012	28.44
	28.3
	27.96
	27.84
	27.98
18/07/2012	28.76
	28.24
	28.42
	28.1
19/07/2012	28.02
	26.42
	28.04
20/07/2012	28.26
	28.06
	27.76

23/07/2012	28.32
	27.92
	28.04
24/07/2012	28.28
	28.76
	28.58
	28.3
25/07/2012	28.32
	28.5
	28.46
	28.04
26/07/2012	28.34
	28.44
	28.4
27/07/2012	27.82
	27.96
	27.78
	28
30/07/2012	28.04
	26.26
31/07/2012	26.4
	28.22
	27.78
	27.72
	27.5
	27.94
01/08/2012	28.14
	28
02/08/2012	28.3
	27.76
	28.12
	28.16
03/08/2012	27.28
	28.12
	28.08
	28.26
06/08/2012	27.56

	27
	28.28
	27.84
07/08/2012	28.28
	27.64
	28.3
08/08/2012	26.82
	27.62
	27.94
	28.18
	27.92
09/08/2012	28.32
	27.76
	27.46
	28.5
	26.36
10/08/2012	27.92
	28.32
13/08/2012	28.5
	28.26
	27.74
	27.26
	28.1
14/08/2012	28.04
	27.78
	28.18
	26.26
	27.06
	27.68
	28.52
16/08/2012	27.8
	28.16
	28.32
	27.86
	28.62
	28.12
17/08/2012	28.16

	28.34
	27.4
	28.02
20/08/2012	27.78
	27.04
	26.3
	26.8
21/08/2012	28.06
	28.14
22/08/2012	26.88
	27.84
	28.48
	28.24
23/08/2012	28.3
	27.38
	27.94
24/08/2012	28.42
	27.24
	28.06
	26.78
	26.68
27/08/2012	27.48
	28.1
	28.4
	28.4
	28.28
	28.44
28/08/2012	28
	27.76
	27.06
	28.32
29/08/2012	28.2
	28.28
30/08/2012	27.94
	26.78
	28.16
	28.32

03/09/2012	27.54
04/09/2012	26.78

3876.44

**ANEXO F - Topografía. Listados de Nivelación antes y después de extendido del
suelocemento**

COMPROBACIÓN EXPLANADA SUELO SELECCIONADO
EX 346 QUINTANA DE LA SERENA
EXACO YDOPEX, S.A.

5, 3 RET. DEL EJE

P.K.	MARGEN	Z Teorica	Z Real	Diferencia
13000	I	386.502	386.502	0.000
13000	C	386.608	386.600	-0.008
13000	D	386.502	386.502	0.000
13010	I	386.634	386.602	-0.032
13010	C	386.740	386.702	-0.038
13010	D	386.634	386.628	-0.006
13020	I	386.766	386.742	-0.024
13020	C	386.872	386.850	-0.022
13020	D	386.766	386.760	-0.006
13030	I	386.898	386.874	-0.024
13030	C	387.004	386.974	-0.030
13030	D	386.898	386.882	-0.016
13040	I	387.030	386.996	-0.034
13040	C	387.136	387.106	-0.030
13040	D	387.030	387.030	0.000
13050	I	387.162	387.136	-0.026
13050	C	387.268	387.246	-0.022
13050	D	387.162	387.160	-0.002
13060	I	387.294	387.266	-0.028
13060	C	387.400	387.374	-0.026
13060	D	387.294	387.290	-0.004
13070	I	387.425	387.410	-0.015
13070	C	387.531	387.508	-0.023
13070	D	387.425	387.406	-0.019
13080	I	387.557	387.524	-0.033
13080	C	387.663	387.643	-0.020
13080	D	387.557	387.552	-0.005
13090	I	387.689	387.680	-0.009
13090	C	387.795	387.778	-0.017
13090	D	387.689	387.687	-0.002
13100	I	387.821	387.818	-0.003
13100	C	387.927	387.910	-0.017
13100	D	387.821	387.821	0.000
13110	I	387.953	387.950	-0.003
13110	C	388.059	388.046	-0.013
13110	D	387.953	387.950	-0.003
13120	I	388.085	388.080	-0.005
13120	C	388.191	388.182	-0.009
13120	D	388.085	388.080	-0.005
13130	I	388.217	388.212	-0.005
13130	C	388.323	388.306	-0.017
13130	D	388.217	388.216	-0.001
13140	I	388.348	388.330	-0.018
13140	C	388.454	388.440	-0.014
13140	D	388.348	388.344	-0.004
13150	I	388.480	388.444	-0.036
13150	C	388.586	388.560	-0.026
13150	D	388.480	388.458	-0.022

13160	I	388.612	388.604	-0.008
13160	C	388.718	388.692	-0.026
13160	D	388.612	388.606	-0.006
13170	I	388.744	388.722	-0.022
13170	C	388.850	388.829	-0.021
13170	D	388.744	388.735	-0.009
13180	I	388.876	388.827	-0.049
13180	C	388.982	388.975	-0.007
13180	D	388.876	388.870	-0.006
13190	I	389.008	388.967	-0.041
13190	C	389.114	389.092	-0.022
13190	D	389.008	388.997	-0.011
13200	I	389.140	389.127	-0.013
13200	C	389.246	389.232	-0.014
13200	D	389.140	389.131	-0.009
13210	I	389.271	389.259	-0.012
13210	C	389.377	389.371	-0.006
13210	D	389.271	389.261	-0.010
13220	I	389.403	389.391	-0.012
13220	C	389.509	389.509	0.000
13220	D	389.403	389.403	0.000
13230	I	389.535	389.522	-0.013
13230	C	389.641	389.633	-0.008
13230	D	389.535	389.520	-0.015
13240	I	389.667	389.641	-0.026
13240	C	389.773	389.763	-0.010
13240	D	389.667	389.660	-0.007
13250	I	389.798	389.781	-0.017
13250	C	389.904	389.876	-0.028
13250	D	389.798	389.785	-0.013
13260	I	389.926	389.911	-0.015
13260	C	390.032	390.023	-0.009
13260	D	389.926	389.883	-0.043
13270	I	390.051	390.023	-0.028
13270	C	390.157	390.141	-0.016
13270	D	390.051	390.035	-0.016
13280	I	390.173	390.151	-0.022
13280	C	390.279	390.233	-0.046
13280	D	390.173	390.151	-0.022
13290	I	390.291	390.271	-0.020
13290	C	390.397	390.373	-0.024
13290	D	390.291	390.271	-0.020
13300	I	390.407	390.375	-0.032
13300	C	390.513	390.486	-0.027
13300	D	390.407	390.393	-0.014
13310	I	390.520	390.471	-0.049
13310	C	390.626	390.598	-0.028
13310	D	390.520	390.500	-0.020
13320	I	390.630	390.594	-0.036
13320	C	390.736	390.706	-0.030
13320	D	390.630	390.610	-0.020
13330	I	390.737	390.708	-0.029
13330	C	390.843	390.820	-0.023

13330	D	390.737	390.726	-0.011
13340	I	390.841	390.818	-0.023
13340	C	390.947	390.906	-0.041
13340	D	390.841	390.820	-0.021
13350	I	390.941	390.928	-0.013
13350	C	391.047	391.030	-0.017
13350	D	390.941	390.936	-0.005
13360	I	391.039	391.030	-0.009
13360	C	391.145	391.141	-0.004
13360	D	391.039	391.014	-0.025
13370	I	391.134	391.130	-0.004
13370	C	391.240	391.228	-0.012
13370	D	391.134	391.118	-0.016
13380	I	391.226	391.220	-0.006
13380	C	391.332	391.332	0.000
13380	D	391.226	391.216	-0.010
13390	I	391.314	391.310	-0.004
13390	C	391.420	391.413	-0.007
13390	D	391.314	391.306	-0.008
13400	I	391.400	391.390	-0.010
13400	C	391.506	391.491	-0.015
13400	D	391.400	391.378	-0.022
13410	I	391.483	391.454	-0.029
13410	C	391.589	391.564	-0.025
13410	D	391.483	391.470	-0.013
13420	I	391.563	391.532	-0.031
13420	C	391.669	391.622	-0.047
13420	D	391.563	391.540	-0.023
13430	I	391.639	391.608	-0.031
13430	C	391.745	391.712	-0.033
13430	D	391.639	391.622	-0.017
13440	I	391.713	391.682	-0.031
13440	C	391.819	391.776	-0.043
13440	D	391.713	391.693	-0.020
13450	I	391.784	391.765	-0.019
13450	C	391.890	391.857	-0.033
13450	D	391.784	391.766	-0.018
13460	I	391.852	391.840	-0.012
13460	C	391.958	391.928	-0.030
13460	D	391.852	391.845	-0.007
13470	I	391.919	391.913	-0.006
13470	C	392.025	392.004	-0.021
13470	D	391.919	391.908	-0.011
13480	I	391.987	391.980	-0.007
13480	C	392.093	392.072	-0.021
13480	D	391.987	391.958	-0.029
13490	I	392.054	392.040	-0.014
13490	C	392.160	392.137	-0.023
13490	D	392.054	392.025	-0.029
13500	I	392.122	392.094	-0.028
13500	C	392.228	392.200	-0.028
13500	D	392.122	392.093	-0.029
13510	I	392.189	392.162	-0.027

13510	C	392.295	392.268	-0.027
13510	D	392.189	392.176	-0.013
13520	I	392.257	392.236	-0.021
13520	C	392.363	392.345	-0.018
13520	D	392.257	392.230	-0.027
13530	I	392.324	392.290	-0.034
13530	C	392.430	392.400	-0.030
13530	D	392.324	392.296	-0.028
13540	I	392.392	392.373	-0.019
13540	C	392.498	392.468	-0.030
13540	D	392.392	392.360	-0.032
13550	I	392.459	392.447	-0.012
13550	C	392.565	392.524	-0.041
13550	D	392.459	392.420	-0.039
13560	I	392.527	392.503	-0.024
13560	C	392.633	392.600	-0.033
13560	D	392.527	392.493	-0.034
13570	I	392.594	392.578	-0.016
13570	C	392.700	392.666	-0.034
13570	D	392.594	392.558	-0.036
13580	I	392.662	392.662	0.000
13580	C	392.768	392.753	-0.015
13580	D	392.662	392.638	-0.024
13590	I	392.730	392.711	-0.019
13590	C	392.836	392.800	-0.036
13590	D	392.730	392.704	-0.026
13600	I	392.797	392.775	-0.022
13600	C	392.903	392.881	-0.022
13600	D	392.797	392.790	-0.007
13610	I	392.865	392.848	-0.017
13610	C	392.971	392.950	-0.021
13610	D	392.865	392.833	-0.032
13620	I	392.932	392.929	-0.003
13620	C	393.038	393.019	-0.019
13620	D	392.932	392.910	-0.022
13630	I	393.000	392.976	-0.024
13630	C	393.106	393.068	-0.038
13630	D	393.000	392.966	-0.034
13640	I	393.067	393.061	-0.006
13640	C	393.173	393.150	-0.023
13640	D	393.067	393.040	-0.027
13650	I	393.135	393.122	-0.013
13650	C	393.241	393.216	-0.025
13650	D	393.135	393.124	-0.011
13660	I	393.202	393.170	-0.032
13660	C	393.308	393.279	-0.029
13660	D	393.202	393.198	-0.004
13670	I	393.270	393.258	-0.012
13670	C	393.376	393.353	-0.023
13670	D	393.270	393.253	-0.017
13680	I	393.337	393.317	-0.020
13680	C	393.443	393.440	-0.003
13680	D	393.337	393.302	-0.035

13690	I	393.407	393.403	-0.004
13690	C	393.513	393.483	-0.030
13690	D	393.407	393.373	-0.034
13700	I	393.484	393.455	-0.029
13700	C	393.590	393.565	-0.025
13700	D	393.484	393.469	-0.015
13710	I	393.570	393.561	-0.009
13710	C	393.676	393.668	-0.008
13710	D	393.570	393.563	-0.007
13720	I	393.665	393.649	-0.016
13720	C	393.771	393.768	-0.003
13720	D	393.665	393.648	-0.017
13730	I	393.767	393.763	-0.004
13730	C	393.873	393.846	-0.027
13730	D	393.767	393.755	-0.012
13740	I	393.878	393.868	-0.010
13740	C	393.984	393.980	-0.004
13740	D	393.878	393.858	-0.020
13750	I	393.998	393.989	-0.009
13750	C	394.104	394.080	-0.024
13750	D	393.998	393.985	-0.013
13760	I	394.125	394.102	-0.023
13760	C	394.231	394.204	-0.027
13760	D	394.125	394.113	-0.012
13770	I	394.261	394.247	-0.014
13770	C	394.367	394.341	-0.026
13770	D	394.261	394.258	-0.003
13780	I	394.405	394.400	-0.005
13780	C	394.511	394.483	-0.028
13780	D	394.405	394.380	-0.025
13790	I	394.558	394.553	-0.005
13790	C	394.664	394.643	-0.021
13790	D	394.558	394.549	-0.009
13800	I	394.719	394.703	-0.016
13800	C	394.825	394.820	-0.005
13800	D	394.719	394.715	-0.004
13810	I	394.888	394.885	-0.003
13810	C	394.994	394.970	-0.024
13810	D	394.888	394.880	-0.008
13820	I	395.066	395.060	-0.006
13820	C	395.172	395.154	-0.018
13820	D	395.066	395.051	-0.015
13830	I	395.252	395.251	-0.001
13830	C	395.358	395.337	-0.021
13830	D	395.252	395.250	-0.002
13840	I	395.446	395.420	-0.026
13840	C	395.552	395.535	-0.017
13840	D	395.446	395.426	-0.020
13850	I	395.649	395.635	-0.014
13850	C	395.755	395.747	-0.008
13850	D	395.649	395.637	-0.012
13860	I	395.856	395.838	-0.018
13860	C	395.962	395.959	-0.003

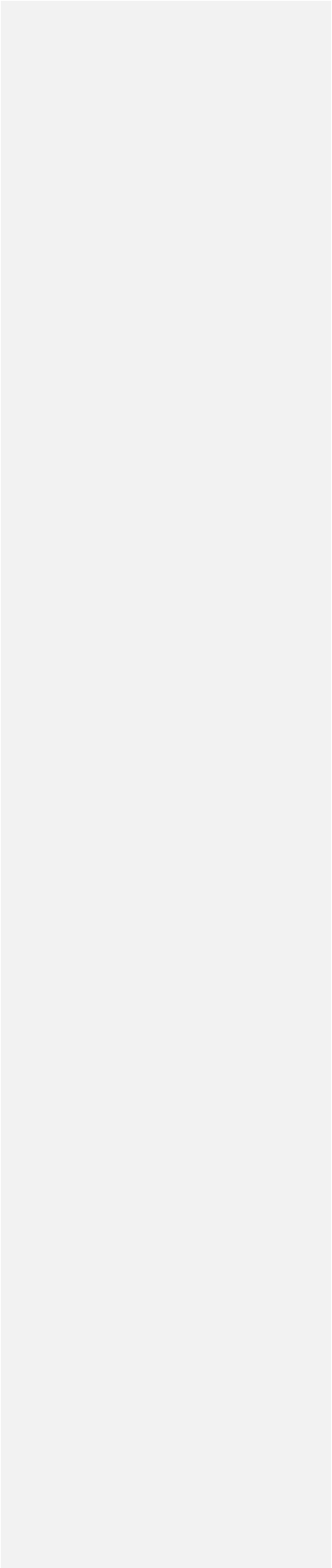
13860	D	395.856	395.849	-0.007
13870	I	396.062	396.053	-0.009
13870	C	396.168	396.147	-0.021
13870	D	396.062	396.062	0.000
13880	I	396.269	396.245	-0.024
13880	C	396.375	396.353	-0.022
13880	D	396.269	396.238	-0.031
13890	I	396.476	396.471	-0.005
13890	C	396.582	396.558	-0.024
13890	D	396.476	396.476	0.000
13900	I	396.683	396.675	-0.008
13900	C	396.789	396.779	-0.010
13900	D	396.683	396.670	-0.013
13910	I	396.890	396.885	-0.005
13910	C	396.996	396.975	-0.021
13910	D	396.890	396.892	0.002
13920	I	397.097	397.085	-0.012
13920	C	397.203	397.185	-0.018
13920	D	397.097	397.092	-0.005
13930	I	397.303	397.300	-0.003
13930	C	397.409	397.389	-0.020
13930	D	397.303	397.298	-0.005
13940	I	397.510	397.509	-0.001
13940	C	397.616	397.595	-0.021
13940	D	397.510	397.507	-0.003
13950	I	397.717	397.713	-0.004
13950	C	397.823	397.792	-0.031
13950	D	397.717	397.689	-0.028
13960	I	397.924	397.915	-0.009
13960	C	398.030	397.991	-0.039
13960	D	397.924	397.913	-0.011
13970	I	398.131	398.118	-0.013
13970	C	398.237	398.193	-0.044
13970	D	398.131	398.093	-0.038
13980	I	398.337	398.315	-0.022
13980	C	398.443	398.397	-0.046
13980	D	398.337	398.304	-0.033
13990	I	398.544	398.507	-0.037
13990	C	398.650	398.605	-0.045
13990	D	398.544	398.517	-0.027
14000	I	398.751	398.717	-0.034
14000	C	398.857	398.823	-0.034
14000	D	398.751	398.733	-0.018
14010	I	398.958	398.941	-0.017
14010	C	399.064	399.029	-0.035
14010	D	398.958	398.927	-0.031
14020	I	399.165	399.147	-0.018
14020	C	399.271	399.243	-0.028
14020	D	399.165	399.141	-0.024
14030	I	399.371	399.335	-0.036
14030	C	399.477	399.433	-0.044
14030	D	399.371	399.357	-0.014

PK	DISTANCIA EJE	COTA TEORICA	CATA REAL	DIFERENCIA	MARGEN
13530	-5.1	392.628	392.626	-0.002	I
13530	0	392.73	392.726	-0.004	C
13530	5.1	392.628	392.61	-0.018	D
13540	-5.1	392.696	392.696	0	I
13540	0	392.798	392.806	0.008	C
13540	5.1	392.696	392.678	-0.018	D
13550	-5.1	392.763	392.76	-0.003	I
13550	0	392.865	392.877	0.012	C
13550	5.1	392.763	392.758	-0.005	D
13560	-5.1	392.831	392.826	-0.005	I
13560	0	392.933	392.943	0.01	C
13560	5.1	392.831	392.82	-0.011	D
13570	-5.1	392.898	392.884	-0.014	I
13570	0	393	393	0	C
13570	5.1	392.898	392.89	-0.008	D
13580	-5.1	392.966	392.975	0.009	I
13580	0	393.068	393.081	0.013	C
13580	5.1	392.966	392.957	-0.009	D
13590	-5.1	393.034	393.038	0.004	I
13590	0	393.136	393.148	0.012	C
13590	5.1	393.034	393.035	0.001	D
13600	-5.1	393.101	393.108	0.007	I
13600	0	393.203	393.213	0.01	C
13600	5.1	393.101	393.105	0.004	D
13610	-5.1	393.169	393.183	0.014	I
13610	0	393.271	393.282	0.011	C
13610	5.1	393.169	393.158	-0.011	D
13620	-5.1	393.236	393.23	-0.006	I
13620	0	393.338	393.348	0.01	C
13620	5.1	393.236	393.217	-0.019	D
13630	-5.1	393.304	393.286	-0.018	I
13630	0	393.406	393.41	0.004	C
13630	5.1	393.304	393.285	-0.019	D
13640	-5.1	393.371	393.355	-0.016	I
13640	0	393.473	393.465	-0.008	C
13640	5.1	393.371	393.355	-0.016	D
13650	-5.1	393.439	393.443	0.004	I
13650	0	393.541	393.549	0.008	C
13650	5.1	393.439	393.437	-0.002	D
13660	-5.1	393.506	393.504	-0.002	I
13660	0	393.608	393.617	0.009	C
13660	5.1	393.506	393.511	0.005	D
13670	-5.1	393.574	393.552	-0.022	I
13670	0	393.676	393.68	0.004	C
13670	5.1	393.574	393.58	0.006	D
13680	-5.1	393.641	393.619	-0.022	I
13680	0	393.743	393.722	-0.021	C
13680	5.1	393.641	393.635	-0.006	D
13690	-5.1	393.711	393.69	-0.021	I
13690	0	393.813	393.814	0.001	C
13690	5.1	393.711	393.689	-0.022	D
13700	-5.1	393.788	393.765	-0.023	I
13700	0	393.89	393.882	-0.008	C
13700	5.1	393.788	393.77	-0.018	D
13710	-5.1	393.874	393.86	-0.014	I
13710	0	393.976	393.965	-0.011	C
13710	5.1	393.874	393.877	0.003	D
13720	-5.1	393.969	393.949	-0.02	I
13720	0	394.071	394.054	-0.017	C

13720	5.1	393.969	393.96	-0.009	D
13730	-5.1	394.071	394.061	-0.01	I
13730	0	394.173	394.169	-0.004	C
13730	5.1	394.071	394.062	-0.009	D
13740	-5.1	394.182	394.164	-0.018	I
13740	0	394.284	394.278	-0.006	C
13740	5.1	394.182	394.172	-0.01	D
13750	-5.1	394.302	394.298	-0.004	I
13750	0	394.404	394.408	0.004	C
13750	5.1	394.302	394.308	0.006	D
13760	-5.1	394.429	394.418	-0.011	I
13760	0	394.531	394.526	-0.005	C
13760	5.1	394.429	394.436	0.007	D
13770	-5.1	394.565	394.567	0.002	I
13770	0	394.667	394.674	0.007	C
13770	5.1	394.565	394.565	0	D
13780	-5.1	394.709	394.705	-0.004	I
13780	0	394.811	394.818	0.007	C
13780	5.1	394.709	394.71	0.001	D
13790	-5.1	394.862	394.842	-0.02	I
13790	0	394.964	394.962	-0.002	C
13790	5.1	394.862	394.844	-0.018	D
13800	-5.1	395.023	395.008	-0.015	I
13800	0	395.125	395.126	0.001	C
13800	5.1	395.023	395.026	0.003	D
13810	-5.1	395.192	395.174	-0.018	I
13810	0	395.294	395.288	-0.006	C
13810	5.1	395.192	395.172	-0.02	D
13820	-5.1	395.37	395.348	-0.022	I
13820	0	395.472	395.465	-0.007	C
13820	5.1	395.37	395.348	-0.022	D
13830	-5.1	395.556	395.54	-0.016	I
13830	0	395.658	395.65	-0.008	C
13830	5.1	395.556	395.544	-0.012	D
13840	-5.1	395.75	395.728	-0.022	I
13840	0	395.852	395.867	0.015	C
13840	5.1	395.75	395.757	0.007	D
13850	-5.1	395.953	395.938	-0.015	I
13850	0	396.055	396.058	0.003	C
13850	5.1	395.953	395.938	-0.015	D
13860	-5.1	396.16	396.138	-0.022	I
13860	0	396.262	396.252	-0.01	C
13860	5.1	396.16	396.138	-0.022	D
13870	-5.1	396.366	396.348	-0.018	I
13870	0	396.468	396.454	-0.014	C
13870	5.1	396.366	396.354	-0.012	D
13880	-5.1	396.573	396.555	-0.018	I
13880	0	396.675	396.664	-0.011	C
13880	5.1	396.573	396.55	-0.023	D
13890	-5.1	396.78	396.756	-0.024	I
13890	0	396.882	396.859	-0.023	C
13890	5.1	396.78	396.759	-0.021	D
13900	-5.1	396.987	396.977	-0.01	I
13900	0	397.089	397.066	-0.023	C
13900	5.1	396.987	396.982	-0.005	D
13910	-5.1	397.194	397.17	-0.024	I
13910	0	397.296	397.276	-0.02	C
13910	5.1	397.194	397.177	-0.017	D
13920	-5.1	397.401	397.387	-0.014	I
13920	0	397.503	397.486	-0.017	C
13920	5.1	397.401	397.383	-0.018	D
13930	-5.3	397.603	397.6	-0.003	I
13930	0	397.709	397.7	-0.009	C

13930	5.3	397.603	397.598	-0.005	D
13940	-5.3	397.81	397.802	-0.008	I
13940	0	397.916	397.895	-0.021	C
13940	5.3	397.81	397.797	-0.013	D
13950	-5.3	398.017	398.004	-0.013	I
13950	0	398.123	398.102	-0.021	C
13950	5.3	398.017	397.995	-0.022	D
13960	-5.3	398.224	398.21	-0.014	I
13960	0	398.33	398.307	-0.023	C
13960	5.3	398.224	398.2	-0.024	D
13970	-5.3	398.431	398.435	0.004	I
13970	0	398.537	398.52	-0.017	C
13970	5.3	398.431	398.408	-0.023	D
13980	-5.3	398.637	398.646	0.009	I
13980	0	398.743	398.724	-0.019	C
13980	5.3	398.637	398.626	-0.011	D
13990	-5.3	398.844	398.828	-0.016	I
13990	0	398.95	398.927	-0.023	C
13990	5.3	398.844	398.82	-0.024	D
14000	-5.3	399.051	399.031	-0.02	I
14000	0	399.157	399.136	-0.021	C
14000	5.3	399.051	399.032	-0.019	D
14010	-5.3	399.258	399.237	-0.021	I
14010	0	399.364	399.347	-0.017	C
14010	5.3	399.258	399.24	-0.018	D
14020	-5.3	399.465	399.447	-0.018	I
14020	0	399.571	399.555	-0.016	C
14020	5.3	399.465	399.447	-0.018	D
14030	-5.3	399.671	399.66	-0.011	I
14030	0	399.777	399.761	-0.016	C
14030	5.3	399.671	399.665	-0.006	D

ANEXO G - Compactación de la capa de suelocemento (densidades y humedades)



DENSIDADES IN SITU

ENSAYO N°: 12/ 1313 **FECHA DE TOMA:** 19/07/12
CLIENTE: EXACO - DOPEX **REF. OBRA:** 10014 SV
OBRA: Acondicionamiento Ctra. EX - 346. Don Benito a Quintana de la Serena

Ensayos solicitados y normas aplicadas: ASTM-D 6938

Nº	PK	PROF. 150 mm		PROCTOR REFERENCIA Dens/Humed		DENSIDAD OBTENIDA Absol/relat		HUMEDAD EXISTENTE %	NOTAS
		MARGEN	TONGADA	grs/cm3	%	grs/cm3	%		
1250	12+300							2,8	.
1251	12+300							2,7	.
1252	12+300							3,0	.
1253	12+300							3,4	.
1254	12+500		S.C.	2,13	3,8	2,106	99,0	3,0	.
1255	12+450		S.C.	2,13	3,8	2,132	100,0	3,7	.
1256	12+400		S.C.	2,13	3,8	2,128	100,0	3,9	.
1257	12+350		S.C.	2,13	3,8	2,109	99,0	3,3	.
1258	12+300		S.C.	2,13	3,8	2,102	99,0	2,8	.
1259	12+250		S.C.	2,13	3,8	2,117	99,0	3,0	.
1260	12+200		S.C.	2,13	3,8	2,124	100,0	3,3	.
1261	12+160		S.C.	2,13	3,8	2,135	100,0	3,9	.
1262	12+080		S.C.	2,10	3,5	2,109	100,0	3,0	.
1263	12+030		S.C.	2,10	3,5	2,128	101,0	3,5	.

OBSERVACIONES:

Badajoz a, 23 de julio de 2012

EL ENCARGADO DE AREA
Gonzalo Manso Vera

EL DIRECTOR DEL LABORATORIO
Vtº Bº Javier Casco Redondo

DENSIDADES IN SITU

ENSAYO N°: 12/ 1334 **FECHA DE TOMA:** 23/07/12
CLIENTE: EXACO - DOPEX **REF. OBRA:** 10014 SV
OBRA: Acondicionamiento Ctra. EX - 346. Don Benito a Quintana de la Serena

Ensayos solicitados y normas aplicadas: ASTM-D 6938

N°	PK	PROF. 150 mm		PROCTOR REFERENCIA Dens/Humed		DENSIDAD OBTENIDA Absol/relat		HUMEDAD EXISTENTE	NOTAS
		MARGEN	TONGADA	grs/cm3	%	grs/cm3	%	%	
1276								3,3	.
1277								3,7	.
1278								4,0	.
1279								2,8	.
1280	11+620	D	S.C.	2,12	5,0	2,060	98,0	3,7	.
1281	11+570	E	S.C.	2,12	5,0	2,080	99,0	3,2	.
1282	11+520	I	S.C.	2,12	5,0	2,110	100,0	3,7	.
1283	11+470	E	S.C.	2,12	5,0	2,120	100,0	3,0	.
1284	11+420	D	S.C.	2,12	5,0	2,010	95,0	4,1	.
1285	11+420	I	S.C.	2,12	5,0	2,090	99,0	3,0	.
1286								4,8	.
1287								4,3	.
1288								4,5	.
1289	11+370	E	S.C.	2,12	5,0	2,100	99,0	4,2	.
1290	11+320	D	S.C.	2,12	5,0	2,080	98,0	4,6	.

OBSERVACIONES:

Badajoz a, 26 de julio de 2012

EL ENCARGADO DE AREA
Gonzalo Manso Vera

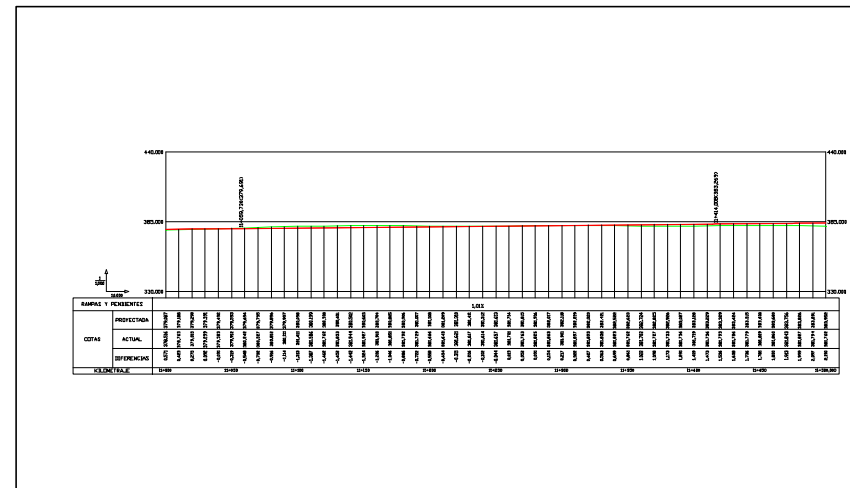
EL DIRECTOR DEL LABORATORIO
Vtº Bº Javier Casco Redondo

PPI Nº 19/0

SEGUIMIENTO Control de densidades "in situ".

OBRA: ACONDICIONAMIENTO EX 346. DE DON BENITO A QUINTANA DE LA SERENA

TRAMO	%comp.	10	20	30	40	50	60	70	80	90	11100	10	20	30	40	50	60	70	80	90	11200	10	20	30	40	50	60	70	80	90	11300	10	20	30	40	50	60	70	80	90	11400	10	20	30	40	50	60	70	80	90	11500														
	>96																																																																
	95																																																																
	<95																																																																
Suelo																																																																	
Cemento		98				101																																																											
Seleccionado																																																																	
Adecuado																																																																	
Terraplén 4º capa																																																																	
Terraplén 3º capa																																																																	
Terraplén 2º capa																																																																	
Terraplén 1º capa																																																																	
FONDO CAJA																																																																	

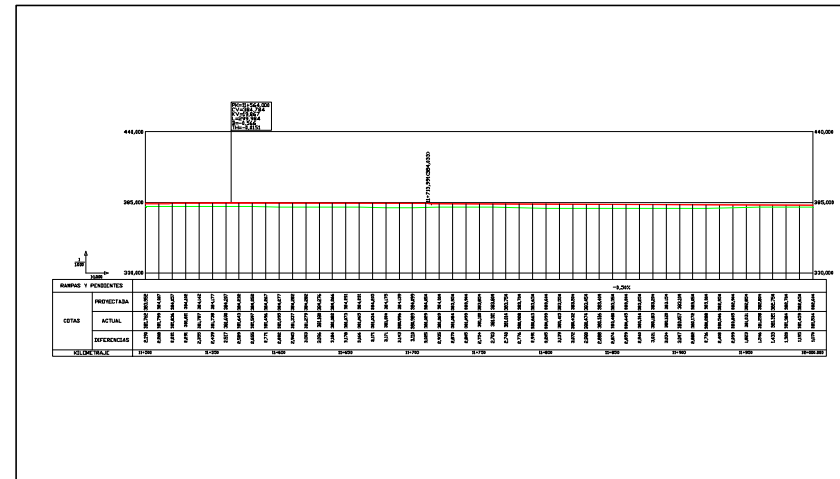


PPI Nº 19/0

SEGUIMIENTO Control de densidades "in situ".

OBRA: ACONDICIONAMIENTO EX 346. DE DON BENITO A QUINTANA DE LA SERENA

TRAMO	%comp.	10	20	30	40	50	60	70	80	90	11600	10	20	30	40	50	60	70	80	90	11700	10	20	30	40	50	60	70	80	90	11800	10	20	30	40	50	60	70	80	90	11900	10	20	30	40	50	60	70	80	90	12000														
ELO CEMEN	>96																																																																
SUELO SEL.	95	100																																																															
Adecuado																																																																	
Terraplén 10º capa																																																																	
Terraplén 9º capa																																																																	
Terraplén 8º capa																																																																	
Terraplén 7º capa																																																																	
Terraplén 6º capa																																																																	
Terraplén 5º capa																																																																	
Terraplén 4º capa																																																																	
Terraplén 3º capa																																																																	
Terraplén 2º capa																																																																	
Terraplén 1º capa																																																																	
FONDO CAJA																																																																	

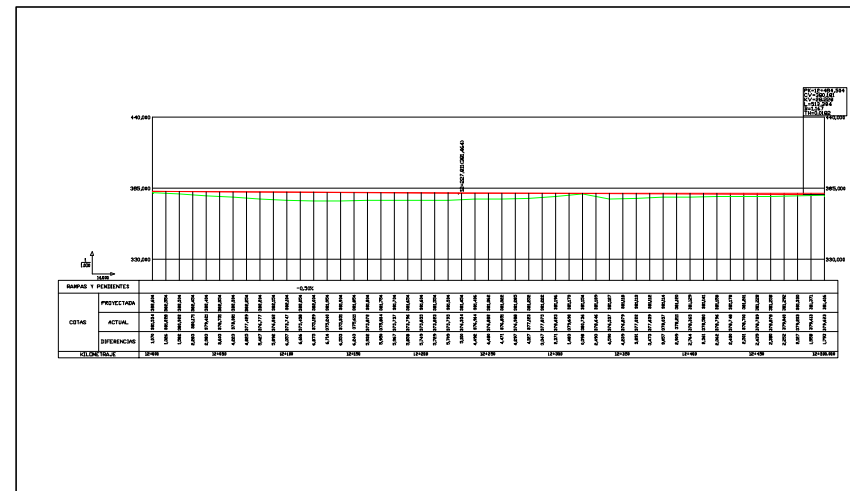


PPI N° 19/0

SEGUIMIENTO Control de densidades "in situ".

OBRA: ACONDICIONAMIENTO EX 346. DE DON BENITO A QUINTANA DE LA SERENA

TRAMO	%comp.	10	20	30	40	50	60	70	80	90	12100	10	20	30	40	50	60	70	80	90	12200	10	20	30	40	50	60	70	80	90	12300	10	20	30	40	50	60	70	80	90	12400	10	20	30	40	50	60	70	80	90	12500														
	>96																																																																
	95																																																																
	<95																																																																
Suelo																																																																	
Cemento																																																																	
Seleccionado																																																																	
Adecuado																																																																	
Terraplén 7° capa																																																																	
Terraplén 6° capa																																																																	
Terraplén 5° capa																																																																	
Terraplén 4° capa																																																																	
Terraplén 3° capa																																																																	
Terraplén 2° capa																																																																	
Terraplén 1° capa																																																																	
FONDO CAJA																																																																	

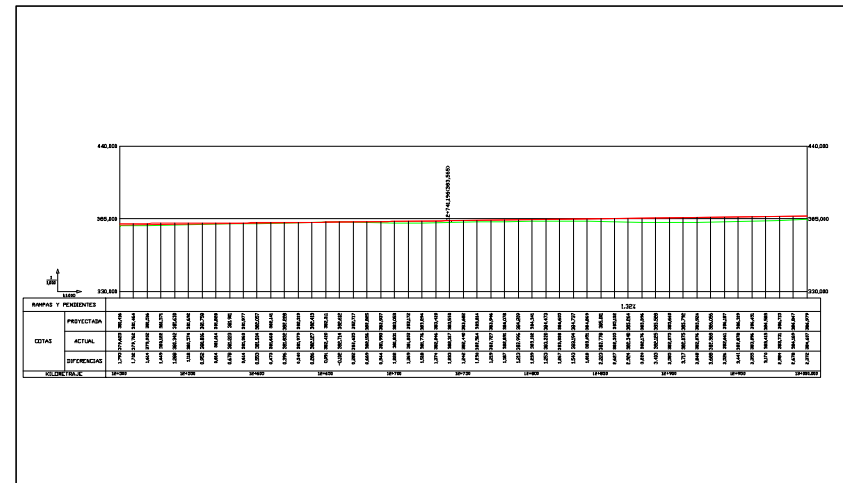


PPI Nº 19/0

SEGUIMIENTO Control de densidades "in situ".

OBRA: ACONDICIONAMIENTO EX 346. DE DON BENITO A QUINTANA DE LA SERENA

TRAMO	%comp.	10	20	30	40	50	60	70	80	90	12600	10	20	30	40	50	60	70	80	90	12700	10	20	30	40	50	60	70	80	90	12800	10	20	30	40	50	60	70	80	90	12900	10	20	30	40	50	60	70	80	90	13000														
	>96																																																																
	95																																																																
	<95																																																																
Suelo																																																																	
Cemento		99																																																															
Seleccionado																																																																	
Adecuado		100																																																															
Terraplén 5º capa																																																																	
Terraplén 4º capa																																																																	
Terraplén 3º capa																																																																	
Terraplén 2º capa																																																																	
Terraplén 1º capa		98																																																															
FONDO CAJA																																																																	



ANEXO H - Control riego de curado - emulsión

SUELO CEMENTO EX 346 QUINTANA DE LA SERENA

EMULSIÓN	FECHA	LONG.	ANCHO	SUPERFICIE	DOTACIÓN
7080	16/07/2012	406	11.2	4547.2	0.47
	17/07/2012	530	11.2	5936	
4680	18/07/2012	480	11.2	5376	0.87
6940	19/07/2012	445	11.2	4984	0.74
	20/07/2012	390	11.2	4368	
7600	23/07/2012	490	11.2	5488	0.78
	24/07/2012	380	11.2	4256	
5260	25/07/2012	380	11.2	4256	0.54
	26/07/2012	495	11.2	5544	
5840	27/07/2012	313	11.2	3505.6	0.52
	30/07/2012			3131	
	31/07/2012			4578.5	
6240	01/08/2012			4069.5	0.62
	02/08/2012	220	11.2	2464	
	03/08/2012			3524.5	
8020	06/08/2012	427	11.2	4782.4	0.53
	07/08/2012	458	11.2	5129.6	
	08/08/2012	478	11.2	5353.6	
4240	09/08/2012	455	11.2	5096	0.53
	10/08/2012	257	11.2	2878.4	
7680	13/08/2012			4075	0.44
	14/08/2012			4162	
	16/08/2012			4907.05	
	17/08/2012	379	11.2	4244.8	
6290	20/08/2012	552	11.2	6182.4	0.54
	21/08/2012	491	11.2	5499.2	
3180	22/08/2012	479	11.2	5364.8	0.59
5800	23/08/2012	466	11.2	5219.2	0.63
	24/08/2012	356	11.2	3987.2	
8360	27/08/2012	455	11.2	5096	0.65
	28/08/2012	448	11.2	5017.6	
	29/08/2012	237	11.2	2654.4	
5990	30/08/2012	432	11.2	4838.4	0.49
	03/09/2012	410	11.2	4592	
	04/09/2012	260	11.2	2912	

ANEXO I - Control y ejecución de Probetas – Roturas

RESUMEN DE ROTURAS DE PROBETAS DE SUELO CEMENTO EX -346

FECHA	PK	DENSIDAD	HUMEDAD	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	MEDIA A 7 DIAS	MEDIA A 28 DIAS	%CEMENTO
11/07/2012 P	13+900 MI	2.13	6.20	2.50	2.50	2.60	2.50		3.00
12/07/2012 M	14+020 MI	2.11	6.00	2.20	2.30	2.10	2.20		
12/07/2012 T	14+240 MI	2.13	6.00	2.30	2.30	2.20	2.30		
13/07/2012 M	14+200 MD	2.10	5.90	2.00	1.90	2.10	2.00		
13/07/2012 T	14+050 MD	2.11	6.10	1.90	1.90	2.00	1.90		
16/07/2012 M	13+800 MD	2.09	5.50	1.80	1.90	1.70	1.80		
16/07/2012 T	13+660	2.10	5.80	1.70	1.90	1.90	1.80		
17/07/2012 M	13+450	2.10	4.60	1.90	2.00	1.90	1.90		
17/07/2012 T	13+200	2.11	6.10	1.90	1.90	1.80	1.90		
18/07/2012 M	12+820	2.11	5.70	1.80	1.80	1.90	1.80		
18/07/2012 T	12+600	2.12	5.00	2.00	2.00	1.90	2.00		
19/07/2012 M	12+350	2.13	3.80	2.50	2.50	2.60	2.50		
19/07/2012 T	12+080	2.09	3.50	2.30	2.30	2.50	2.40		
20/07/2012 M	11+740	2.16	4.50	2.10	2.20	2.20	2.20		
20/07/2012 T	11+640	2.12	5.00	2.20	2.30	2.20	2.20		
23/07/2012 M	11+460	2.09	2.20	1.90	1.70	1.90	1.80		
23/07/2012 T	11+280	2.09	4.40	1.90	2.00	2.00	2.00		
24/07/2012 T	10+850	2.11	4.00	2.00	1.90		2.00	2.50	
24/07/2012 JUNTA		2.13		1.70	1.90	1.80	1.80		
25/07/2012 M	10+580	2.09	6.00	1.90	2.00		2.00	2.80	
25/07/2012 T	10+470	2.12	5.00	2.10	2.00	1.80	2.00		
26/07/2012 M	10+080	2.09	3.90	1.80	1.70		1.80	2.50	
26/07/2012 T	10+470	2.12	4.00	1.70	1.90	1.80	1.80		
27/07/2012 M	10+700	2.11	6.10	2.10	2.00		2.10	2.70	
27/07/2012 T	9+540	2.12	6.10	2.00	1.90	2.00	2.00		
30/07/2012 M	9+420	2.09	4.10	2.20	2.00		2.10	2.70	
30/07/2012 T	9+350	2.12	5.50	1.90	2.00	1.80	1.90		
31/07/2012 M	9+180	2.11	6.60	2.10	2.20		2.20	2.70	
31/07/2012 T	9+070	2.12	6.60	2.00	2.10	1.90	2.00		
01/08/2012 M	8+700	2.16	5.70	2.50	2.30		2.40	2.90	
01/08/2012 T	8+580	2.16	5.40	2.40	2.30	2.30	2.30		

02/08/2012 JUNTA	PLANTA	2.19		2.20	2.20	2.30	2.20	
02/08/2012 M	PLANTA	2.16	5.60	2.50	2.30	2.40	2.40	
02/08/2012 T	PLANTA	2.16	5.30	2.60	2.50	2.50	2.50	2.90
03/08/2012 M	PLANTA	2.09	6.70	2.70	2.90	2.80	2.80	
03/08/2012 T	PLANTA	2.14	6.20	2.80	2.70	2.90	2.80	
03/08/2012 ELABOREX	PLANTA	2.16	5.80	3.20	3.20	3.10	3.20	
03/08/2012 PAYMA	PLANTA	2.16	6.60	3.40	3.50	3.40	3.40	
06/08/2012 M	PLANTA	2.15	5.40	2.80	2.70	2.70	2.70	2.90
06/08/2012 T	PLANTA	2.15	5.90	2.60	2.70	2.70	2.70	
07/08/2012 JUNTA	PLANTA	2.17		2.10	2.20	2.20	2.20	2.90
07/08/2012 M	PLANTA	2.15	5.50	2.80	2.80	2.60	2.70	3.40
07/08/2012 T	PLANTA	2.13	6.50	2.70	2.60	2.80	2.70	
08/08/2012 M	PLANTA	2.11	5.90	2.60	2.70	2.80	2.70	3.30
08/08/2012 T	PLANTA	2.12	5.90	2.90	2.90	2.80	2.90	
09/08/2012 M	PLANTA	2.13	5.90	2.80	2.90	2.70	2.80	3.50
09/08/2012 T	PLANTA	2.15	5.70	2.80	2.90	2.60	2.80	
10/08/2012 M	PLANTA	2.15	5.90	3.10	3.20	3.20	3.20	3.90
13/08/2012 M	PLANTA	2.12	6.40	3.00	2.90	2.90	2.90	3.40
13/08/2012 T	PLANTA	2.11	5.90	2.80	2.80	2.70	2.80	
14/08/2012 JUNTA	PLANTA	2.20		3.00	3.30	3.20	3.20	3.80
14/08/2012 M	PLANTA	2.16	7.40	2.70	2.90	2.90	2.80	3.30
14/08/2012 T	PLANTA	2.14	6.50	2.70	2.90	3.00	2.90	
16/08/2012 M	PLANTA	2.14	5.70	3.00	2.90	2.80	2.90	3.40
16/08/2012 T	PLANTA	2.12	6.00	2.70	2.80	2.90	2.80	
17/08/2012 M	PLANTA	2.21	6.00	3.10	3.20	3.10	3.10	3.60
20/08/2012 M	PLANTA	2.12	6.50	3.20	3.20	3.10	3.20	3.80
20/08/2012 T	PLANTA	2.14	6.20	2.90	3.10	3.10	3.00	
21/08/2012 JUNTA	PLANTA	2.12		2.60	2.80	2.80	2.70	3.50
21/08/2012 M	PLANTA	2.15	6.80	3.10	3.00	3.10	3.10	3.80
21/08/2012 T	PLANTA	2.13	6.70	3.00	2.60	2.80	2.80	
22/08/2012 M	PLANTA	2.12	6.60	2.70	2.60	2.80	2.70	3.60
22/08/2012 T	PLANTA	2.15	6.20	2.90	3.00	2.80	2.90	
23/08/2012 M	PLANTA	2.14	6.20	2.50	2.50	2.60	2.50	2.80
23/08/2012 T	PLANTA	2.13	6.50	2.80	2.90	2.60	2.80	
24/08/2012 M	PLANTA	2.15	6.30	2.80	2.90	2.90	2.90	3.30

27/08/2012 M	PLANTA	2.14	6.20	2.70	2.80	2.80	2.80	
27/08/2012 T	PLANTA	2.14	6.60	3.40	2.90	2.90	3.10	3.60
28/08/2012 JUNTA	PLANTA	2.15		1.90	1.80	1.80	1.90	2.40
28/08/2012 M	PLANTA	2.14	5.90	2.90	3.10	3.00	3.00	3.80
28/08/2012 T	PLANTA	2.14	6.10	3.20	3.10	3.00	3.10	
29/08/2012 M	PLANTA	2.15	6.60	3.00	2.90	3.10	3.00	3.40
29/08/2012 T	PLANTA	2.14	6.40	2.90	2.90	2.90	2.90	
30/08/2012 M	PLANTA	2.15	5.70	2.60	2.70	2.70	2.70	3.00
30/08/2012 T	PLANTA	2.13	5.90	2.70	2.80	2.80	2.80	
03/09/2012 M	PLANTA	2.14	6.90	3.10	3.20	3.00	3.10	
03/09/2012 T	PLANTA	2.12	7.20	2.80	3.10	3.10	3.00	3.40

3.5

ANEXO J - Placas de carga en coronación de suelocemento

ENSAYO DE CARGA CON PLACA NLT 357/98

Obra: **EX - 346. De EX - 348 a QUINTANA DE LA SERENA**

Empresa:

Fecha realización: **30/07/2012** Localización (p.k.): **12+500 M. D.**

Capa ensayada: **Suelocemento**

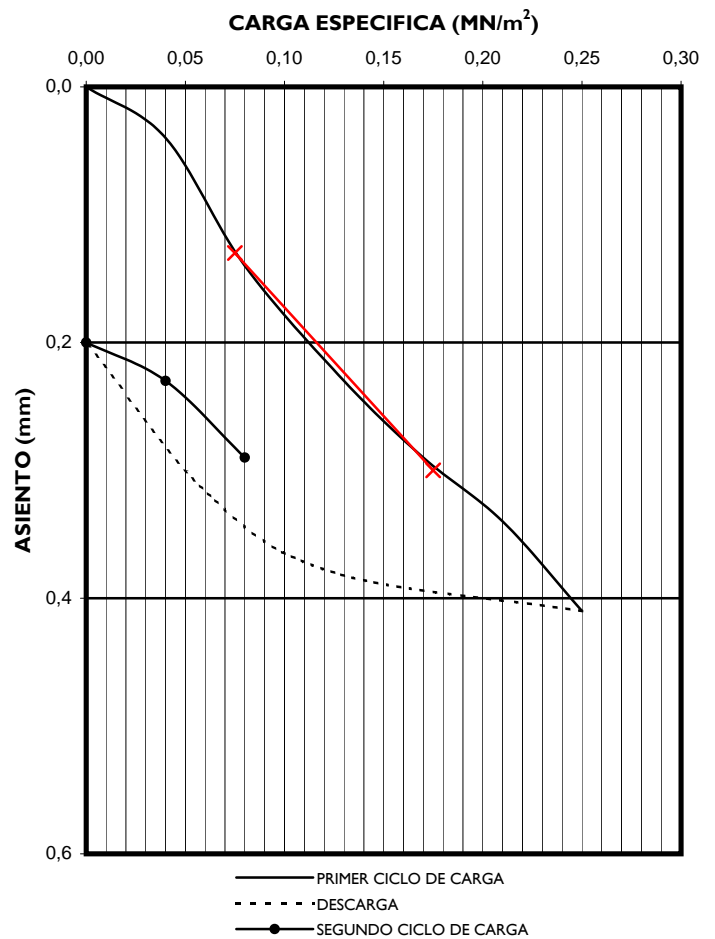
Material: **Suelo granítico estabilizado con cemento**

Humedad del material bajo placa: **4,3%**

Realizado por: **J. Sánchez, J. M. Pérez**

Placa de carga de: **600 mm**

CARGA MPa	LECTURA COMPARADORES			MEDIA (1)+(2)+(3) 3	ASIENTO mm
	(1)	(2)	(3)		
PRIMER CICLO DE CARGA					
0,00	2,12	2,22	2,15	2,16	0,00
0,04	2,15	2,25	2,20	2,20	0,04
0,08	2,22	2,39	2,29	2,30	0,14
0,13	2,29	2,49	2,40	2,39	0,23
0,17	2,34	2,55	2,45	2,45	0,29
0,21	2,37	2,63	2,51	2,50	0,34
0,25	2,43	2,71	2,57	2,57	0,41
DESCARGA					
0,125	2,40	2,68	2,55	2,54	0,38
0,063	2,34	2,61	2,49	2,48	0,32
0,00	2,21	2,49	2,38	2,36	0,20
SEGUNDO CICLO DE CARGA					
0,04	2,24	2,53	2,41	2,39	0,23
0,08	2,29	2,59	2,48	2,45	0,29
0,13				0,00	2,16
0,17				0,00	2,16
0,21				0,00	2,16



$S_{01} = 0,075$	Modulo 1 ^{er} ciclo $E_{v1} = 264,71 \text{ MN/m}^2$
$S_{02} = 0,175$	
$s_1 = 0,13$	
$s_2 = 0,30$	

$S_{01} =$	Modulo 2 ^o ciclo $E_{v2} = \text{ MN/m}^2$
$S_{02} =$	
$s_1 =$	
$s_2 =$	

Relación de Módulos

$E_{v2}/E_{v1} =$

Observaciones :

En Badajoz, a 31 de agosto de 2012

EL SUPERVISOR GENERAL
DEL LABORATORIO

Joaquín Pagador Iglesias
Fdo.: Joaquín Pagador Iglesias

ENSAYO DE CARGA CON PLACA NLT 357/98

Obra: **EX - 346. De EX - 348 a QUINTANA DE LA SERENA**

Empresa:

Fecha realización: **30/07/2012** Localización (p.k.): **13+500 M. D.**

Capa ensayada: **Suelocemento**

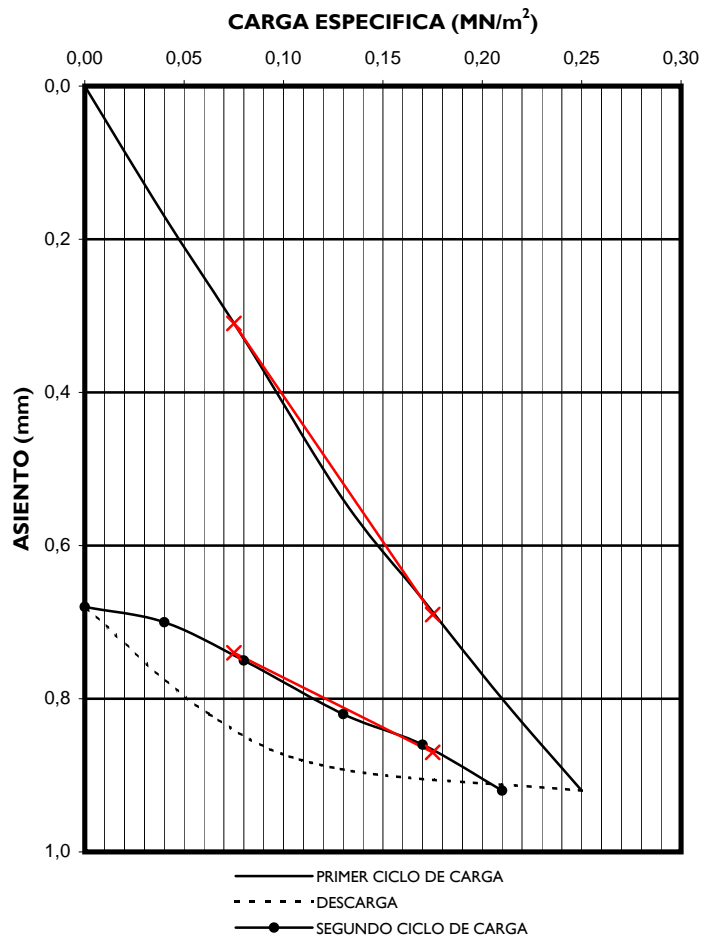
Material: **Suelo granítico estabilizado con cemento**

Humedad del material bajo placa: **4,6%**

Realizado por: **J. Sánchez, J. M. Pérez**

Placa de carga de: **600 mm**

CARGA MPa	LECTURA COMPARADORES			MEDIA (1)+(2)+(3) 3	ASIENTO mm
	(1)	(2)	(3)		
PRIMER CICLO DE CARGA					
0,00	2,08	2,15	2,09	2,11	0,00
0,04	2,22	2,41	2,20	2,28	0,17
0,08	2,30	2,60	2,41	2,44	0,33
0,13	2,38	3,01	2,55	2,65	0,54
0,17	2,48	3,18	2,67	2,78	0,67
0,21	2,58	3,35	2,79	2,91	0,80
0,25	2,67	3,51	2,90	3,03	0,92
DESCARGA					
0,125	2,61	3,49	2,89	3,00	0,89
0,063	2,54	3,42	2,82	2,93	0,82
0,00	2,44	3,28	2,66	2,79	0,68
SEGUNDO CICLO DE CARGA					
0,04	2,46	3,30	2,67	2,81	0,70
0,08	2,51	3,35	2,72	2,86	0,75
0,13	2,58	3,42	2,78	2,93	0,82
0,17	2,62	3,47	2,83	2,97	0,86
0,21	2,67	3,52	2,89	3,03	0,92



$s_{01} = 0,075$	Modulo 1 ^{er} ciclo $E_{v1} = 118,42 \text{ MN/m}^2$
$s_{02} = 0,175$	
$s_1 = 0,31$	
$s_2 = 0,69$	

$s_{01} = 0,075$	Modulo 2 ^o ciclo $E_{v2} = 346,15 \text{ MN/m}^2$
$s_{02} = 0,175$	
$s_1 = 0,74$	
$s_2 = 0,87$	

Relación de Módulos

$$E_{v2}/E_{v1} = 2,92$$

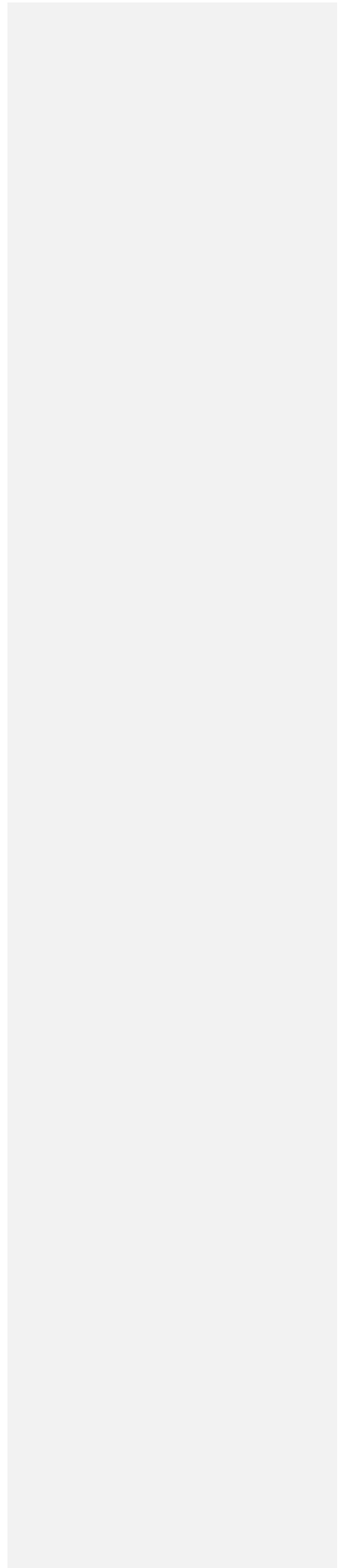
Observaciones :

En Badajoz, a 31 de agosto de 2012

EL SUPERVISOR GENERAL
DEL LABORATORIO

Joaquín Pagador Iglesias
Fdo.: Joaquín Pagador Iglesias

ANEXO K - Fotos





ACOPIOS DE MATERIAL, ANTES DE MACHAQUEO.



MACHACADORAS.



MACHAQUEO Y ACOPIO DE MATERIAL PARA SC.



MACHAQUEO – FABRICACIÓN DE MATERIAL PARA SC.



TRABAJOS DE MACHAQUEO – FABRICACIÓN DE MATERIAL.



CONTROL DE ACOPIOS, MUESTRAS.



ACOPIOS – CONTROL DE MATERIALE DE ACOPIO.



MATERIAL - ACOPIOS.



ACOPIOS DE MATERIAL PARA SUELOCEMENTO.



PLANTA FIJA DE SUELOCEMENTO, MONTAJE.



VISTA PLANTA SC – CARGA DE MATERIAL.



CONTROL CON TOPOGRAFÍA ANTES Y DESPUÉS DEL EXTENDIDO.



RIEGO SELECCIONADO PARA EXTENDER - TRAMO DE PRUEBA.



TRAMO DE PRUEBA COMPACTACIÓN Y DENSIDADES - HUMEDADES.



FABRICACIÓN DE PROBETAS, NAVE CERCA DE LA OBRA.



EXTENDIDO – JUNTAS CON EMULSIÓN PARA ROTURA.



RIEGO DE CURADO CON EMULSIÓN.



EXTENDIDO PRIMERA CAPA DE AGLOMERADO SOBRE SUELOCEMENTO.