Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil

Influencia de la Humedad de las Capas Granulares en la Optimización de Inversiones para la Conservación del Patrimonio Vial

**Influence of Moisture on Optimization of Investments
for Road Assets Conservation**

T E S I S D O C T O R A L

Fernando Varela Soto

Máster en Técnicas Experimentales Avanzadas en la Ingeniería Civil

Ingeniero Técnico de Obras Públicas

2015

Departamento de Ingeniería Civil:
Construcción, Infraestructura y Transporte
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil

Influencia de la Humedad de las Capas Granulares en la Optimización de Inversiones para la Conservación del Patrimonio Vial

**Influence of Moisture on Optimization of Investments
for Road Assets Conservation**

Fernando Varela Soto

T E S I S D O C T O R A L

Directores:

Carlos Delgado Alonso de Martinera

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Elena Cerro Prada

Doctora en Ciencias Físicas

2015

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magnífico de la Universidad Politécnica de Madrid,
el día de de 2015.

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de de 2015,
en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil, habiendo obtenido la calificación de

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

CARLOS DELGADO ALONSO-MARTIRENA, CATEDRÁTICO DE ESCUELA UNIVERSITARIA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL: CONSTRUCCIÓN, INFRAESTRUCTURA Y TRANSPORTE, DE LA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.

ELENA CERRO PRADA, PROFESORA TITULAR DE ESCUELA UNIVERSITARIA INTERINA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL: CONSTRUCCIÓN, INFRAESTRUCTURA Y TRANSPORTE, DE LA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID..

HACEN CONSTAR:

Que el presente trabajo, titulado ***“INFLUENCIA DE LA HUMEDAD DE LAS CAPAS GRANULARES EN LA OPTIMIZACIÓN DE INVERSIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO VIAL”*** ha sido realizado en este Departamento por el Ingeniero Técnico de Obras Públicas **D Fernando Varela Soto**, bajo nuestra dirección, constituyendo la Tesis Doctoral de su autor.

Madrid, a 5 de Diciembre de 2014

Fdo.: Carlos Delgado Alonso-Martirena

Fdo.: Elena Cerro Prada

Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.

Albert Einstein (1879 – 1955, físico alemán)

Agradecimientos

A medida que pasa el tiempo y te distancias de lo que fue superar tus estudios universitarios adentrándote de manera intensa en la vida profesional resulta cada vez más complicado retomar, a cierto nivel, estudios de postgrado y desarrollar una tesis doctoral. Resulta evidente que todos los que hemos pasado por esta etapa hemos necesitado del apoyo de personas e instituciones, pero considero necesario incidir que, en mi caso, dicho apoyo ha sido fundamental para llegar a escribir estas palabras de agradecimiento.

En primer lugar, a la Dra. Elena Cerro y al Dr. Carlos Delgado, directores de este trabajo. No tengo palabras ni adjetivos para describir el valor que ha supuesto la guía de Elena y los consejos de Carlos. Es evidente que no soy capaz de condensar en pocas palabras todo lo que debería expresar a ambos y, en mi torpeza, solo se me ocurre repetir muchísimas gracias. Igualmente agradecer al Dr. Juan Torres que, durante el primer periodo, fue codirector de la misma. Juan: desde que asistí a tus clases en mi primer curso de carrera has sido un modelo a seguir. Gracias por todo lo que me has ayudado y todo lo que me has enseñado.

Quisiera agradecer a todos mis compañeros de la Escuela el apoyo que en muchos sentidos ha sido clave para poder tener el tiempo que necesitaba: gracias Marian, Rafa, Javier y Enrique. Quiero expresar un especial agradecimiento a Juan Ramón y a Félix. Juan Ramón: has estado siempre atento a lo que estaba necesitando, apoyando de una manera discreta pero fundamental a que las metas se fueran consiguiendo una tras otra. Félix: es difícil llegar a tu nivel

de conocimiento en suelos pero mucho más alcanzar tu generosidad. Gracias a Jorge y Alfonso por su inestimable ayuda en toda la fase de formación de suelos.

A la Subdirectora General de Infraestructuras y Tecnología Dña. Rosa Xuclá que facilitó la firma de un convenio institucional que permitió la realización de muchos ensayos de laboratorio que no podían realizarse en nuestra Escuela. Agradezco igualmente a todo el personal del laboratorio de la Avenida de Portugal en especial a D. Alberto Calatayud.

A Rafael Álvarez Loranca por todo lo que me ha enseñado desde que tuve la suerte de trabajar bajo su cargo pero, sobre todo, por la inquietud e interés que despertó en nosotros desde el principio en el conocimiento y estudio del trabajo que se ha desarrollado como tesis.

A Constructora San José por apoyar y patrocinar la fase que ha permitido contrastar las hipótesis de laboratorio en la obra de Santiago de Compostela. Son muchas las personas que han participado en ello y es difícil nombrar a todo el equipo sin olvidar a alguien. Os agradezco a todos vuestro apoyo, interés y entusiasmo en esta investigación.

Al equipo de RAUROS y especialmente a Rocío, Carmen, Lourdes, Elena, Laura, Daniel y Gustavo, que me han ayudado en muchos pasos de este trabajo. Siempre estáis ahí, siempre con una actitud positiva hacia todas las necesidades que he tenido apoyándome con toda la implicación sí, pero sobre todo con mucho afecto.

A mi familia y amigos. No quiero olvidarme de ninguno de vosotros porque sois el complemento que todo ser humano necesita para crecer. El desarrollo de esta tesis siempre se ha visto unida a todo el tiempo que he disfrutado y he prescindido de vuestra inestimable compañía.

A mis hermanas: Bego, Nines y Raquel, habéis marcado el ejemplo a seguir al pequeño de la familia. Me habéis demostrado que no hay metas imposibles solo es necesario dedicar trabajo y sacrificio para conseguirlas.

A mis padres que siempre me han inculcado la importancia del estudio como base fundamental para el desarrollo personal. Papá, siento que has estado conmigo alentando la realización de esta tesis como respuesta a una de tus grandes pasiones: “conocer el porqué de las cosas” y, desde donde quiera que estés, sé que estarás sonriendo. Mamá, siempre has dedicado tu vida dando todo a los que estábamos a tu alrededor y disfrutando con ello. Espero que disfrutes mucho y sientas orgullo al ver que he culminado esta etapa de mi formación.

A Irene y María: mis dos tesoros que dan vida a mi vida y hacen que sonría cada día con solo cerrar los ojos y pensar en ellas. Sois la inspiración y el orgullo de vuestro padre. Espero que uno de los grandes motivos por los que ha merecido la pena realizar esta tesis sea también el orgullo que suponga para vosotras.

A Eva: mi luz y mi guía. Siempre estás ahí, apoyando cada paso que doy, restando importancia a mis grandes errores y alentando mis pequeños aciertos. Sin tu ayuda no hubiera sido posible llegar hasta aquí.

Resumen

La conservación del patrimonio vial no debe ser una opción sino más bien una obligación de las administraciones públicas que deben preservar las inversiones como un valor cuya amortización acelerada puede producir un impacto grave en la economía. La inversión en conservación suele estar por debajo de las cifras recomendadas por el Banco Mundial (2 % del valor patrimonial) y, en este sentido, cualquier avance técnico que permita optimizar las inversiones de manera preventiva puede constituir una ventaja en los costes de mantenimiento.

Uno de los factores clave a la hora de dimensionar una rehabilitación de tipo estructural es conocer la capacidad portante de las capas del pavimento. Las capas de rodadura que están formadas por mezclas bituminosas o bien por hormigones hidráulicos y las capas inferiores hasta llegar a la explanada suelen estar formadas por materiales granulares cuyas características mecánicas se ven influenciadas, en gran medida, por la humedad que poseen. En algunos métodos y normativas de rehabilitación estructural se aplican factores de corrección sobre la medida de la deformación que se produce bajo la aplicación de una determinada carga y que responde a la totalidad de la estructura del pavimento sin discernir qué parte de la misma corresponde a cada capa. La presente tesis pretende establecer una relación entre las precipitaciones y los valores de humedad de las capas granulares así como el valor de los módulos de elasticidad de dichas capas en función de la humedad. El conocimiento de estos valores y su variabilidad permitirá dimensionar cualquier rehabilitación estructural de un modo más homogéneo y racional.

De manera secuencial, a lo largo del desarrollo de la presente tesis, se han

generado en laboratorio una serie de suelos que responden a una tipología utilizada en los firmes de carreteras, posteriormente se ha evaluado en laboratorio su capacidad portante en función del grado de humedad de dichas capas. De manera paralela se han estudiado diferentes modelos conocidos para prever la infiltración del agua de lluvia, definiendo el más adecuado que, por capas, permite conocer el grado de humedad de los materiales granulares a diferentes profundidades en función de las precipitaciones y del tiempo. Finalmente se ha tratado de contrastar las hipótesis que se extraen de laboratorio y de los modelos de cálculo instalando en un tramo de carretera una serie de sensores de humedad a diferentes profundidades, colocando unas estaciones meteorológicas que han registrado las lluvias entre otros parámetros y, al mismo tiempo, se han tomado medidas de deflexiones durante un año en la zona de ensayo.

El análisis de los resultados obtenidos ha permitido avanzar en el conocimiento del comportamiento mecánico de los pavimentos con el objetivo de precisar los cálculos a la hora de dimensionar una rehabilitación y, por lo tanto, optimizar las inversiones en el mantenimiento de los mismos.

Palabras clave: deflexiones, capacidad portante, módulos de elasticidad, humedad, capas granulares, cálculo inverso, modelo multicapa, infiltración.

Abstract

The conservation of road assets should not be an option but a requirement for governments, that must preserve investments as a value which accelerated depreciation may cause serious impact on the economy. Investment in conservation is often below the recommendations given by the World Bank (2% in value). In this sense, any technical advance to optimize investments proactively can be an advantage in maintenance costs .

One of the key factors when designing structural rehabilitation is the determination of the bearing capacity of the pavement layers. Road layers are formed by bituminous mixtures or hydraulic concrete as well as a set of lower layers usually made of unbound granular materials whose mechanical characteristics are largely influenced by the contained moisture. In some methods and regulations for structural rehabilitation, correction factors are applied to the measurement of the deformation occurring under application of a given load. Such deformations reflect all of the pavement structure without discerning which portion corresponds to each layer. This doctoral thesis aims to establish a relationship between rainfall and humidity values of the granular layers and the value of the modulus of elasticity of such layers depending on the humidity. The knowledge of these values and their variability allow dimensioning any structural rehabilitation in a more homogeneous and rational way.

Sequentially throughout the development of this thesis, several series of soils that respond to a typology used in road pavements, were generated in the laboratory, subsequently evaluated their bearing capacity depending on the humidity contained in the layers. In parallel, we have studied different reported models to predict the infiltration of rainwater, determining the most

appropriate for granular layers, which has allowed to know the moisture content of granular materials at different depths depending on rainfall and time. Finally, we have tried to test the hypotheses that are extracted from laboratory and computational models by installing some series of humidity sensors at different depths on a stretch of road, along with placing weather stations that have recorded rainfall among other parameters. At the same time, deflection measurements have been taken for a year in the test area.

The analysis of the results has provided useful knowledge on the mechanical behavior of pavements in order to clarify the calculations when designing rehabilitation and, therefore, optimizing investments for road assets maintaining.

Keywords: deflections, bearing capacity, modulus of elasticity, moisture, granular layers, backcalculation, multilayer model, infiltration

Índice de Contenidos

Agradecimientos	XI
Resumen	xv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción y Objetivos	3
1.2. Antecedentes Técnicos	6
1.3. Objetivos y Alcances	9
1.4. Planificación de la Investigación y Organización de los Trabajos	10
1.5. Metodología	12
1.6. Procedimiento y Estructura	15
2. ESTADO DEL ARTE	19
2.1. Introducción	21
2.2. Influencia de la Humedad en las Prestaciones del Firme	24
2.3. Comportamiento de los Pavimentos	28
2.4. Instrumentación de Medidas de Humedad y Auscultación	34
2.5. Instrucción 6.3-IC de Rehabilitación de Firmes	35

3. MATERIALES: COMPOSICIÓN Y ESPECIFICACIONES	45
3.1. Materiales Granulares Preparados en Laboratorio	47
3.1.1. Introducción	47
3.1.2. Selección de los Acopios	49
3.1.3. Encuadre geológico y geotécnico general de las zonas de acopios	50
3.1.4. Tipo de muestras y localización	53
3.1.5. Obtención y preparación de muestras	56
3.2. Materiales Granulares Utilizados en la Puesta en Obra	56
4. MÉTODOS EXPERIMENTALES	59
4.1. Ensayos de Laboratorio	61
4.1.1. Análisis Granulométrico de Suelos por Tamizado según Norma UNE 103101/95	61
4.1.2. Determinación de los Límites de Atterberg, según Nor- mas UNE 103103/94 y UNE 103104/93	62
4.1.3. Ensayo de Apisonado Próctor Modificado, según Norma UNE 103501/94	63
4.1.4. Índice CBR, según UNE 103502/95	64
4.1.5. Ensayos de Hinchamiento	73
4.1.6. Contenido en Sulfatos Solubles	74
4.2. Ensayos de Campo	75
4.2.1. Descripción Experimental	75
4.2.2. Ensayos de Deflectometría de Impacto	81
5. ENSAYOS DE LABORATORIO: CARACTERIZACIÓN DE CAPAS GRANULARES	83
5.1. Introducción	85

5.2. Ensayos de Clasificación	86
5.2.1. Análisis granulométrico por tamizado	86
5.2.2. Límites de Atterberg	87
5.3. Ensayos Químicos	94
5.3.1. Contenido de sulfatos solubles en suelos	94
5.3.2. Contenido materia orgánica en suelos	94
5.4. Representabilidad de las Muestras; Muestra y Cuarteo	94
5.5. Muestras Patrón Procedentes de la Zahorra Artificial	95
5.5.1. Ensayos de identificación	95
5.5.2. Ensayos de Apisonado y Rigidez	95
5.5.3. Caracterización geotécnica de las muestras patrón	98
5.6. Muestras Procedentes de la Zona de Acopio Norte	99
5.6.1. Ensayos de identificación	99
5.6.2. Ensayos de apisonado y rigidez	100
5.6.3. Caracterización geotécnica de las muestras del acopio norte	102
5.7. Muestras Procedentes de la Zona de Acopio Sur	103
5.7.1. Ensayos de identificación	103
5.7.2. Ensayos de Apisonado y Rigidez	105
5.7.3. Caracterización geotécnica de las muestras del acopio sur	106
5.8. Creación de Suelos (Nuevos Materiales)	106
5.9. Creación de suelos adecuados	107
5.9.1. Ensayos de identificación	109
5.9.2. Ensayos de Apisonado y Rigidez	109
5.9.3. Ensayos físicos	111
5.9.4. Caracterización geotécnica de las muestras generadas de suelo adecuado	111
5.10. Creación de suelos tolerables	113
5.10.1. Ensayos de identificación	113

5.10.2. Ensayos de Apisonado y Rigidez	113
5.10.3. Ensayos físicos	116
5.10.4. Caracterización geotécnica de las muestras generadas de suelo tolerable	116
5.11. Variación del Índice CBR con la Humedad de las Muestras . . .	116
5.12. Conclusiones	117
6. DETERMINACIÓN DE LA INFILTRACIÓN DE LAS CAPAS GRA- NULARES	121
6.1. Aspectos Generales	123
6.1.1. Ecuación del balance hídrico	125
6.1.2. Conductividad hidráulica	126
6.1.3. Infiltración y sortividad	128
6.1.4. Modelos empíricos para describir el proceso de infiltración	130
6.2. Modelización Numérica de la Capacidad de Infiltración de las Capas Granulares	133
6.2.1. Ajuste del Modelo de Horton	133
6.2.2. Conceptualización del problema	134
6.3. Resultados y Discusión	136
6.3.1. Análisis de la fiabilidad de los datos	136
6.3.2. Curvas de Retención de Humedad en las Capas Granulares	137
6.3.3. Determinación de la Capacidad de Infiltración de las Ca- pas Granulares	142
6.4. Conclusiones	144
7. INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL	149
7.1. Antecedentes Generales	151
7.2. Método de Odemark-Boussinesq	153

7.3. Campaña Experimental de Deflectometría de Impacto	155
7.4. Resultados y Discusión	158
7.4.1. Determinación del módulo elástico de las capas granulares mediante cálculo inverso	158
7.4.2. Variación del módulo elástico con la humedad retenida en las capas granulares	159
7.5. Conclusiones	170
8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	173
8.1. Conclusiones	175
8.2. Futuras Líneas de Investigación	181
ANEJOS	183
A. Resultados de los Ensayos de Laboratorio	183
B. Resultados de los Ensayos de Campo: Contenido de Humedad en las Capas Granulares	197
C. Resultados de los Ensayos de Campo: Deflexiones y Capacidad Portante	211
C.1. Medidas de Deflexiones	211
C.2. Módulos de Elasticidad	219
C.3. Simulación del Deterioro del Firme Ensayado	227
D. Modelo Semi-Empírico de Infiltración: Programa en FORTRAN 90253	
E. Caracterización de los Materiales de Ensayo en Campo	259
F. Calibración de los Dispositivos de Medida en Campo	297

G. Revisiones de los Dispositivos de Medida y Visitas Técnicas al Tramo Real de Ensayo	315
G.1. Análisis Pormenorizado del Estado de Funcionamiento de los Sensores de Humedad y Temperatura durante el Periodo de Ensayo	317
G.1.1. Sensor 1MD	317
G.1.2. Sensor 1MI	317
G.1.3. Sensor 2MD	318
G.1.4. Sensor 2MI	318
G.1.5. Sensor 3MD	318
G.1.6. Sensor 3MI	318
G.1.7. Sensor 4MD	319
G.1.8. Sensor 4MI	319
G.1.9. Sensor 5MD	319
G.1.10. Sensor 5MI	319
G.1.11. Sensor 6MD	320
G.1.12. Sensor 6MI	320
G.1.13. Sensor 7MD	320
G.1.14. Sensor 7MI	320
G.1.15. Sensor 8MD	321
G.1.16. Sensor 8MI	321
G.1.17. Sensor 9MD	321
G.1.18. Sensor 9MI	322
G.1.19. Sensor 10MD	322
G.1.20. Sensor 10MI	322
G.2. Reportaje Fotográfico de las Revisiones y Visitas Técnicas al Tramo de Ensayo	323
BIBLIOGRAFÍA	328

Índice de Figuras

2-1.	Esquema ilustrado del proceso de infiltración	25
2-2.	Características técnicas de distintos modelos de sensores embe- bidos	36
2-3.	Coeficientes Correctores de la deflexión por humedad de la ex- planada	38
2-4.	Zonas con nivel de precipitación anual semejante para la esti- mación de los periodos húmedos, intermedios y secos (*)	40
2-5.	Zonas térmicas estivales	41
2-6.	Zonas con nivel de precipitación anual semejante. Los valores de la tabla se han determinado por adaptación de los datos disponi- bles durante un periodo de 30 años en las estaciones principales del Instituto Nacional de Meteorología	42
2-7.	Coeficientes de corrección en función de la temperatura, según instrucción 6,3-IC	43
2-8.	Coeficiente corrector con la temperatura, según Instrucción 6,3-IC	43
3-1.	Ambientes de posicionales durante el terciario en la Cuenca de Madrid	53
3-2.	Mapa de localización geográfica de los emplazamientos de aco- pios en la Comunidad de Madrid	55

4-1. Cuchara de Casagrande	63
4-2. Secado en estufa	65
4-3. Preparación de materiales en el ensayo CBR	66
4-4. Moldes utilizados en el ensayo CBR	67
4-5. Compactación en el ensayo CBR	67
4-6. Desmolde en el ensayo CBR	68
4-7. Pesaje en el ensayo CBR	69
4-8. Medición de hinchamiento en el ensayo CBR	70
4-9. Inmersión en el ensayo CBR	70
4-10. Inmersión en el ensayo CBR	72
4-11. Localización geográfica de la zona de ensayos	76
4-12. Esquema de emplazamiento de los puntos de medida en el tramo de ensayo	77
4-13. Esquema de capas granulares en el tramo de ensayo	79
4-14. Plano con la localización de las estaciones metereológicas insta- ladas en la proximidad al tramo de ensayo	80
4-15. Esquema del ensayo de deflexión por impacto	82
5-1. Representación de los resultados de los análisis granulométricos de las muestras patrón zahorra	87
5-2. Representación de los resultados de los análisis granulométricos de las muestras arenosas	88
5-3. Representación de los resultados de los análisis granulométricos de las muestras arcillosas	88
5-4. Representación en la carta de plasticidad de Casagrande de los valores de plasticidad de las muestras patrón así como de las muestras obtenidas en los acopios norte y sur	91

5-5. Catalogación, según especificaciones del PG-3, de suelos en función de la plasticidad y posición en la carta de plasticidad de Casagrande	92
5-6. Análisis granulométrico de las muestras patrón (zahorra artificial)	97
5-7. Análisis granulométrico de las muestras procedentes del acopio norte	101
5-8. Análisis granulométrico de las muestras procedentes del acopio sur	104
5-9. Análisis granulométrico de las muestras generadas de suelo adecuado	110
5-10. Análisis granulométrico de las muestras generadas de suelo tolerable	114
5-11. Relación entre el índice CBR con la humedad en las muestras de zahorra	118
5-12. Relación entre el índice CBR con la humedad en las muestras de suelo adecuado	119
5-13. Relación entre el índice CBR con la humedad en las muestras de suelo tolerable	120
6-1. Curvas de capacidad de infiltración para distintos suelos	132
6-2. Conceptualización de un pavimento poroso en MICG	135
6-3. Esquema conceptual de flujos en un pavimento poroso implementado en MICP	136
6-4. Estado de los sensores hasta mayo de 2012	138
6-5. Estado de los sensores durante todo el periodo de ensayo	139
6-6. Ejemplo del proceso de filtrado de datos	139
6-7. Curva de retención de humedad en las distintas capas del 22 al 24 de septiembre	140

6-8. Curva de retención de humedad en las distintas capas del 14 al 16 de diciembre	141
6-9. Infiltración acumulada en las distintas capas del 22 al 23 de septiembre	142
6-10. Infiltración acumulada en las distintas capas del 13 al 14 de diciembre	143
6-11. Ajustes exponenciales de las curvas de infiltración acumulada desde 22 al 23 de septiembre	145
6-12. Curvas teóricas obtenidas mediante simulación numérica con MICG para la capacidad de infiltración de las capas granulares .	145
 7-1. Diagrama de flujo conceptual del método de cálculo inverso . . .	155
7-2. Esquema de la estructura de capas granulares ensayada	157
7-3. Pluviometría y variación de los módulos elásticos de las capas granulares durante el periodo de ensayo y toma de datos	159
7-4. Comportamiento del módulo de elasticidad de la capa de zahorra artificial en función de la humedad	160
7-5. Comportamiento del módulo de elasticidad de la capa de zahorra natural en función de la humedad	162
7-6. Comportamiento del módulo de elasticidad de la capa de explanada en función de la humedad	163
7-7. Gráfico de temperaturas registradas por las estaciones meteorológicas durante el estudio	164
7-8. Pluviometría estación meteorológica aeropuerto	166
7-9. Deflexión de cálculo	166
7-10. Espesor(*) (cm) de recrecimiento con mezcla bituminosa para firmes flexibles y semiflexibles	167
7-11. Rehabilitación estructural para el caso a)	168
7-12. Rehabilitación estructural para el caso b)	169

7-13. Rehabilitación estructural: Norma 6.3 IC versus Cálculo analítico propuesto	170
8-1. Evolución del CBR y módulo elástico con la humedad contenida en zahorras artificiales	178
8-2. Evolución del CBR y módulo elástico con la humedad contenida en suelos adecuados	179
8-3. Evolución del CBR obtenido en laboratorio para suelos tolerables	180

Índice de Tablas

1-1. Estimación del valor patrimonial de la red del Estado	4
3-1. Valores característicos de densidad seca (g/cm^3) en la arcillas del sur de Madrid (Pau de Vallecas)	52
5-1. Descripción de ensayos de laboratorio realizados en las muestras	85
5-2. Resultados de los límites de Atterberg obtenidos de las muestras ensayadas	90
5-3. Criterios de clasificación de los materiales según especificaciones PG-3. Los suelos inadecuados se componen de materiales no clasificables en las categorías anteriores	92
5-4. Correspondencia U.S.C.S y PG-3 de las muestras analizadas . .	93
5-5. Representabilidad de las muestras; muestra y cuarteo. (*) AG: Análisis Granulométrico. LA: Límites de Atterberg. PM: Proc- tor modificado. CRB: Índice CBR	96
5-6. Valores característicos de la densidad máxima y humedad ópti- ma del ensayo Próctor Modificado de las muestras patrón	98
5-7. Valor de Índice CBR obtenido en las muestras patrón	98
5-8. Características geotécnicas básicas de las muestras patrón (zaho- rra artificial)	99

5-9. Valores característicos de la densidad máxima y humedad óptima del ensayo Próctor Modificado de las muestras del acopio norte	100
5-10. Valor de Índice CBR obtenido en las muestras del acopio norte . .	102
5-11. Características geotécnicas básicas de las muestras del acopio norte	103
5-12. Valores característicos de la densidad máxima y humedad óptima del ensayo Próctor Modificado de las muestras del acopio sur	105
5-13. Valor de Índice CBR obtenido en las muestras del acopio sur . .	106
5-14. Características geotécnicas básicas de las muestras del acopio sur	107
5-15. Tabla de porcentajes en peso de la muestra patrón, suelos seleccionados y suelos marginales para la generación de nuevos suelos	108
5-16. Cuadro de ensayos de laboratorio de las muestras generadas . .	108
5-17. Valores característicos de la densidad máxima y humedad óptima del ensayo Próctor Modificado de las muestras generadas de suelos adecuados	109
5-18. Valor de Índice CBR obtenido en las muestras generadas de suelo adecuado	111
5-19. Valores característicos de hinchamiento libre obtenidos en las muestras generadas de suelo adecuado	112
5-20. Características geotécnicas básicas de las muestras generadas de suelos adecuados	112
5-21. Valores característicos de la densidad máxima y humedad óptima del ensayo Próctor Modificado de las muestras generadas de suelos tolerables	115

5-22. Valor de Índice CBR obtenido en las muestras generadas de suelo tolerable	115
5-23. Valores característicos de hinchamiento libre obtenidos en las muestras generadas de suelo tolerable	116
5-24. Características geotécnicas básicas de las muestras generadas de suelos tolerables	117
6-1. Modelos empíricos para describir el proceso de infiltración en los suelos	130
6-2. Datos de retención de humedad para la serie de datos 1	140
6-3. Datos de retención de humedad para la serie de datos 1	141
6-4. Parámetros empíricos de la capacidad de infiltración para las capas granulares	144
7-1. Calificación del índice de serviciabilidad PSR	152
7-2. Fechas de las campañas de deflectometría de impacto realizadas en el tramo de ensayo	156
7-3. Módulos elásticos promedio de las capas granulares del tramo de ensayo obtenido por cálculo inverso	158

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción y Objetivos

Uno de los activos económicos más importantes de una nación es su infraestructura vial, fundamentalmente porque proporciona una oportunidad de transporte accesible tanto para personas como para mercancías. La existencia de una red vial hace posible que la mayor parte del transporte se lleve a cabo por carretera de manera directa, complementando en muchas ocasiones al resto de tipología de transporte.

Por concretar datos que se corresponden con nuestro país, la red de carreteras estatal es algo superior a los 26.000 km. Si no tenemos en cuenta la red vial que corresponde a las ciudades, el total de kilómetros anteriormente expresado supone un 16 % del total de la red de carreteras en España. Sobre esta red incide el 52 % del tráfico total registrado.

El papel económico de la infraestructura vial y la cantidad de dinero invertido en su construcción y mantenimiento, son un claro indicativo de la importancia de un buen diseño del pavimento y unos adecuados procedimientos de gestión y conservación. Pavimentos mal diseñados provocarán un fallo prematuro, lo que conducirá a costosos procesos de reparación con la consecuente pérdida económica debida a una disminución de los niveles de servicio.

Siguiendo con el ejemplo de España, y según el tribunal de cuentas europeo, el coste de construcción de las autopistas es de 11 Millones de Euros por kilómetro, 6,20 las autovías y alrededor de 1,90 Millones las carreteras convencionales. De estas cifras y de los datos anteriores se puede deducir que el valor patrimonial de la red del Estado podría superar los 100.000 Millones de Euros (Tabla 1-1).

Un buen diseño y un adecuado procedimiento constructivo de los pavimentos, debe implicar buenos resultados de puesta en servicio y explotar los benefi-

	Kilómetros	Millones de €/km	Coste total (M€)
Autopistas	2.500,00	11,00	27.500,00
Autovías	9.000,00	6,20	55.800,00
Convencionales	14.500,00	1,90	27.550,00
		Suma	110.850,00

Tabla 1-1.: Estimación del valor patrimonial de la red del Estado

cios estructurales característicos de todos los materiales empleados. El conocimiento de la capacidad estructural de los materiales granulares sigue siendo relativamente limitado. Los métodos de ensayo empleados para determinar las propiedades ingenieriles de éstos se basan principalmente en procedimientos empíricos. Los parámetros obtenidos a partir de estos ensayos se siguen utilizando como base en muchos de los métodos de diseño de pavimentos hoy en día. Por lo tanto, estos diseños utilizan los materiales granulares atribuyendo a los mismos un papel de soporte aplicando coeficientes de seguridad que, en ocasiones, penalizan mucho el diseño de cálculo.

Los materiales constituyen el elemento estructural que soporta las cargas de tráfico, por tanto, el técnico responsable de su mantenimiento debe preocuparse constantemente de los factores que van a influir en la degradación de los mismos para prever las actuaciones de conservación.

Es importante aportar unas cifras para valorar el impacto económico que puede suponer optimizar el conocimiento de las inversiones en la conservación del patrimonio vial y, derivado de ello, la importancia que tiene conocer la capacidad estructural de cada una de las capas que constituyen el pavimento de una carretera. Según datos publicados por el Ministerio de Industria el gasto medio de mantenimiento de un vehículo ligero es de aproximadamente 600 Euros anuales y según datos aportados por la empresa FleetData, especializada en

estudios de mercado, cada conductor español gasta una media de 1200 Euros anuales en combustible. La Dirección General de Tráfico publicó en 2012 unas cifras de 22 millones de vehículos matriculados. Trasladando el gasto total estaríamos hablando de 40000 Millones de Euros anuales, de los cuales el 50 % corresponde a los vehículos que transitan por la red del estado.

Las recomendaciones del Banco Mundial respecto de las inversiones en conservación hablan de un 2 % sobre el valor patrimonial, lo cual supondría alrededor de 2200 Millones de Euros al año en el caso de la red de carreteras del estado en España. Hay mucha literatura publicada por organismos de reconocido prestigio que han estudiado el impacto económico que supone un deterioro del estado de la red de carreteras. De todos ellos se deduce una cuestión muy clara: los costes de operación de un vehículo (mantenimiento y combustible) aumentan de manera lineal con el estado de los pavimentos. Si revisamos dichos textos observamos como todos los autores coinciden en que incrementar en un 10 % el gasto del usuario es relativamente fácil. Esta cifra del 10 % se traduce casi en el gasto de mantenimiento recomendado por el Banco Mundial. Las conclusiones de estos datos son sencillas.

Las capas de rodadura de las carreteras están constituidas normalmente por hormigones o por mezclas bituminosas con áridos formando un aglomerado. La rigidez de dicho material se ve alterada por el efecto de las temperaturas y también por el paso reiterado de las cargas de tráfico. Debajo de dichas capas, como bases y sub-bases, suelen extenderse capas granulares compactadas cuya rigidez se ve alterada por las cargas que transmiten las capas superiores y también por el grado de humedad de las mismas.

Esta tesis doctoral tiene como objetivo fundamental proporcionar una vision más clara sobre los procedimientos de ensayo y análisis de materiales granulares para su uso en estructuras de pavimentos. A modo de introducción, los ante-

cedentes técnicos del estudio realizado serán descritos en la sección siguiente a este capítulo. La sección 1.3, a continuación, detallará el alcance y los objetivos de este estudio. La siguiente sección 1.4, presentará la metodología utilizada en esta investigación, seguida por último de una descripción de la organización de esta tesis mostrada en la sección 1.6.

1.2. Antecedentes Técnicos

La capacidad estructural de los pavimentos flexibles está, en general, condicionada por los factores climáticos. El agua, en particular, afecta sensiblemente a los materiales granulares; y la temperatura, por su parte, afecta a los compuestos bituminosos. Se ha demostrado que el agua libre en el interior de un pavimento puede deteriorar de 20 a 50 veces más su capacidad estructural con respecto al mismo material en ausencia de agua, por lo que el agua constituye, claramente, el factor climático erosivo más influyente [42], [16] y [2]. La presencia de agua libre dentro del pavimento se debe principalmente a dos causas de diferente naturaleza: i) infiltración de agua a través de grietas en el pavimento, zanjas laterales, cunetas sin pavimentar, etc y ii) ascensión capilar desde el nivel freático. Cada uno de estos aspectos contribuye a la degradación de la capacidad portante de las estructuras.

Por otro lado, en el caso de los pavimentos flexibles, los materiales asfálticos son extremadamente sensibles a los cambios de temperatura, debido fundamentalmente a la naturaleza viscosa de estos materiales. La existencia de gradientes térmicos de un punto a otro en la mezcla asfáltica, genera segregación, microfisuras, superficies onduladas, desgarramientos y especialmente cambios en las propiedades mecánicas y dinámicas de la mezcla [39]. La resistencia de estos materiales es inversamente proporcional a la temperatura, por lo tanto, la presencia de altas temperaturas y/o altos periodos de aplicación de carga (bajas

frecuencias), da lugar a deformaciones irreversibles o plásticas en el pavimento denominadas *roderas*.

Para conocer el estado de la capacidad estructural de los firmes, en España se toman medidas de deflexión. Estas mediciones se realizan siguiendo los procedimientos establecidos en la Norma 6.3-I.C Rehabilitación de firmes (13-12-03), según la cual el valor de la deflexión debe ser corregido en función de la humedad de la explanada y de la temperatura de la mezcla bituminosa, por lo que han de aplicarse sendos coeficientes de corrección para normalizar el valor de deflexión inicial. La instrucción anteriormente citada considera la posibilidad de tomar medidas de la deflexión con diferentes equipos. En este sentido cabe destacar la importancia de la publicación de una nota técnica por el Ministerio de Fomento de España el 20 de abril de 2009, donde unifica la medida de la deflexión patrón obtenida con viga Benkelman con cada uno de los equipos de medida que actualmente se emplean: deflectómetros de impacto y curviámetro. Dejando a un lado las características de los distintos equipos anteriormente citados y dando por hecho que los fundamentos de la medida con cada uno de ellos es distinta, hemos centrado el estudio de los pavimentos en los factores que afectan a los materiales obviando el método de ensayo.

En esta investigación se pretende analizar la influencia de la humedad de las distintas capas granulares en la determinación de la capacidad de soporte de un firme. El estudio aporta mejoras indiscutibles al conocimiento actual sobre la influencia del agua infiltrada en la capacidad estructural de las capas granulares que se utilizan habitualmente en las carreteras españolas.

El análisis llevado a cabo alcanza la determinación de la forma en que el agua llega a las capas granulares, así como el estudio de cómo afecta dicha agua sobre la durabilidad y deformación de la estructura. Se tienen en cuenta, además, otros parámetros influyentes como son la presión y la temperatura tanto en

el interior de la capa como en el firme. El objetivo principal de este trabajo radica en la determinación de la influencia de la humedad en la capacidad estructural de cada una de las capas granulares que componen un firme, con el fin último de establecer unos coeficientes de corrección por humedad adecuados que puedan ser aplicados a los módulos de elasticidad que se obtienen del cálculo inverso. Finalmente se pretende dar una guía de cómo plantear la rehabilitación estructural utilizando dichos módulos en un modelo de cálculo directo donde podrá determinarse la vida útil de cualquier refuerzo en función de las leyes de fatiga de los materiales que lo componen.

Los procesos de infiltración, dentro de la mecánica de los suelos característicos para la composición de capas granulares, han sido tratados durante mucho tiempo desde el punto de vista de los medios porosos, continuos y saturados. En estas condiciones, los modelos planteados resultan sencillos, afectados exclusivamente por la permeabilidad del medio. Sin embargo, la comprensión con mayor detalle de las respuestas observadas, demanda la necesidad de incluir nuevos conceptos para la mecánica de las capas granulares de pavimentos que están constituidos por suelos no saturados.

Los suelos constituyentes de capas granulares para utilizar en pavimentos, presentan características particulares, tanto desde el punto de vista de su composición, como en relación con su comportamiento tenso-deformacional y bajo procesos de infiltración. En todos los casos, esta particularidad se relaciona con la inestabilidad ante la acción de diversos agentes externos. Las características propias de estos suelos, han demandado la necesidad de profundizar en el conocimiento de la respuesta del material frente a su utilización en distintas aplicaciones geotécnicas.

El problema planteado, se centra en la necesidad de definición de parámetros adecuados que permitan caracterizar el comportamiento mecánico y bajo

condición de infiltración de suelos constituyentes de capas granulares para pavimentos, junto con el desarrollo e implementación de modelos numéricos capaces de reproducir el comportamiento de estos suelos ante procesos de infiltración. El interés se focaliza en suelos inalterados y compactados, en ambos casos en condición no saturada.

1.3. Objetivos y Alcances

El principal objetivo para emprender el trabajo de esta tesis doctoral, consiste en estudiar la influencia de la humedad de las capas granulares o soporte del pavimento relacionando ésta con el módulo de elasticidad de dichas capas. De este modo se pretende conocer la corrección de dichos valores por el efecto de la humedad, es decir, obtener una normalización y, por tanto, ajustar las actuaciones de rehabilitación conociendo el verdadero comportamiento mecánico y la fatiga. Específicamente, lo que se pretende es predecir el grado de humedad que tendrán las capas granulares debido a las lluvias y su influencia en las características mecánicas de las capas estructurales del firme. De este modo se podrán establecer las actuaciones de rehabilitación de una forma más precisa.

Los objetivos específicos planteados son los siguientes:

- Analizar la influencia de la humedad de las distintas capas granulares que conforman un pavimento flexible, sobre la determinación de la capacidad de soporte del firme, es decir, sus módulos de elasticidad.
- Estudiar la caracterización física del proceso de infiltración de agua en terrenos granulares (base y sub-base de pavimentos).
- Elaborar modelos analíticos que permitan predecir el problema infiltración-humedad de capas granulares a una profundidad.

- Describir los pasos necesarios para obtener los módulos de elasticidad de las capas de un pavimento a partir de los valores de la deflexión que se obtienen en el punto de aplicación de la carga y en las proximidades de la misma para un instante “t” (cuenca de la deflexión) corrigiendo los mismos en base a los cálculos previos.
- Formular recomendaciones en el estudio y propuestas de rehabilitación de pavimentos basadas en la relación entre humedad y los módulos de elasticidad de las capas granulares. Esto será posible después de introducir los módulos corregidos en un modelo de cálculo directo, conocido el tráfico y las leyes de fatiga de los materiales.

Para poder abordar la problemática planteada, se han limitado aspectos vinculados con los modelos y estudios experimentales. Estas limitaciones en los trabajos realizados se encuadran en el cumplimiento de los objetivos. Se ha procurado organizar la metodología de trabajo por medio de un plan de tareas específico y detallado que comprendió actividades de laboratorio, campo y análisis de resultados.

1.4. Planificación de la Investigación y Organización de los Trabajos

La metodología de trabajo para el desarrollo de la presente investigación comprendió la realización de un conjunto de acciones coordinadas. Estas acciones implicaron el desarrollo de actividades de análisis, junto con trabajos experimentales de laboratorio y campo. Fijados los elementos globales del problema, el análisis se centro en la particularidad del mismo, tanto en los aspectos relacionados con las características de las capas granulares, como en relación con la ejecución de ensayos específicos sobre estos materiales. Estos reconoci-

mientos permitieron la formulación de hipótesis respecto del comportamiento previsible, lo cual derivó en la definición de los correspondientes procesos de verificación experimental.

Con este conjunto de elementos, resultó factible la caracterización de los procesos de infiltración y comportamiento tenso-deformacional en capas granulares constituyentes de pavimentos, así como el desarrollo de una herramienta numérica para la predicción y evaluación de la capacidad estructural del suelo conociendo su contenido de humedad.

En detalle, la metodología utilizada para el desarrollo de esta tesis doctoral, consiste en la consecución de las siguientes tareas:

1. Definición de los objetivos del trabajo de investigación.
2. Revisión del estado del arte.
3. Selección de los métodos y técnicas experimentales más adecuadas.
4. Planificación y desarrollo de actividades de laboratorio:
 - a) Fabricación y caracterización de suelos normalizados para capas granulares (según especificaciones técnicas PG-3).
 - b) Estudio experimental de la evolución del índice CBR en función del grado de humedad del material. Desarrollo de nuevas metodologías para la caracterización de los suelos con respecto al grado de humedad contenida.
5. Planificación y desarrollo de actividades de campo:
 - a) Monitorización de la humedad retenida en las capas granulares de un pavimento en un tramo real de ensayo, a través de la colocación de sensores de humedad.

- b)* Ensayos con deflectómetro de impacto para determinar el módulo elástico de las capas granulares en el tramo de ensayo mediante cálculo inverso.
- 6. Análisis infiltración-capacidad portante de las capas granulares:
 - a)* Caracterización física del proceso de infiltración de agua en materiales granulares.
 - b)* Implementación de un modelo de infiltración semi-empírico que permita evaluar la curva de infiltración y su evolución temporal.
 - c)* Desarrollo e implementación de un modelo numérico para evaluación de problemas de infiltración en capas granulares.
 - d)* Estudio del comportamiento de la capacidad portante de las capas granulares en función de la humedad: determinación de la relación entre modulo elástico y contenido de humedad.
- 7. Conclusiones y líneas futuras de investigación.

1.5. Metodología

Para acometer el presente trabajo de investigación, se han estudiado los métodos elásticos de diseño de pavimentos, que son los más extendidos. Estos métodos introducen simplificaciones que se pueden admitir en unas determinadas condiciones del pavimento. Este análisis lleva al estudio del módulo resiliente, como parámetro que nos permite evaluar el estado del pavimento. La determinación de este módulo se puede hacer de varias formas:

- A partir de su definición y mediante ensayos de laboratorio (ensayos triaxiales cíclicos), para lo cual deberíamos obtener muestras inalteradas de los materiales.

- Mediante métodos empíricos, a partir de los valores de tablas de datos obtenidos experimentalmente, los cuales pueden no ser válidos en determinadas condiciones.
- Mediante ensayos in situ con el deflectómetro de impacto que nos permite obtener el módulo utilizando el método de cálculo inverso.

Precisamente, la determinación del valor del módulo resiliente permite tener en cuenta el efecto del estado de humedad de las capas del firme, ya que tiene una dependencia directa con este parámetro. Por tanto, una herramienta fundamental en nuestro estudio es la determinación del estado de humedad de las capas. Para ello, debemos estudiar el efecto del clima en el pavimento, lo que constituye otra línea de investigación de este trabajo. Tendremos en cuenta las precipitaciones caídas en el periodo de estudio y relacionarlas con el estado de humedad del pavimento. Su intensidad, su duración, el estado de fisuración del pavimento y el sistema de drenaje de la carretera se demuestran factores importantes a tener en cuenta.

Por otra parte, se estudian las técnicas empleadas en la determinación de la infiltración en el pavimento. El análisis se puede enfocar desde cuatro puntos de vista:

- Modelo de pérdidas, considerando la infiltración como una pérdida de la precipitación, y utilizando la ecuación de balance hídrico, en la que se tienen en cuenta la precipitación, la evaporación, la infiltración y el estado de humedad inicial.
- Modelo de cálculo que obtiene la infiltración a partir de fórmulas semiempíricas, que tienen en cuenta la permeabilidad, la viscosidad y la succión.

- Fórmulas empíricas que se obtienen en base a resultados experimentales.
- Medición in situ mediante infiltrómetros.

En resumen, el presente estudio se divide en dos partes bien diferenciadas:

1. Ensayos de laboratorio.

- Vistos los objetivos y algunos de los estudios realizados en esta línea, se continúa en este trabajo con la hipótesis de que la presencia de mayor humedad en las capas granulares que forman las explanadas de las secciones de carretera, afecta de forma negativa en su resistencia.
- Además, se sostiene la hipótesis de que al ser distinta la susceptibilidad al agua de cada terreno, las características de éstos estarán directamente relacionadas con el efecto del agua en la capacidad portante de los mismos. Para ajustar el grado de afectación teniendo en cuenta las dos variables mencionadas - tipo de suelo y grado de humedad - se decide estudiar la evolución del índice CBR según los distintos tipos de materiales y según el grado de saturación que puedan llegar a tener.

2. Ensayos de campo.

- En primer lugar, se analizarán las posibilidades de monitorización de humedad retenida en las capas del firme mediante sensores embebidos. Para la determinación de la humedad del suelo, en la actualidad sólo existen equipos concebidos para la agricultura, por lo que su empleo en carreteras ofrece incertidumbres, siendo además la colocación de los mismos una tarea crítica.

- En segundo lugar, se estudia como método de auscultación de firmes el ensayo con deflectómetros de impacto, el cual, a partir de los datos de deflexiones, nos permitirá obtener los valores de los módulos de las capas y por tanto correlaciones con la humedad de las mismas.

1.6. Procedimiento y Estructura

La presentación de esta tesis doctoral se divide en capítulos o secciones que reflejan la estructura del proyecto inicial, con sus específicas líneas de acción, resultados y discusión.

El documento se estructura de la siguiente manera:

- **Introducción**, comprende el capítulo actual, donde se expone la motivación y los objetivos propuestos, definiciones de los conceptos y nomenclatura utilizada, así como la estructura de esta tesis doctoral.
- **Estado del Arte**, capítulo que recoge la situación actual del conocimiento en relación al tema objeto de estudio.
- **Materiales: composición y Especificaciones**, analiza los materiales utilizados a lo largo de esta investigación, así como sus especificaciones técnicas.
- **Métodos Experimentales**, este capítulo describe los métodos experimentales utilizados en el desarrollo analítico llevado a cabo tanto en laboratorio como los métodos utilizados in-situ para la determinación de la humedad contenida en las capas granulares, describiendo las tecnologías de medida y determinación de magnitudes físicas e ingenieriles utilizadas en este trabajo.

- **Ensayos de Laboratorio: Caracterización de Capas Granulares**, este capítulo describe los resultados del estudio llevado a cabo en laboratorio para la preparación y caracterización de capas granulares, discutiendo los hallazgos y analizando la idoneidad de la metodología utilizada.
- **Determinación de la Infiltración de las Capas Granulares**, este capítulo analiza la capacidad de infiltración de los materiales granulares a través de la descripción de los fenómenos físicos asociados al mecanismo de infiltración de agua meteorológica en el terreno. Se incluye además el desarrollo e implementación de un modelo numérico para la evaluación de la infiltración en capas granulares de los pavimentos.
- **Influencia de la Humedad en el Comportamiento Estructural**, este capítulo describe los resultados de la capacidad portante de los suelos obtenidos en el tramo de ensayo y analiza la influencia del contenido de humedad en la capacidad estructural de las capas granulares.
- **Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación**, este capítulo expone las conclusiones globales obtenidas a partir de los resultados obtenidos indicando las reflexiones extraídas a la vista de los mismos. Asimismo, el capítulo apunta futuras líneas de investigación que derivan del conocimiento adquirido durante el presente trabajo de tesis doctoral.
- **Anejo A: Resultados de los Ensayos de Laboratorio**, este anejo es un compendio de los resultados de los análisis ejecutados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid, realizados sobre los materiales preparados para su caracterización geotécnica.
- **Anejo B: Resultados de los Ensayos de Campo: Contenido de Humedad en las Capas Granulares**, recoge los resultados obtenidos

de los ensayos de campo relativos a la medición de la humedad retenida en las capas granulares.

- **Anejo C: Resultados de los Ensayos de Campo: Medidas de Deflexiones y Módulos de Elasticidad de las Capas Granulares**, recoge los resultados obtenidos de los ensayos de campo relativos a las medidas con deflectómetros de impacto, y los resultados del modulo de elasticidad obtenidos mediante cálculo inverso.
- **Anejo D: Modelo Semi-Empírico de Infiltración: Programa en FORTRAN 90**, este anejo recoge el código fuente del programa MICG, Modelo de Infiltración de las Capas Granulares, realizado en FORTRAN 90, para la modelización de la infiltración en las capas granulares.
- **Anejo E: Caracterización de los Materiales de Ensayo en Campo**, este anejo es un compendio de los resultados de los análisis ejecutados por laboratorios certificados sobre los materiales utilizados en los ensayos de campo.
- **Anejo F: Calibración de los Dispositivos de Medida en Campo**, este anejo incluye los informes técnicos de calibración de los instrumentos de medición utilizados en los ensayos de campo.
- **Anejo G: Revisiones de los Dispositivos de Medida y Visitas Técnicas al Tramo de Ensayo**, incluye los informes realizados tras visitas técnicas e inspecciones realizadas in-situ sobre los instrumentos de medición, aso como un análisis general, durante todo el periodo de ensayos, sobre el estado de funcionamiento de los sensores insertados en las distintas capas.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

Conocer el estado del firme en cualquier instante permite optimizar las actuaciones de mantenimiento durabilidad, mejorando las condiciones de seguridad y confort de una carretera. La red de carreteras de España cuenta con 165,787 *Km*, de los cuales 25,733 (RCE) están gestionados por la Administración Central y acogen el 51,3 % del tráfico. Las Comunidades Autónomas gestionan 71,464 *Km*, (42,2 % del tráfico) y 68,590 *Km* son gestionados por las Diputaciones (6,5 % restante). Además, existen 372,872 *Km* de carreteras interurbanas gestionadas por los Ayuntamientos y otros organismos que acogen un 2,5 % del tráfico total, según estimaciones de la Dirección General de Tráfico.

Como balance general puede decirse que España cuenta con una red madura, con la práctica convergencia con Europa en términos de equipamiento del país en grandes infraestructuras de transporte, y muy en particular en autovías y autopistas. Con casi 18 kilómetros de vías de gran capacidad por cada 1000 km^2 de superficie, España se situaba ya en el año 2000 al mismo nivel que Francia y significativamente por delante de la media de la UE (15,9 $km / 1000 km^2$).

En relación al número de habitantes, España es el segundo país europeo con mayor densidad de red de autovías y autopistas, superada solo por Luxemburgo. En el ámbito nacional, la carretera continúa siendo el único modo de transporte capaz de cubrir prácticamente cualquier tipo de demanda, por lo que no es de extrañar que asegure el 86 % del transporte terrestre de mercancías y el 88 % del de viajeros (dato que se obtiene a partir de la suma del 78 % correspondiente al vehículo privado más el 10 % cubierto por el transporte colectivo en autobús).

Aunque tradicionalmente tanto en los países más desarrollados como en los

que lo están en menor grado, las administraciones públicas han prestado una atención mayor a la construcción de nuevas carreteras que a su conservación, las tendencias en los últimos años - según reflejan los distintos informes - indican que las necesidades de conservación de carreteras aumentan con el desarrollo de un país. De hecho, la cantidad económica dedicada a conservación respecto a la dedicada a construcción en los países más desarrollados supera, en la mayoría de los casos, el 50 % del presupuesto destinado a carreteras.

Controlar el deterioro de las carreteras existentes resulta más rentable que la expansión de la red, por lo que se tiende a dar prioridad a la conservación frente a la construcción. En la referencia *Sistemas de gestión de firmas tecnología y metodología*, se relacionan medidas novedosas para la optimización de costes y el mantenimiento de la red en un nivel de servicio adecuado. Asimismo se crean sistemas de control como el programa ADAR, [21] que aseguran que la ejecución de una carretera se ajusta a los parámetros de proyecto. El objetivo es garantizar la calidad de la obra mediante una auscultación de alto rendimiento de determinados parámetros que afectan básicamente a la vida útil de la carretera, determinándose en un gran número de puntos o en continuo.

La decisión más complicada que han de adoptar las empresas responsables de la conservación y el mantenimiento es *cómo y cuando* rehabilitar el pavimento de manera rentable. Una decisión de este tipo no se puede tomar sin una información a tiempo y precisa sobre el estado de un firme que además facilite establecer criterios para priorizar las actuaciones y distribuir los recursos.

Actualmente las metodologías de análisis de pavimentos flexibles relacionan la capacidad de soporte con los módulos resiliente para las capas granulares y explanadas y los módulos dinámicos para el aglomerado. Con la obtención de estos parámetros se puede determinar las condiciones en las que se encuentra un firme y establecer su vida útil en función de las solicitudes que vaya a

soportar. Estos parámetros están fuertemente influenciados por las condiciones de humedad, temperatura y estado tensional, por lo que para su determinación es fundamental el tenerlos en cuenta.

Dentro del comportamiento estructural de un firme, la explanada tiene un peso importante como así queda reflejado en la instrucción 6.3.I.C, *Instrucción de rehabilitación de firmes del Ministerio de Fomento*. Pero no es menos cierto que todas las capas granulares pueden tener influencia en la capacidad estructural del firme y su variación con la humedad influye notablemente en los resultados de un análisis de capacidad portante. La medida de la deflexión constituye un parámetro que permite evaluar la capacidad estructural, y es sabido que una parte importante de la misma está condicionada por el estado de la explanada. Por lo tanto, es necesario estudiar el conjunto de las capas y no solo las que componen el firme. Por tanto, la capacidad estructural o portante del firme no depende solo de las capas del firme sino también de la explanada del mismo, formada en cada caso por un tipo de suelo.

En esta investigación se pretende analizar la influencia de la humedad de las capas granulares en la determinación de la capacidad de soporte de un firme. Al modificar la proporción de agua de un material granular y de un suelo se modifican las características mecánicas del mismo de manera que su capacidad portante puede verse reducida entre 20 y 50 veces más que cuando se restringe su presencia. En España, para la determinación de la capacidad resistente del firme y su necesidad de rehabilitación se emplea la Instrucción 6.3IC, donde se advierte de la necesidad de hacer un estudio específico y detallado de la evolución de las deflexiones con la humedad.

2.2. Influencia de la Humedad en las Prestaciones del Firme

La evaluación del estado de una explanada partiendo de los datos climatológicos, así como de los conocimientos que se tienen sobre el grado en que estos afectan y el tiempo que tardan en hacerlo, puede ser una tarea compleja. En este trabajo, nos centraremos en los efectos de las precipitaciones sobre las prestaciones del firme.

Precipitación es cualquier agua meteórica recogida en la superficie terrestre; esto incluye básicamente: lluvia, nieve y granizo. El análisis de las precipitaciones es un paso previo esencial, dentro de cualquier estudio hidrológico regional, para cuantificar los recursos hídricos, puesto que constituyen la principal (en general la única) entrada de agua en una cuenca. También es fundamental en la previsión de avenidas, diseño de obras públicas, estudios de erosión, etc.

Referente a los viales, la capacidad estructural de los pavimentos flexibles posee una alta sensibilidad a las variaciones de las condiciones hídricas de los materiales. Así, el agua libre insertada en el interior de un pavimento puede producir un deterioro entre 20 y 50 veces mayor en su capacidad estructural con respecto al mismo pavimento en ausencia de agua. Para muchos autores, el agua es considerado como el factor climático erosivo más peligroso [11]. Estos trabajos afirman que la presencia de agua libre dentro del pavimento se debe principalmente a dos causas de diferente naturaleza: i) infiltración de agua a través de grietas en el pavimento, zanjas laterales, cunetas sin pavimentar, etc y ii) ascensión capilar desde el nivel freático. Cada uno de estos aspectos contribuye a la degradación de la capacidad portante de las estructuras. Ridgeway [40] atribuye los mayores daños en los pavimentos a la infiltración de agua por las fisuras que se generan en la capa de rodadura.

La **INFILTRACIÓN** es el proceso de entrada de agua al suelo. El agua entra en el suelo por las grietas y poros de mayor tamaño, por gravedad. De los poros de mayor tamaño pasa a los de menor tamaño, por capilaridad. La infiltración es, por tanto, un proceso que implica entrada y movimiento del agua en el suelo, y se expresa en unidades de velocidad de paso: mm/h o cm/h (ver esquema en Figura 2-1, según Dunne y Leopold [15]). En el proceso de infiltración intervienen tres subprocesos:

- Entrada de agua al suelo
- Retención de agua en el suelo
- Movimiento del agua a través del suelo

La importancia de la infiltración radica en que este proceso determina la cantidad de agua que entra en el suelo por las precipitaciones, y con ello su humedad a lo largo del año. El agua no infiltrada escurre superficialmente, y puede llegar a incorporarse a los cauces muy rápidamente, contribuyendo a la formación de avenidas.

Figura 2-1.: Esquema ilustrado del proceso de infiltración

Castaño [ño2005] desarrolló varios modelos experimentales para analizar la infiltración del agua en las capas granulares y el efecto de ésta sobre la capa de rodadura. Sus trabajos confirmaron que la infiltración de agua se desarrolla en pocos minutos, lo cual se encuentra en contradicción con el concepto básico de que el pavimento es muy poco permeable, según Cedergren (1987), ya que con el tiempo una capa asfáltica puede permitir la infiltración de hasta un 70 % de una precipitación. Por otra parte, los ciclos de hielo y deshielo son fenómenos difíciles de modelar, debido a los complejos procesos involucrados. Aun así, algunos intentos han resultado exitosos. Uno de ellos, elaborado por Simonssen y coautores [43], proporcionó resultados aceptables.

La sensibilidad de los materiales granulares a la humedad depende de la cantidad y naturaleza de la fracción fina. Las gravas limpias y arenas no exhiben sensibilidad a la humedad debido a la ausencia de un suficiente número de pequeños poros, necesarios para crear la adecuada tensión efectiva de succión [48].

Muchos investigadores han desarrollado relaciones de ajuste por regresión entre el módulo resiliente de material granular y el contenido de humedad. La relación obtenida por [10] contiene un término dependiente de la humedad que resulta en 0,62 *psi* (4,3 *Mpa*) de descenso por cada 1 % de aumento del contenido de humedad. Otros autores, [12] [27] [Ω^{rm2000}] [2], demuestran que el agua libre en el interior de un pavimento puede llegar a deteriorar de 20 a 50 veces más su capacidad estructural que cuando se restringe su presencia, constituyéndose en el factor climático más peligroso.

En [5] se indica que la mayoría de las diferencias en los módulos de resiliencia de suelos granulares, resultado de los cambios en el contenido de humedad, ocurren probablemente como consecuencia de cambios en las presiones efectivas de confinamiento del material. Estos cambios tienen lugar a consecuencia

de modificaciones de la presiones negativas de succión. Por tanto, cuando el contenido de humedad descende, la succión y las presiones efectivas y la rigidez de suelo se incrementan hasta alcanzar contenidos de humedad muy bajos.

El contenido de humedad depende de una variedad de factores climáticos y físicos que incluyen el tipo de suelo, la temperatura, la precipitación, la vegetación y otros. El método más fiable de obtener el estado de humedad es la medición directa sobre un período de tiempo. Sin embargo, muchos autores coinciden en que existe un valor óptimo del contenido de agua en el cual la rigidez es máxima debido a la presencia de succión entre las partículas. Si el contenido de agua aumenta respecto al óptimo, la succión se pierde seguida por un incremento en la presión de los poros causando la disminución de la rigidez. Cuando el contenido de agua decrece, aumenta el módulo porque se incrementan las fuerzas de capilaridad entre los meniscos de las partículas.

Por otro lado, Chamberlain et al. [13] investigaron los efectos de hielo-deshielo en el módulo resiliente. Concluyeron que los descensos en los valores del módulo fueron causados por los aumentos en el contenido de agua, así como por los descensos en la densidad que suceden cuando los suelos se hielan con acceso libre al agua. La recuperación del módulo resiliente después del deshielo se atribuyó al descenso del contenido de agua y al aumento de la densidad seca.

Recientes estudios han mostrado que importantes factores climáticos tales como la temperatura, la precipitación, la velocidad del viento y la radiación solar podrían ser modelizados con fines de diseño utilizando una combinación de métodos analíticos y estocásticos. Así, el modelo de precipitación desarrollado por Liang [33], es un modelo matemático que utiliza un algoritmo determinista aplicable a cualquier tipo y cantidad de precipitación. El procedimiento utiliza datos medios del clima, y conceptos matemáticos para simular tipos de precipitación aceptables para el estudio de pavimentos. Este modelo de infiltración

cubre varios objetivos en la evaluación del efecto de la precipitación en el pavimento. Estos objetivos incluyen análisis de drenaje, análisis de infiltración y evaluación del diseño de pavimentos. Se utiliza un cálculo numérico para obtener el grado de drenaje con el tiempo de un suelo granular inicialmente saturado con drenaje lateral, cubriendo una explanada permeable o impermeable. Este análisis asume que la capa granular es un material drenante. De esta forma, para la evaluación del pavimento se utiliza un procedimiento empírico en base al tiempo requerido para que se alcancen condiciones de saturación críticas en la capa granular. Cuanto mejor sea el drenaje, mayor será la capacidad portante bajo condiciones húmedas.

2.3. Comportamiento de los Pavimentos

Los pavimentos son estructuras de ingeniería civil utilizados con el propósito de dar servicio de manera segura y económica a los vehículos. Hay una tipología muy variada de estructuras de pavimentos dependiendo de la naturaleza de los vehículos a los que se debe dar servicio, la carga por eje y el número de éstos que deben ser soportados durante un determinado período de tiempo.

Las capas granulares están constituidas por materiales de composición granulométrica continua, procedentes de gravera o cantera, que se han sometido a procesos de machaqueo en la mayoría de los casos. La estabilidad de estas capas es debida a su compacidad. Otras cualidades importantes para el buen comportamiento de las capas granulares son el rozamiento interno y la resistencia a esfuerzo cortante, que están en función de la densidad, forma de las partículas y composición granulométrica.

Las características principales del funcionamiento de las capas granulares son:

- El suelo está debajo del pavimento y los materiales granulares se en-

cuentran encima del nivel freático pero bajo una superficie impermeable, aunque ésta no sea capaz de suprimir el acceso del agua. Por tanto, pueden existir tanto condiciones de saturación total como parcial.

- Los suelos y materiales granulares en los pavimentos están sujetos a un gran número de repeticiones de carga a niveles de tensión muy por debajo de su resistencia a cortante.
- En pavimentos sin la capa de rodadura, cuando se aplica el tráfico de obra directamente a la capa granular, los niveles de tensión son mucho más altos.
- Bajo la aplicación de una carga móvil, un pavimento responde principalmente con un comportamiento resiliente. Sin embargo, las deformaciones plásticas irreversibles se acumulan bajo cargas repetidas.

Existe una amplia aplicación de la teoría de elasticidad para el análisis de sistemas multicapas. Los métodos de la elasticidad permiten, dentro de las restricciones que imponen sus hipótesis de partida, si no un cálculo exacto de tensiones y deformaciones, al menos un conocimiento cualitativo de las mismas.

Inicialmente, se intentó acometer el problema de obtención de las tensiones basándose en las teorías de Boussinesq para un macizo homogéneo elástico seminfinito e isótropo sometido a una carga vertical uniformemente repartida según un área circular [4] [6], obteniéndose resultados muy conservadores para pavimentos, ya que sobrevaloraba el estado de tensiones en el interior del macizo, con lo que se obtienen espesores mayores de los necesarios.

Escario [18] estudió las tensiones y deformaciones del sistema bicapa, constituido por una losa elástica de espesor dado y módulo de elasticidad dado E_1 , sobre un macizo seminfinito con módulo de elasticidad E_2 . Este esquema elástico es más aproximado a la realidad que la fórmula de Boussinesq, pudiéndose

asimilar el firme a la primera capa y el suelo al macizo. Con este método se obtienen las flechas bajo una carga P , repartida en un área circular. Varios programas informáticos han sido desarrollados para la obtención de resultados en esta línea. Se considera que las capas del pavimento son linealmente elásticas y los valores de tensión, deformación y deflexión en cualquier punto de la estructura se definen para una determinada geometría y carga superficial dada.

Hogg por su parte estudia el caso de un placa cargada sobre un sólido elástico seminfinito. En este caso se considera el pavimento como una capa rígida. El modelo Águila-Rodríguez [1] permite obtener el módulo elástico de la subrasante en un punto ubicado directamente bajo una carga superficial impuesta. El método simplifica el sistema elástico multicapas típico. Este cálculo es ampliable con objeto de calcular las deflexiones en puntos distantes de la carga circular, definiendo así el cuenco de deflexiones teórico de Hogg. A partir de este modelo se pueden determinar los parámetros básicos del sistema, es decir la longitud característica l_0 , y el módulo de elasticidad E , a partir de dos valores de deflexiones. Incluso, es posible relacionar el valor del módulo obtenido con el índice *CBR California Bearing Ratio* mediante la siguiente expresión:

$$E_0 = k \cdot CBR \quad (2-1)$$

donde

E_0 es el módulo de elasticidad, en $(kg\ cm^{-2})$,

k es el coeficiente de correlación ($k = 100$ para suelos granulares gruesos,

$k = 110$ para suelos granulares finos,

CBR es el valor de soporte, en porcentaje.

La capa rígida de Hogg no afecta a la caracterización de la subrasante, ya que

se obtienen valores del módulo E comparables a los obtenidos considerando una capa elástica en vez de rígida para el pavimento. El modelo de Hogg es aplicable a la obtención del número estructural para pavimentos flexibles de la norma AASHTO. Para ello se deben introducir coeficientes correctores para contrarrestar el efecto de la rigidez de la capa superior de Hogg.

En los pavimentos reales, las cargas son transitorias: el suelo y las capas granulares tienen un marcado comportamiento tenso deformacional no lineal, y la capa bituminosa tiene propiedades sensibles al estado de carga y la temperatura. La mayoría de los materiales de pavimentación [19] experimentan alguna deformación permanente después de cada aplicación de carga. Sin embargo, si la carga es pequeña comparada con la resistencia del material y se repite un gran número de veces, la deformación bajo cada repetición de carga llega a ser casi completamente recuperable y proporcional a la magnitud de la carga, pudiéndose entonces considerar elástica. La consideración de modelos elásticos lineales en pavimentos ha sido muy útil en el desarrollo de métodos de diseño.

La principal justificación del uso de la teoría elástica es que tras la aplicación de una carga, la mayoría de los pavimentos responden de una manera resiliente. Cualquier deformación no recuperable será pequeña en comparación con la componente resiliente. Normalmente cada capa se caracteriza por un valor del módulo de Young y de Poisson. Debido a las diferencias entre el comportamiento real e idealizado de los pavimentos, se desarrolló el concepto de módulo *resiliente*, el cual se utiliza cuando se solicita la estructura con cargas dinámicas. En el caso de pavimentos, las solicitaciones de los vehículos se modelan como pulsos de corta duración y por lo tanto se consideran como cargas dinámicas.

Así, se define el módulo resiliente como la relación entre el desviador de tensiones en un ensayo triaxial cíclico y la deformación axial recuperable o resiliente

[36]:

$$M_r = \frac{q}{\epsilon} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon} \quad (2-2)$$

siendo σ_1 el esfuerzo cíclico axial y σ_3 la presión de confinamiento.

En ingeniería de pavimentos es habitual expresar el módulo resiliente como una función del estado tensional. Este hecho implica la no linealidad del comportamiento elástico. Para tener en cuenta esta no linealidad en los modelos se utilizan dos aproximaciones:

1. La primera utiliza un proceso iterativo mediante soluciones elásticas [8]. Las capas de material granular y de suelo se dividen en subcapas para tener en cuenta las variaciones del módulo resiliente producidas por cambios producidos en los estados tensionales como consecuencia de la profundidad. Los estados tensionales son aquellos provocados por las cargas de tráfico y las sobrecargas. El procedimiento general es:
 - Subdividir las capas reales en subcapas. A mayor número de éstas mayor exactitud en los resultados.
 - Estimar un valor del módulo de Young para cada capa.
 - Determinar las tensiones debido al tráfico y al peso propio en el centro de cada capa.
 - Ajustar los valores del módulo resiliente de cada subcapa en base al estado tensional obtenido y recalcular las tensiones.
 - Repetir el proceso hasta que los valores del módulo resiliente utilizado para todas las capas sean compatibles con las tensiones calculadas.

2. En el segundo se tienen en cuenta las variaciones en tensiones que tienen lugar en la dirección horizontal. Para ello lo más adecuado es adoptar modelos de elementos finitos [20], [41].

La respuesta de un elemento de suelo a las cargas aplicadas depende de estado de consolidación y del estado de tensiones efectivas. El comportamiento mecánico de los materiales granulares es complejo, porque no se trata de un cuerpo uniforme sino de un conjunto de diferentes partículas individuales [47]. Las deformaciones experimentadas bajo carga por un elemento de estos materiales, son el resultado de deformaciones internas y movimientos relativos entre las partículas constitutivas de este elemento bajo cargas cíclicas. Estos materiales presentan deformaciones resilientes y permanentes. Después de cada ciclo recuperan parte de su estado inicial, pero van acumulando cierto grado de deformación a medida que se incrementa el número de repeticiones. Por otro lado, las deformaciones producidas por el deslizamiento entre las partículas o por su ruptura son irreversibles. El deslizamiento entre partículas no comienza hasta que el incremento de presiones no supere un valor crítico; para valores de presión inferiores a éste, las deformaciones se atribuyen a distorsiones elásticas de las partículas individuales.

En Thompson [44], después de un extenso estudio, se informa de la existencia de un módulo resiliente crítico correspondiente a un determinado valor de tensión que caracteriza el comportamiento del suelo bajo cargas cíclicas. En este sentido Gribble et al [23] detallan la influencia de la consideración de las deformaciones permanentes de las capas del firme en el diseño del pavimento.

La vida útil de una carretera está influenciada significativamente por el módulo resiliente de los suelos, y éste a su vez está fuertemente relacionado con la presencia de agua. El suelo está habitualmente en unas condiciones de saturación parcial, y la succión contribuye a su resistencia. Si el contenido de agua

aumenta, la succión decrece hasta que desaparece, y en condiciones no saturadas el suelo puede experimentar una gran pérdida de resistencia. Para evitar la acumulación de agua debajo del pavimento, las capas inferiores deben ser permeables y deben estar conectadas al sistema de drenaje.

2.4. Instrumentación de Medidas de Humedad y Auscultación

Conocer el estado y evolución de las características físicas de los materiales de las capas granulares es más sencillo con la colocación de dispositivos embebidos con capacidad de adquisición, procesamiento, almacenamiento y comunicación de datos. La auscultación de terraplenes puede aportar un mejor conocimiento sobre el comportamiento de las obras de tierra y consecuentemente una mejor calidad de las mismas en su evolución futura. En ciertas ocasiones, además, puede permitir añadir un punto de seguridad a la propia obra. Aunque no es muy común, existen múltiples instrumentos que se aplican a la auscultación de terraplenes con los que conocer y estudiar el estado de las capas, a saber, controles de temperaturas, de aguas subterráneas, de movimientos en superficie y en el interior del terraplén, de asientos, de presiones, etc.

Entre los sensores embebidos ambientales, los que miden la respuesta a cambios lentos debidos a la climatología, humedad y temperatura podemos señalar:

- Los sensores de humedad, para medir la humedad en el pavimento, también a diferentes profundidades, siempre que no haya congelación. Se basan en la medida de la capacitancia.
- Células de presión dinámica en poros (*dynamic pore water pressure cell*), miden la presión que aparece en los poros de los terrenos que contienen

agua. Se utilizan para evaluar cambios rápidos de presión en superficies saturadas no congeladas sujetas a condiciones de carga ambientales.

- Medidor del nivel de agua (*open stand pipe*), que consiste en una tubería enterrada verticalmente en el suelo para medir el nivel de agua.
- Células de presión estática lateral, utilizadas para medir distribución de presiones en las distintas capas del pavimento. Basan su funcionamiento en el principio según el cual la frecuencia de vibración de un cable cambia al estirarse y encogerse.

Para conocer la temperatura de una capa es necesario medirla de forma indirecta, es decir, medir una propiedad física de la materia que varíe en función de una variación térmica. Por ello existen diversos tipos de termómetros y termopares, así como también la posibilidad de instalar sensores electrónicos.

Existen tres tipos de medidas de temperatura que suelen ser interesantes para el conocimiento del estado del pavimento: la temperatura del aire, la temperatura de la superficie del pavimento y la temperatura del terreno.

En la siguiente figura (Figura 2-2) se aprecia una tabla donde se muestran las características mecánicas y eléctricas de los principales sensores embebidos existentes en el mercado capaces de registrar datos de temperatura y humedad. donde: V es la tensión de alimentación, I es el consumo, T rango de temperatura que soporta y P rango de presión que soporta.

2.5. Instrucción 6.3-IC de Rehabilitación de Firmes

La Instrucción de rehabilitación de firmes 6.3-IC del Ministerio de Fomento (ORDEN FOM/3459/2003, de 28 de noviembre), tiene en cuenta la influencia

SENSORES EMBEBIDOS									
MODELO	FABRICANTE	TIPO	PARÁMETRO A MEDIR	RANGO DE MEDICIÓN	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS				
					V (v)	I (mA)	T (°C)	P (bar)	Peso (gr)
HCD-500	Schaevitz	Transductor diferencial lineal	Desplazamiento	±12 [mm]	15	25		70	115
PI-5	Tokio Sokki	Medidor de abertura horizontal	Desplazamiento	50/300 [mm]	<10				40/90
ARH-A	Tokio Sokki	Acelerómetro	Aceleración	10/500 [m/s ²]	2,0/5		-0,2	5	18
4800	Geokon	Célula de presión dinámica del suelo	Presión sobre el suelo	3,5/50 [bar]	2,5/12		-0,3		
234	Kulite	Sensor de temperatura		<7 [bar]	10,0/15	-0,2			250
	MRC		Temperatura	-30/75 [°C]	5				
NTC	Mesotech			-80/150 [°C]					
FP2000	QTT			-40/80 [°C]					1250
Sensit	QTT		Tº, Pto. de Congelación, Humedad	-40/85 [°C]	18/28	0,5			
200-x	Watermark	Sensor de humedad	Humedad	0/100 %	9,0/24	0/20	-0,3	0/2	
TRIME-EZ	IMKO								
3410s	Geokon	Célula de presión de agua en poros dinámica	Presión de agua	<40 [bar]	0/5	4,0/20	-0,3	40	

Figura 2-2.: Características técnicas de distintos modelos de sensores embebidos

de la humedad en las capas granulares. En el punto 2,5 del anejo 3 de la citada norma, se detallan los coeficientes de corrección por humedad de la explanada, y en el punto 2.6 aparecen los relativos a la temperatura del pavimento para los casos en que el cálculo de la deflexión característica no se hace con la máxima humedad posible o con una temperatura de 20° C. Por lo tanto, la deflexión se obtendría de la expresión:

$$d_{kc} = c_h \cdot c_t \cdot d_k \quad (2-3)$$

donde c_h es el coeficiente corrector de humedad, c_t el coeficiente corrector de temperatura y d_k la deflexión característica del tramo que, a su vez, es igual a la media aritmética de las deflexiones puntuales consideradas más dos veces la desviación típica de las mismas. Estos parámetros de corrección quedan definidos en la norma de la siguiente forma:

2,5 *Corrección por humedad en la explanada. En principio, y siempre que sea posible, las medidas de la deflexión del tramo objeto de estudio se realizarán en la época de máxima humedad de la explanada, que será función de la climatología de la zona y del tipo de sección estructural del firme auscultado. En caso contrario, a las medidas obtenidas habrá de aplicárseles un coeficiente corrector c_h , determinado por estudios de variación de deflexiones con la humedad de la explanada en la zona de que se trate. En cualquier circunstancia hay que prescindir de medidas tomadas con la explanada helada y también será preferible no utilizar medidas realizadas en época muy seca.*

Para rehabilitaciones estructurales de firmes de carreteras con categorías de tráfico pesado T00 a T1 o de superficie de actuación superior a 70,000 m², el proyecto de rehabilitación del firme deberá contener un estudio específico y detallado de la variación de las deflexiones con la humedad de la explanada. Para el resto de situaciones, o si en el caso anterior no fuera posible disponer del mencionado estudio, podrán utilizarse los coeficientes correctores obtenidos por el método que se describe a continuación:

Se considerarán dos tipos de explanada según la clasificación de suelos hecha de acuerdo con los artículos 330 y 512 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3):

- *A) Suelos estabilizados S-EST2 y S-EST1, seleccionados y adecuados.*
- *B) Suelos tolerables, marginales e inadecuados.*

Se considerarán además dos tipos de condiciones de drenaje:

1. *Buenas condiciones de drenaje.*
2. *Malas condiciones de drenaje.*

A estos tipos de explanada y drenaje les corresponderán los coeficientes correctores ch de la deflexión característica, según la época del año en la que se realice la medida, de acuerdo con lo indicado en la tabla 13.

TIPO DE EXPLANADA Y DRENAJE	COEFICIENTE Ch		
	PERIODO HUMEDO	PERIODO INTERMEDIO	PERIODO SECO
A1	1	1,15	1,30
A2, B1	1	1,25	1,45 (*)
B2	1	1,30 (*)	1,60 (*)

Figura 2-3.: Coeficientes Correctores de la deflexión por humedad de la explanada

(*) VALOR ORIENTATIVO, SI NO SE DISPONE DE INFORMACIÓN. DE CUALQUIER MANERA SE RECOMIENDA EFECTUAR UN ESTUDIO ESPECIAL, ASÍ COMO QUE LA REHABILITACIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO SE DICTAMINE DESPUÉS DE MEJORAR NECESARIAMENTE LAS CONDICIONES DE DRENAJE EXISTENTES Y POSTERIORMENTE, MEDIR DE NUEVO LAS DEFLEXIONES.

En explanadas con suelos estabilizados in situ del tipo S-EST3 y espesores superiores o iguales a 25 cm, se podrá considerar el siguiente coeficiente corrector:

- Período húmedo e intermedio: 1,0
- Período seco: 1,15

Los períodos húmedo, intermedio y seco deberán determinarse en cada caso específico, teniendo en cuenta que las máximas deflexiones suelen producirse con cierto desfase respecto a la época de lluvias. En el caso de no disponer de datos suficientemente fiables para determinar si la medida de las deflexiones corresponden a un período húmedo, intermedio o seco, se adoptará el siguiente criterio:

Se tomará la precipitación de la estación meteorológica más próxima al tramo en estudio dentro de cada zona de referencia y, mediante comparación con los valores de la tabla 14, se determinará si el período climático en el que se ha realizado la medida de la deflexión es húmedo, intermedio o seco. Si las deflexiones se han medido en la segunda quincena de un determinado mes, se comparará la precipitación recogida en dicha estación meteorológica durante el mes anterior al de las medidas, con los valores que figuran en la tabla 14. Si la medida se ha hecho en la primera quincena de un mes, la comparación con los valores de la tabla 14 se hará sumando la precipitación de la primera quincena del mes anterior y la de la segunda quincena de dos meses antes al que se han medido las deflexiones.

Así, por ejemplo, para deflexiones medidas entre el 6 y el 8 de marzo se tomará como comparación con los valores de la tabla 14, la precipitación total ocurrida en la estación meteorológica de referencia entre el 16 de enero y el 15 de febrero del mismo año; para deflexiones medidas entre el 20 y el 22 de marzo, se tomará como precipitación total la del mes de febrero del mismo año. Con esta metodología, se tiene en cuenta el desfase habitual entre las máximas deflexiones y la época de lluvias, y al que se ha hecho referencia anteriormente.

Corrección por temperatura del pavimento. La deflexión patrón se referirá a una temperatura del pavimento igual a 20°C. En firmes sin mezclas bituminosas no hay variación a efectos prácticos, porque la temperatura no influye en las deflexiones y, por tanto, son válidas las medidas hechas a otra temperatura, sin aplicar ninguna corrección. La misma simplificación puede aceptarse cuando el espesor total de las mezclas del pavimento existente sea pequeño (inferior a 10 cm). Cuando el espesor es mayor (10 cm o más de mezclas bituminosas), hay que aplicar un coeficiente de corrección c_t por temperatura, en función de la existente en el pavimento en el momento de la medición, siguiendo el procedimiento indicado en la norma NLT-356.

ZONA (**)	PRECIPITACIÓN EN EL MES DE REFERENCIA (mm)		
	PERIODO HUMEDO	PERIODO INTERMEDIO	PERIODO SECO
1	>125	90-125	<90
2	>100	70-100	<70
3	>80	50-80	<50
4	>65	45-65	<45
5	>45	30-45	<30
6	>30	20-30	<20
7	>20	10-20	<10

Figura 2-4.: Zonas con nivel de precipitación anual semejante para la estimación de los periodos húmedos, intermedios y secos (*)

(*) LOS DATOS DE LA TABLA SE HAN DETERMINADO POR ADAPTACIÓN Y SIMPLIFICACIÓN DE LOS DATOS DISPONIBLES DURANTE UN PERÍODO DE 30 AÑOS EN LAS ESTACIONES PRINCIPALES DEL INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA.

(**) Ver Figura 2-5

En la Figura 5 se representan los coeficientes c_t de la norma NLT-356 que deben aplicarse en función de que el pavimento esté poco o muy fisurado. Si el pavimento está muy fisurado, la temperatura tiene menos influencia en la deflexión; en el caso límite de un pavimento totalmente fisurado, el firme se comportaría como un material granular sin cohesión, en el que no habría que aplicar coeficiente corrector por temperatura.

En ningún caso deberán hacerse las medidas con temperaturas del pavimento inferiores a 5°C , para prevenir hacerlo con un firme helado, lo que invalidaría los resultados. Tampoco deberán hacerse con más de 30°C si el pavimento tiene 10 cm o más de mezclas bituminosas o con más de 40°C si el pavimento tiene menos de 10 cm de mezcla bituminosa, ya que no se podría obtener una deflexión fiable.

Como expresiones analíticas del coeficiente c_t pueden tomarse las indicadas en la tabla 14 (en función de la temperatura T del pavimento, en grados Celsius).

Figura 2-5.: Zonas térmicas estivales

Figura 2-6.: Zonas con nivel de precipitación anual semejante. Los valores de la tabla se han determinado por adaptación de los datos disponibles durante un periodo de 30 años en las estaciones principales del Instituto Nacional de Meteorología

Figura 2-7.: Coeficientes de corrección en función de la temperatura, según instrucción 6,3-IC

Firmes con pavimento poco fisurado y espesor de MB ≥ 10 cm	Firmes con pavimento muy fisurado	Firmes flexibles con espesor de MB < 10 cm, o firmes totalmente fisurados
$C_t = 200 / (3 \cdot t + 140)$	$C_t = (2 \cdot t + 160) / (3 \cdot t + 140)$	$C_t = 1$

Figura 2-8.: Coeficiente corrector con la temperatura, según Instrucción 6,3-IC

CAPÍTULO 3

MATERIALES: COMPOSICIÓN Y ESPECIFICACIONES

3.1. Materiales Granulares Preparados en Laboratorio

3.1.1. Introducción

Tras analizar varias posibilidades con las que relacionar la influencia de la humedad de los suelos en su resistencia, capacidad de soporte y deformación, finalmente se opta por la obtención de datos de la variación del CBR con la humedad para los suelos más utilizados en la formación de explanadas, según están definidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Los materiales que se definen en dicho Pliego son los siguientes:

Suelos Seleccionados. Son aquellos que cumplen las siguientes características:

- Carecerán de elementos de tamaño superior a ocho centímetros (8 *cm*) y su cernido por el tamiz 0,080 UNE será inferior al veinticinco por ciento (25 %) en peso.
- Simultáneamente, su límite líquido será menor que treinta ($LL < 30$) y su índice de plasticidad menor que diez (< 10) y no presentará hinchamiento en dicho ensayo.
- La densidad máxima correspondiente al ensayo Proctor normal no será inferior a un kilogramo setecientos cincuenta gramo por decímetro cúbico ($1,750 \text{ kg/dm}^3$).
- Estarán exentos de materia orgánica.

Las exigencias anteriores en cuanto a los suelos descritos, se determinarán de acuerdo con las normas de ensayo NLT-105/72, NLT-106/72, NLT-107/72, NLT-111/72, NLT-118/59 y NLT-152/72.

Suelos Adecuados. Son aquellos que cumplen las siguientes características:

- Carecerán de elementos de tamaño superior a diez centímetros (10 *cm*) y su cernido por el tamiz 0,080 UNE será inferior al treinta y cinco por ciento (35 %) en peso.
- Su límite líquido será inferior a cuarenta ($LL < 40$).
- La densidad máxima correspondiente al ensayo Proctor normal no será inferior a un kilogramo setecientos cincuenta gramo por decímetro cúbico ($1,750 \text{ kg/dm}^3$).
- El índice CBR será superior a cinco (5) y el hinchamiento medido en dicho ensayo, será inferior al dos por ciento (2 %).
- El contenido de materia orgánica será inferior al uno por ciento (1 %).

Suelos Tolerables. Son aquellos que cumplen las siguientes características:

- No contendrán más de un veinticinco por ciento (25 %) en peso de piedras cuyo tamaño exceda de quince centímetros (15 *cm*).
- Su límite líquido será inferior a cuarenta ($LL < 40$) o simultáneamente: límite líquido menor de sesenta y cinco ($LL < 65$) e índice de plasticidad mayor de seis décimas de límite líquido menos nueve [$IP > (0,6LL - 9)$].
- La densidad máxima correspondiente al ensayo Proctor normal no será inferior a un kilogramo cuatrocientos cincuenta gramos por decímetro cúbico ($1,450 \text{ kg/dm}^3$).

- El índice CBR será superior a tres (3).
- El contenido de materia orgánica será inferior al dos por ciento (2 %).

Suelos Inadecuados. Son aquellos que no cumplen las condiciones mínimas exigidas a los suelos tolerables.

Zahorra Artificial. Es una mezcla de áridos, total o parcialmente machacados, en la cual la granulometría del conjunto de los elementos que la componen es de tipo continuo.

Zahorra Natural. Zahorra de granulometría continua, pueden tener cierta plasticidad, equivalente de arena superior a veinticinco (> 25) y el coeficiente de desgaste inferior a cuarenta (< 40).

3.1.2. Selección de los Acopios

Una de las labores previas a la realización de la campaña de investigación de laboratorio, ha sido la selección y elección de las zonas de acopios.

En este sentido, se buscaban áreas que por sus características geológicas presentasen depósitos sedimentarios homogéneos y, que por sus características geotécnicas bien diferenciadas y ampliamente conocidas fuesen verdaderamente representativos.

A pesar de que la presente tesis doctoral no pretende realizar una caracterización geológico-geotécnica de los depósitos terciarios de la Cuenca de Madrid por no ser uno de los fines perseguidos; si se cree conveniente definir previamente, en este sentido, la situación geográfica, geológica y geotécnica los depósitos elegidos para la obtención de las muestras de laboratorio requeridas para la presente tesis doctoral.

3.1.3. Encuadre geológico y geotécnico general de las zonas de acopios

Desde el punto de vista geográfico, las zonas de elección de los acopios se encuentran en el borde Septentrional de la Cuenca del Tajo, en donde, sobre un zócalo granítico muy profundo, se deposita una cobertera sedimentaria que corresponde al relleno de una cuenca intramontañosa de carácter endorreico, clima árido y edad micénica. El relleno de dicha cuenca se produjo a partir de la erosión de los relieves montañosos que la delimitaban, y posterior deposición según modelo de cuenca endorreica de clima árido a través de sistemas de abanicos aluviales coalescentes. El resultado final es una distribución de depósitos en función de su tamaño granulométrico.

De esta forma, los materiales de mayor granulometría se depositan en zonas cercanas al borde de cuenca, que al ser de naturaleza granítica, darán lugar a depósitos arenosos de composición cuarzo-feldespática y naturaleza arcósica, reconocidos en la literatura geológico-geotécnica del Alfoz de Madrid con el término de arena de miga. Desde el punto de vista sedimentario, corresponden siempre a materiales detríticos que han sufrido un transporte. El agente de transporte ha sido el agua, actuando por medio de sistemas de abanicos aluviales que descendían de la sierra.

El proceso de deposición de estos materiales han dando lugar a una zonificación (proximal, media y distal), en función de la energía del medio y del tamaño de partícula. Esta dinámica dio lugar a cuerpos sedimentarios originados por la acumulación de materiales de morfología conoidal preferentemente ligados a aquellas zonas en las que existe una ruptura general de pendiente.

Este factor no sólo condiciona el desarrollo, dirección y sentido, sino que también tendrá una influencia en la energía con la que actúan los distin-

tos procesos sedimentarios, posibilitando una buena selección del material terrígeno en forma de ordenación del sedimento, granulometrías relativamente homogéneas y una permeabilidad que oscila entre $4,5 \times 10^{-3}$ (m/s) y mínima de $6,8 \times 10^{-9}$ (m/s) y una media de $1,94 \times 10^{-4}$ (m/s) (Según JM Rodríguez Ortiz), y un peso específico seco del orden de 18,0 a 18,7 KN/m^3 , con una humedad natural que fluctúa en el intervalo de 11,7 al 14,6 %.

Mientras que aquellos detritos de menor tamaño serán transportados por el agua a mayor distancia, donde lógicamente, también serán distribuidos de forma selectiva en función del tamaño del grano y energía del medio. Por último la zona del pie de los abanicos aluviales, corresponde a aquellas áreas más alejadas de los relieves serranos, que muestran alguna influencia de los mecanismos de transporte y sedimentación característicos de este sistema. Desde el punto de vista topográfico, se define porque su relieve se ha difuminado drásticamente con una pendiente suave y muy prolongada.

En segundo lugar, y desde el punto de vista hidráulico, se caracteriza de forma mayoritaria por un flujo no confinado, tranquilo y de bajo poder energético. Estos condicionantes marcarán un transporte y posterior sedimentación de aquellos materiales de granulometrías más finas (**limos y arcillas**), permitiendo una magnífica selección granulométrica de los depósitos existentes.

Desde el punto de vista visual, se corresponden a *arcillas*, *arcillas limosas* y *limos*: conformado principalmente por arcillas de alta plasticidad con contenidos variables en limos y bajos contenidos en arenas (Caracterizadas por un porcentaje en peso del material que pasa por el tamiz N° 0,080 UNE mayor del 90 % en peso). Presentan en conjunto una tonalidad verdosa a pardo-verdosa de forma masiva o con una fina laminación milimétrica y paralela, debida esta, a pequeñas variaciones granulométricas o a la presencia de pequeñísimos nivelillos ricos en Materia Orgánica.

Se trata de materiales poco densos, por los resultados obtenidos podemos establecer un rango de valores que oscila entre 7,6 a 16,8 gr/cm^3 , pudiendo adoptar como valor medio el de 1,24 gr/cm^3 . Esta dispersión de valores, son debidas a variaciones mineralógicas existentes en esta Unidad (Tabla **3-1**). Es también observable como los valores más bajos coinciden con muestras que presentan elevados contenidos en humedad natural (en torno al 58%) y un elevado límite líquido; condiciones que delatan una composición mineralógica predominantemente sepiolítica.

Máximo	1,68
Medio	1,24
Mínimo	0,76
Desviación Estándar	0,19

Tabla 3-1.: Valores característicos de densidad seca (g/cm^3) en la arcillas del sur de Madrid (Pau de Vallecas)

La humedad natural constituye uno de los de los parámetros más importantes en estas arcillas y arcillas limosas, al influir decisivamente en los procesos de expansividad y de retracción, teniendo también influencia en la resistencia a compresión simple de esta Unidad. La humedad natural de todas las numerosas muestras analizadas y recopiladas, tienen valores que oscilan entre el 18,4 a 70,5, pudiendo adoptar como valor medio 34,1%. La permeabilidad de esto depósitos oscila 10^{-8} a 10^{-9} m/s .

En el centro de la cuenca, el medio carece ya de energía y el agua se estanca anegando grandes zonas, dando lugar a un medio lacustre en el que impera una precipitación química conformada por rocas evaporíticas como el yeso y otras

3.1 Materiales Granulares Preparados en Laboratorio

sales. Un esquema representativo de los distintos ambientes deposicionales se refleja en la Figura 3-1.

Figura 3-1.: Ambientes de posicionales durante el terciario en la Cuenca de Madrid

3.1.4. Tipo de muestras y localización

Se han obtenido los siguientes tipos de muestras necesarios para ser sometidos a la investigación:

Muestra Patrón Zahorra. Bajo esta denominación se incluye una zahorra artificial, obtenida por machaqueo. La muestra patrón de zahorra utilizada ha sido seleccionada de los materiales utilizados para la posterior puesta en obra y consiguiente análisis de medidas en campo. La zahorra fue trasladada desde

la cantera Francisco Gómez en Santiago de Compostela (ubicación del tramo de ensayo) hasta el laboratorio donde se llevaron a cabo los ensayos descritos en el presente capítulo. La naturaleza de la roca corresponde a una anfibolita.

Acopio 1: arenas. Primer tipo de muestras que se corresponden con arenas medias a gruesas y *algo a bastante* arcillosas, pertenecientes a depósitos terciarios situados al norte de la ciudad de Madrid; concretamente en el Término Municipal de Tres Cantos. Por su situación geográfica, y desde el punto de vista geológico, es previsible encontrar la presencia de depósitos detríticos granulares, que en la zona de estudio están conformados por arenas con contenidos variables en finos (limos y arcillas), depositadas en el periodo geológico Mioceno de la era Terciaria. A los depósitos terciarios predominantemente arenosos se les reconoce en el Alfoz de Madrid con el término de *arena de miga*.

Acopio 2: arcillas. Segundo tipo de muestras que se corresponden con depósitos de granulometrías finas, pertenecientes a cúmulos terciarios situados en el sur de la ciudad de Madrid. Por su situación geográfica, y desde el punto de vista geológico, es previsible encontrar la presencia de depósitos detríticos granulares muy finos, que en la zona de estudio están conformados por arcillas y arcillas limosas depositadas en el periodo geológico Mioceno de la era Terciaria. A los depósitos terciarios predominantemente arcillosos se les reconoce en el Alfoz de Madrid con el término de *peñuela*.

Una representación geográfica de los diferentes emplazamientos donde se han tomado las muestras para cada acopios, se muestra en la Figura **3-2**.

Figura 3-2.: Mapa de localización geográfica de los emplazamientos de acopios en la Comunidad de Madrid

3.1.5. Obtención y preparación de muestras

Las muestras se han obtenido mediante calicatas semimanuales excavadas hasta los 2 m de profundidad. Los materiales resultantes de la excavación fueron depositados en sacos anotándose la zona de acopio y la profundidad a las que se recogieron las sucesivas muestras. Cada una de las muestras ensayadas aparecen reflejadas en el cuadro resumen de ensayos de laboratorio que se adjunta en el anejo A.

Previo a la realización del proceso de cuarteo, se procedió a la preparación de la muestra: si estaba húmeda se procedió a su secado en bandejas debajo de lámparas de infrarrojos. Una vez preparadas las muestras para cuartear, se procedió a pasar la muestra diversas veces por una cuarteadora para separar o dividir la muestra en dos partes igualmente representativas. El número de partes que hacemos de cada muestra fue función de los ensayos a realizar.

3.2. Materiales Granulares Utilizados en la Puesta en Obra

Se han estudiado los materiales granulares existentes en el pavimento instalado en el tramo de ensayo. Así, por debajo de la capa asfáltica (asphalt concrete, AC) de 25 cm de profundidad, se encuentra la siguiente estructura de capas:

- una capa granular de zahorra artificial
- una granular de zahorra natural
- una explanada semi-infinita formada por un material que puede clasificarse como *adecuado* según el PG3.

Se realizaron ensayos en laboratorios certificados sobre los materiales constituyentes de las capas granulares, siguiendo las recomendaciones del artículo 510 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras de España (PG-3), que establece los requisitos de los materiales no ligados para su uso en capas estructurales (sub-bases). Los materiales han sido ensayados de acuerdo con las normas especificadas, estando los informes técnicos resultados de tales ensayos de laboratorios certificados recogidos en el anejo E.

CAPÍTULO 4

MÉTODOS EXPERIMENTALES

4.1. Ensayos de Laboratorio

Los ensayos realizados a los suelos han sido, en primer lugar, de caracterización; con el objetivo de confirmar a qué grupo pertenecían según la clasificación de suelos del PG-3. Por lo tanto, se han ejecutado ensayos de granulometría, límites de Atterberg y Próctor Modificado. Posteriormente se han practicado ensayos del CBR a todos los materiales según la norma UNE 103502/95 variando los días de inmersión de los moldes. De cada uno de los materiales se ha tomado lectura de hinchamiento y se han penetrado después de 1, 2, 3 y 4 días sumergidos los moldes. Estos ensayos se han realizado siguiendo las normas vigentes. De igual manera, con el fin de completar la serie de ensayos que permitan caracterizar los materiales, se han realizado ensayos de hinchamiento libre y se han determinado el contenido en sulfatos solubles.

4.1.1. Análisis Granulométrico de Suelos por Tamizado según Norma UNE 103101/95

El método de ensayo consiste básicamente en lo siguiente:

Se procede a secar el material en estufa a una temperatura de 55 grados centígrados, la muestra entonces se cuartea para poder tener una muestra representativa de terreno. Seguidamente se hace pasar la muestra por cada tamiz, por medio de movimientos laterales y verticales continuos, de manera que el primer tamiz por el cual pasa la muestra es el mayor, siguiendo un orden decreciente de malla. El material que queda retenido en el tamiz se pesa y se va eliminando, de forma que en el siguiente tamiz habrá menos material. Y así sucesivamente con cada tamiz hasta completar la serie de tamices. Se utiliza una brocha de pelo suave para tamizar los finos de los tamices más pequeños con la finalidad de que no se rompan las mallas al vaciar el tamiz, pesar el material retenido y para limpiar los tamices.

4.1.2. Determinación de los Límites de Atterberg, según Normas UNE 103103/94 y UNE 103104/93

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua. Así un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. La arcilla, por ejemplo al agregarle agua, pasa gradualmente del estado sólido al estado plástico y finalmente al estado líquido.

El contenido de agua con que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro. En mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin romperse: plasticidad; la propiedad que presentan los suelos hasta cierto límite sin romperse. El método usado para medir estos límites de humedad fue ideado por Atterberg a principios de siglo a través de dos ensayos que definen los límites del estado plástico.

La cuchara de Casagrande es el instrumento utilizado para determinar el límite líquido de un terreno (ver Figura 4-1). Está compuesto de un casquete esférico de metal, fijado en el borde a un dispositivo que mediante la operación de una manivela se produce la elevación del casquete y su subsecuente caída, produciendo así un choque controlado contra una base también metálica. El terreno mezclado uniformemente con agua es colocado en la parte del casquete metálico opuesta al punto fijo y se le da forma con una plantilla que deja en el centro una ranura uniforme. A cada vuelta de la manivela se produce un golpe en el casquete, que tiende a hacer deslizar el suelo humidificado juntando los bordes de la ranura. El límite líquido se define como el contenido en agua del terreno en correspondencia del cual, el surco practicado se cierra en un tramo de 12 mm después de una secuencia de 25 golpes.

Figura 4-1.: Cuchara de Casagrande

El límite plástico se mide en laboratorio mediante un procedimiento normalizado y sencillo consistente en medir el contenido de humedad para el cual no es posible moldear un cilindro de suelo con un diámetro de 3 *mm*. Para esto, se realiza una mezcla de agua y suelo, la cual se amasa entre los dedos o entre el dedo índice y una superficie inerte (vidrio), hasta conseguir un cilindro de 3 *mm* de diámetro. Al llegar a este diámetro, se desarma el cilindro y vuelve a amasarse hasta lograr nuevamente un cilindro de 3 *mm*. Esto se realiza consecutivamente hasta que no es posible obtener el cilindro de la dimensión deseada. Con ese contenido de humedad, el suelo se vuelve quebradizo (por pérdida de humedad) o se vuelve pulverulento.

4.1.3. Ensayo de Apisonado Próctor Modificado, según Norma UNE 103501/94

Este ensayo tiene por objeto especificar la relación entre la densidad seca y la humedad para una energía de compactación por unidad de volumen de

$2,632 J/cm^3$ y definir la densidad seca máxima y su humedad correspondiente denominada óptima.

Después de desecar el material al aire o en estufa a menos de 60° , éste se desmenuza y se cuartea hasta conseguir unas porciones de unos 8 kg . Se determina la masa del molde con su base, sin el collar superior, y su volumen. Se toma una porción de suelo y se mezcla con una determinada cantidad de agua hasta que queda íntima y uniformemente distribuida. Esta operación se realiza a mano y con guantes de goma. Se llena el molde con el collar colocado, con la porción de suelo en cinco capas aproximadamente iguales, de forma que una vez compactada quede con una altura ligeramente superior a un quinto de la altura del molde. La compactación se realiza por medio de 60 golpes de la maza automática, la última capa debe quedar aproximadamente 1 cm por encima del molde. Se retira el collar y se enrasa el suelo con el borde del molde, a continuación se pesa el conjunto del molde y suelo compactado.

Se extrae el suelo del molde mediante el extractor, se parte verticalmente por el centro y se toma una cantidad representativa de masa, no menor a 100 g para determinar su humedad, mediante secado en estufa. Se repite la operación con nuevas porciones de suelo, pero añadiendo cantidades de agua distintas en cada proceso de amasado, hasta obtener los puntos necesarios para determinar la curva que relaciona la densidad seca con la humedad.

4.1.4. Índice CBR, según UNE 103502/95

El objeto de este ensayo es determinar el índice de resistencia de los suelos. Sirve para evaluar la capacidad de soporte de los suelos de explanaciones, capas bases y sub-base de los firmes.

Primero se prepara la muestra del material a ensayar, teniendo en cuenta que la muestra retenida por el tamiz 20 UNE sea superior al 90 % del peso de la

muestra. En este estudio, hemos tomado una muestra de 6 *kg* por cada molde de CBR que tiene una capacidad alrededor de los 5 *kg* dependiendo de la densidad del material.

Inicialmente, se determina la humedad natural del suelo mediante el proceso de secado en estufa (ver Figura 4-2). Una vez que conocemos la humedad natural del suelo añadimos, en caso de que sea necesaria, la cantidad de agua para que posea la humedad óptima de compactación determinada por el Próctor. Se mezclaría manualmente con ayuda de unos guantes de forma que la mezcla quede totalmente homogénea (ver Figura 4-3).

Figura 4-2.: Secado en estufa

A continuación se pesa el molde con su base, se coloca el collar y el disco espaciador y, sobre éste, un disco de papel de filtro de igual diámetro (ver Figura 4-4). Seguidamente se rellena el molde y se compacta en 5 tongadas, siguien-

Figura 4-3.: Preparación de materiales en el ensayo CBR

do el método de compactación del Próctor, pero utilizando en cada molde la energía necesaria para que la muestra quede con la humedad y densidad deseada: así, en el primer molde se aplican 15 golpes por capa, en el segundo 30 y en el tercero 60 golpes por capa (ver Figura 4-5).

Cuando ya se tiene la probeta compactada, se le quita el collar y se enrasa por medio de una espátula o cuchillo. Hay que tener en cuenta que cualquier hueco superficial se debe rellenar con material y mediante la espátula, dejándolo uniforme (ver Figura 4-6).

Se desmolda la probeta y se vuelve a montar el molde invertido, sin disco espaciador, colocando un papel de filtro entre la base y el molde. Después de esta operación y antes de colocar la placa y los anillos que imprimen la presión al terreno del molde, se pesa de nuevo (ver Figura 4-7).

Antes de realizar la inmersión, se coloca sobre la superficie invertida la placa perforada con vástago y, sobre ésta, los anillos necesarios para completar la presión equivalente a la que aguantará el suelo que estamos ensayando. Se

Figura 4-4.: Moldes utilizados en el ensayo CBR

Figura 4-5.: Compactación en el ensayo CBR

Figura 4-6.: Desmolde en el ensayo CBR

prosigue tomando la lectura para medir el hinchamiento (ver Figura 4-8), colocando para ello el trípode de medida, con sus patas en los bordes del molde, haciendo coincidir el vástago del comparador con el de la placa perforada. Se anota la lectura del contador, el día y la hora.

Se sumerge el molde en el tanque con la sobrecarga colocada, dejando libre acceso al agua por la parte inferior y superior de la muestra (ver Figura 4-9). Es necesario también conocer la humedad exacta de la muestra que se ha utilizado para llenar cada molde por lo que, de cada bandeja, se toma una muestra representativa y se seca en estufa para conocer su humedad. Transcurridas las 24 horas, se saca esa muestra representativa de la estufa y se pesa para conocer los gramos de agua que tenía al principio y, a partir de ahí, su humedad.

Al final del periodo de inmersión (4 días) se vuelve a tomar lectura del comparador para medir el hinchamiento. Se saca el molde del tanque y se tira el agua retenida en la parte superior, sin que se mueva la placa ni la sobrecarga. Se deja escurrir el molde durante 15 minutos y después se quita la sobrecarga

Figura 4-7.: Pesaje en el ensayo CBR

Figura 4-8.: Medición de hinchamiento en el ensayo CBR

Figura 4-9.: Inmersión en el ensayo CBR

y la placa perforada. Seguidamente se pesa e inmediatamente se procede al ensayo de penetración.

El ensayo de penetración se realiza de la siguiente manera: Se coloca sobre la muestra una carga anular de 2,27 *kg*. Se lleva el conjunto a la prensa y se coloca en el orificio central de la carga el pistón de penetración y, sobre éste, el anillo de sensibilidad apropiada a la resistencia que se estime de la muestra, si la carga se mide mediante anillo dinamométrico (ver Figura 4-10).

Se añade el resto de las sobrecargas. Se monta el comparador de tal modo que se pueda medir la penetración del pistón y se aplica una carga de 50 *N* para que el pistón asiente. A continuación se ponen a cero los comparadores, el anillo dinamométrico y el de control de la penetración. Se aplica la carga sobre el pistón de penetración con una velocidad de penetración uniforme de 1,27 *mm* por minuto. Se anotan las lecturas del comparador de penetración. Finalmente, se desmolda y se toma de la parte superior una muestra (zona próxima donde se hizo la penetración) para determinar la humedad.

Para calcular el índice de CBR se dibuja la curva que relaciona las lecturas que miden las cargas (ordenadas) y las penetraciones (abscisas) y se observa si existe algún punto de inflexión. Si no existe ningún punto de inflexión se toman los valores de penetración de 2,54 y 5,08 *mm* (0,1 y 0,2 pulgadas respectivamente) y se multiplica esos valores por la constante de transformación (1,288 en el caso de la prensa del laboratorio de Mecánica de Suelos de la ETS de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid) con lo que obtenemos las cargas correspondientes en kilogramos. Si la curva presenta un punto de inflexión, la tangente a en ese punto corta en el eje de las abscisas en otro punto, que se tomará como nuevo origen para la determinación de las cargas correspondientes a 2,54 y 5,08 *mm*.

Figura 4-10.: Inmersión en el ensayo CBR

Finalmente se realiza una gráfica que relaciona la densidad de cada probeta con el índice CBR alcanzado por la misma. De esta forma se puede obtener el valor del CBR que se espera del material para la compactación que se supone que el suelo va a tener, es decir, la exigida en cada caso según el PG-3 que suele ser el 95 % ó 100 % de la densidad Próctor de referencia. Para poder evaluar en laboratorio los efectos de la humedad en la capacidad soporte de las capas granulares ensayadas, se han aplicado las cargas sobre el pistón de penetración a 1, 2, 3 y 4 días de inmersión de la muestra. Con esta metodología operacional, se pretende establecer la evolución de lo que denominamos CBR. Es conveniente puntualizar que el valor del CBR se obtiene después de dejar la muestra sumergida cuatro días, por lo que el último valor, el más bajo, coincidirá con el CBR del material.

4.1.5. Ensayos de Hinchamiento

La finalidad de esta tipología de ensayos, es la de determinar las variaciones volumétricas sufridas por un suelo ante variaciones de humedad. Por lo tanto avisarán de la susceptibilidad de la expansividad o aumento de volumen de una muestra de suelo.

En suelos volumétricamente inestables, el hinchamiento que experimentan al humedecerse, depende enormemente de las condiciones de compactación.

Cuanto más seco esté el suelo, mayor es la posibilidad de que se hinche o colapse, ocurrirá uno u otro según la presión externa que se aplique, sea esta inferior o superior a la presión de hinchamiento.

El fenómeno de cambio de volumen de un suelo arcilloso es resultado directo de la disponibilidad y variación de la cantidad de agua que él posea.

Para medir la expansividad de un suelo parcialmente saturado, se recurre a

ensayos realizados en el edómetro. Los más comunes son el ensayo de hinchamiento libre, que permite el hinchamiento de la muestra al ser inundada.

Ensayo de hinchamiento libre UNE 103601

Este ensayo se realiza siguiendo las especificaciones de la Norma UNE 103601. Para ello, se toma una muestra inalterada de suelo y se monta en el edómetro, se pone en cero el lector de deformación y a continuación se inunda la muestra, hasta un nivel en que el agua solamente penetre en la pastilla de suelo por la piedra porosa inferior (con esto se evita que quede aire atrapado en el interior de la muestra).

Se mide el hinchamiento final el cual se expresa en porcentaje del espesor inicial de la muestra y se designa con el nombre de hinchamiento libre.

Como no hay que aplicar presiones sobre la muestra, se puede colocar el lector de deformación, directamente sobre el pistón de carga, con lo cual habrá menos errores en la medida de deformaciones.

Existen casos en que este ensayo se realiza bajo una carga pequeña, aplicando una presión inicial de 0,07 a 0,1 kg/cm^2 .

Una vez inundada la muestra y transcurrido el tiempo necesario para que se produzca la expansión, se varía la carga, obteniendo el comportamiento carga-deformación en condiciones de inundación.

4.1.6. Contenido en Sulfatos Solubles

Para la determinación del contenido en materia orgánica se han realizado, según Norma UNE 103202-1995 y 103201-1995, los ensayos para la determinación cualitativa y cuantitativa del contenido de sulfatos solubles en suelos.

Determinación cualitativa del contenido en sulfatos solubles de un suelo UNE 103202-1995

La presente Norma tiene por objeto determinar la existencia de sulfatos solubles en suelos, para ello se crea una disolución con agua, para posteriormente, precipitar los sulfatos disueltos con una solución de cloruro bórico, mediante la siguiente reacción química:

Para ello, se han seguido las especificaciones de la citada Norma y, para cada muestra se tomaron porciones de suelos en una cantidad superior a los 2 g, y se añadió hasta 50 ml de agua destilada.

Sobre dicha suspensión se añadió, mediante goteo controlado, ácido clorhídrico concentrado hasta apreciar su reacción en papel de tornasol.

Posteriormente se calentó hasta alcanzar la ebullición y se filtró a través de un papel filtro para añadirle, finalmente, unas gotas de solución de cloruro bórico. La ausencia del típico precipitado blanco indico la ausencia de sulfatos solubles en las muestras analizadas.

4.2. Ensayos de Campo

4.2.1. Descripción Experimental

Los ensayos de campo fueron realizados en la obra Urbanización Parque Empresarial de A Sionlla - Santiago, en un tramo de 400 m situado en el Parque Empresarial de Santiago de Compostela (Figura 4-11). Se han definido 20

puntos de toma de datos (cada 40 m) colocados en paralelo entre calzadas, según el esquema mostrado en la Figura 4-12.

Figura 4-11.: Localización geográfica de la zona de ensayos

En cada uno de los puntos de medida, se han colocado 5 sensores:

- Dos sensores de temperatura: uno de ellos posicionado en la superficie y el otro en el punto central del perfil de la capa de aglomerado.
- Tres sensores de humedad: uno de ellos en la parte central del paquete de zahorras (base), el segundo a 1 m de profundidad en la sub-base, y

Figura 4-12.: Esquema de emplazamiento de los puntos de medida en el tramo de ensayo

el tercer y último sensor a 2 *m* de profundidad en la explanada (en caso de no tener suficiente profundidad para proceder a la colocación de este tercer sensor, ha quedado registrada la profundidad de su colocación).

La Figura **4-13** muestra el esquema, en alzado, del posicionamiento de los cinco sensores en cada punto de medida. Los sensores de humedad son del tipo 10HS de Decagon Devices, proporcionados por LabFerrer. Este sensor mide el contenido volumétrico de agua en una muestra de suelo hasta un volumen de 1 *l* de influencia. El sistema de toma de datos elegido fue EM50G data logger, equipo también desarrollado por Decagon Devices y proporcionado por LabFerrer. Estos laboratorios fueron los encargados de realizar las oportunas calibraciones de estos equipo, recogidas en el anejo F. Adicionalmente, el anejo G comprende además las certificaciones de diversas visitas realizadas por parte de LabFerrer para la oportuna testificacion del estado de los sensores instalados. Se incluyen asimismo en este anejo los informes de visitas realizadas, donde se recogen diversos aspectos experimentales de la puesta en servicio de los sensores, calibrado de los mismos, fotografías de puesta en obra de los equipos de medida, etc.

La estructura de capas para los ensayos en el tramo seleccionado, se muestra esquematizada en la Figura **4-13**. Teniendo en cuenta este esquema y el posicionamiento de los equipos de medición de humedad y temperatura anteriormente descrita, los sensores han sido colocados a la siguiente profundidad:

- Port 5 = 0 *cm*
- Port 4 = 12,5 *cm*
- Port 3 = 37,5 *cm*
- Port 2 = 100,0 *cm*

Figura 4-13.: Esquema de capas granulares en el tramo de ensayo

- Port 1 = 200,0 cm

Así, la denominación de los sensores se establece por *puertos*. La colocación de los sensores en el pavimento constituye una operación esencial para la obtención de resultados correctos. La probabilidad de que alguno de los equipos quede deteriorado durante la ejecución de los trabajos de construcción del tramo es alta puesto que no están pensados para soportar las altas cargas que les imprimen los equipos de compactación. Asimismo, cualquier falta de contacto entre los detectores y el suelo arrojará resultados erróneos por lo que se hizo necesario la colocación de un cierto número de sensores que garantizaran la obtención de resultados fiables, cubriendo así las probabilidades de fallo. Por otro lado, los equipos de lectura debían quedar enterrados para minimizar los posibles hurtos que se puedan producir. Todo ello da lugar a unas condiciones ambientales tales que puedan provocar un malfuncionamiento de la instrumentación.

Se colocan además dos estaciones meteorológicas próximas al tramo de ensayo, con objeto de conocer lo más exactamente posible todos los datos pluviométricos y las temperaturas ambientales. Con respecto a la situación, se distribuirán

en las inmediaciones del tramo general de 400 m, con objeto de poder tener controlado hidrológicamente todo el valle donde se asienta el tamo de ensayo (ver plano de situación en Figura 4-14). De esta forma podremos ver la influencia pluviométrica también en el tipo de drenaje establecido. Además, la alta probabilidad de sustración de estos equipos - al quedar en el campo sin control alguno - hace que sea necesario la colocación de un número tal que garantice tener resultados durante la duración del estudio.

Figura 4-14.: Plano con la localización de las estaciones meteorológicas instaladas en la proximidad al tramo de ensayo

El periodo de medida que se consideró necesario para tener una toma completa de datos con todos los estados posibles de climatología fue el correspondiente a un año hidrológico completo, 12 meses, con objeto de poder medir todos los posibles estados de humedad del suelo y paquete de firme que lógicamente ocurren a lo largo del ciclo hidrológico y que influirán en el tramo de prueba de la carretera.

4.2.2. Ensayos de Deflectometría de Impacto

La deflexión de un pavimento se define como el valor que representa la respuesta estructural ante la aplicación de una carga vertical externa. También se define como el desplazamiento vertical del paquete estructural de un pavimento ante la aplicación de una carga; generalmente, la carga es producida por el tránsito vehicular.

Cuando se aplica una carga en la superficie no solo se desplaza el punto bajo su aplicación, produciendo una deflexión máxima, sino que también se desplaza una zona alrededor del eje de aplicación de la carga, que se denomina cuenco o curva de deflexión (Figura 4-15).

El deflectómetro de impacto se fundamenta en la generación de una onda de carga en el pavimento o sobre la capa por estudiar. La onda es ocasionada por el impacto de la caída de una carga, y es transmitida al pavimento por medio de un sistema de amortiguadores elásticos apoyados sobre una placa de carga (Figura 4-15). El deflectómetro de impacto es un equipo ampliamente utilizado a nivel mundial para la evaluación del estado estructural de firmes flexibles, semirígidos y rígidos. La principal aportación de esta técnica es el análisis de la capacidad de soporte mediante el *calculo inverso* de los módulos de rigidez ó módulos elásticos de las capas de firme a partir de los cuencos de deflexión registrados.

Figura 4-15.: Esquema del ensayo de deflexión por impacto

Tanto la masa como su altura de caída y el sistema de amortiguadores elásticos, pueden ser variados, y de esta forma generar el impacto deseado en el pavimento o en la capa a evaluar. Los sensores, generalmente, se localizan a una distancia r de 0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 *cm*, medida entre el eje de carga del sistema y el sitio de ubicación de cada sensor. La deflexión d_r registrada por un sensor ubicado a una distancia r del eje de carga es debida a la deformación de la porción del pavimento que se encuentra dentro de la zona de tensión generada por el impacto. Conocida la carga, la relación de Poisson de la estructura, el diámetro del plato de carga y la deflexión, se puede calcular el valor del módulo elástico de las distintas capas de una estructura del pavimento, mediante el procedimiento conocido como *retrocálculo* o *cálculo inverso*.

CAPÍTULO 5

ENSAYOS DE LABORATORIO: CARACTERIZACIÓN DE CAPAS GRANULARES

5.1. Introducción

Con las muestras obtenidas según se describe en el capítulo anterior, se han llevado a cabo una serie de ensayos en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid. Los ensayos tienen como finalidad, la caracterización de los distintos tipos de materiales detectados en el subsuelo (ensayos de clasificación). El tipo y número de ensayos que se han efectuando se muestran en la Tabla **5-1**:

Tipo de Ensayo Realizado		Norma Aplicada	Número
Apertura de muestras inalteradas			23
Descripción de muestras			23
Preparación de muestras.			23
Ensayos de clasificación	Granulometría por tamizado	UNE 103101:1995	23
	Límites de Atterberg	UNE 103103-103104	23
	Equivalente en arena	UNE EN 933-8/2000	3
Ensayos de apisonado y rigidez	Próctor Modificado	UNE 103501/1994	10
	Índice CBR	UNE 103 502/95	10
Ensayos químicos	Contenido de sulfatos solubles en suelos	UNE 103202	23
	Contenido en materia orgánica en suelos	UNE 103204:1993	23

Tabla 5-1.: Descripción de ensayos de laboratorio realizados en las muestras

En el anejo A de esta memoria, se incluye un cuadro resumen con todos los resultados obtenidos para la caracterización de las muestras de suelos adecuados, los cuales pasamos a comentar en detalle en los epígrafes siguientes.

5.2. Ensayos de Clasificación

Para la clasificación de las diferentes muestras de suelo ensayadas, se han seguido las especificaciones de la clasificación PG-3, en el concepto de criterios de descripción y clasificación de suelos. Para la denominación de los distintos tamaños de las partículas se ha seguido la serie UNE.

5.2.1. Análisis granulométrico por tamizado

Para determinar el contenido en finos (limos y arcillas) de los materiales estudiados, se ha realizado este ensayo en 23 muestras de suelo. Los diferentes porcentajes obtenidos, expresados en porcentaje en peso, se muestran en el cuadro resumen de ensayos de laboratorio; en el que aparecen los porcentajes en peso del material que pasa por el tamiz N° 0,080 UNE. En función de los porcentajes en peso del material que pasa por el tamiz N° 0,080 UNE, se confirma que los materiales analizados están integrados por:

- la muestra patrón representada por una granulometría gruesa gruesa (gravas con algo a bastante de arena e indicios de arcillas), caracterizadas por un porcentaje en peso del material que retiene el tamiz N°2 (UNE), del 76 %, y representadas en el gráfico de la Figura 5-1 por líneas de tonalidad anaranjada.
- materiales de granulometrías medias (arenas) y caracterizadas por un porcentaje en peso del material que pasa por el tamiz N° 0,080 (UNE)

inferior al 15 % (representadas en el gráfico de la Figura 5-2 con líneas rosáceas).

- materiales de granulometrías finas (predominantemente arcillosas), y caracterizadas por un porcentaje en peso del material que pasa por el tamiz N° 0,080 UNE comprendido entre el 80 al 93 %. A este tipo de materiales se les ha representado en la Figura 5-3 por líneas de trazos marrones.

Figura 5-2.: Representación de los resultados de los análisis granulométricos de las muestras arenosas

Figura 5-3.: Representación de los resultados de los análisis granulométricos de las muestras arcillosas

obtenidas, según las Normas UNE 103103 y UNE 103104.

Este ensayo se realiza sobre la fracción de suelo inferior al tamiz 0,4 *mm* (serie UNE), determinándose su límite líquido e índice de plasticidad. Los valores obtenidos aparecen recogidos en el cuadro resumen de ensayos de laboratorio que se adjunta en el anejo A de la presente memoria. En la siguiente Tabla **5-2** se han reflejado los valores de los límites de Atterberg obtenidos en las muestras ensayadas.

La Figura **5-4** muestra la representación en la Carta de Plasticidad de Casagrande de los valores anteriores. Como se puede observar, se tratan de dos poblaciones de suelos muy diferenciadas. La primera de ellas, se caracterizan por una plasticidad baja, con valores del límite líquido inferiores a 30; que se corresponden con los suelos arenosos procedentes del acopio norte. Una segunda población, se caracteriza por una plasticidad alta, con valores del límite líquido superiores a 50 y que se corresponden con los suelos arcillosos y arcillo-limosos procedentes del acopio sur.

Por último se reflejan la representación de los Límites de Atterberg de las muestras patrón. Todas ellas resultaron no plásticas, quedando todas ellas representadas en el gráfico por un único punto en el origen de abscisas y ordenadas ($LL=0$ e $IP=0$).

De los resultados obtenidos en los ensayos de límites de Atterberg, se deduce el alto grado de uniformidad que presentan por separado cada uno de los grupos analizados (muestra patrón, muestras acopios norte y muestras de acopios sur). En los casos de los suelos analizados, estos resultados tienen su concordancia ya que según W. Lambe [32], la representación de la plasticidad en los suelos con un origen geológico común tienden a situarse en los mismos campos dentro de la Carta de Plasticidad de Casagrande.

5 ENSAYOS DE LABORATORIO: CARACTERIZACIÓN DE CAPAS GRANULARES

Muestra	Límites de Atterberg		
	LL	LP	IP
MUESTRA PATRÓN	NL	NP	-
MUESTRA PATRÓN	NL	NP	-
MUESTRA PATRÓN	NL	NP	-
ACOPIO N (M-1 ARENAS)	24	14	10
ACOPIO N (M-2 ARENAS)	27	19	8
ACOPIO N (M-3 ARENAS)	26	7	9
ACOPIO N (M-4 ARENAS)	25	17	8
ACOPIO N (M-5 ARENAS)	29	18	11
ACOPIO N (M-6 ARENAS)	NL	NP	-
ACOPIO N (M-7 ARENAS)	24	14	10
ACOPIO N (M-8 ARENAS)	25	17	8
ACOPIO N (M-9 ARENAS)	28	19	9
ACOPIO N (M-10 ARENAS)	26	19	7
ACOPIO S (M-1 ARCILLAS)	86	52	34
ACOPIO S (M-2 ARCILLAS)	50	31	19
ACOPIO S (M-3 ARCILLAS)	63	33	30
ACOPIO S (M-4 ARCILLAS)	78	41	37
ACOPIO S (M-5 ARCILLAS)	77	46	31
ACOPIO S (M-6 ARCILLAS)	98	51	47
ACOPIO S (M-7 ARCILLAS)	103	73	30
ACOPIO S (M-8 ARCILLAS)	115	80	35
ACOPIO S (M-9 ARCILLAS)	71	40	31
ACOPIO S (M-10 ARCILLAS)	61	40	21

Tabla 5-2.: Resultados de los límites de Atterberg obtenidos de las muestras ensayadas

Figura 5-4.: Representación en la carta de plasticidad de Casagrande de los valores de plasticidad de las muestras patrón así como de las muestras obtenidas en los acopios norte y sur

De forma adicional, los resultados obtenidos en los ensayos de clasificación, nos aportan una primera aproximación, en cuanto a la catalogación de los materiales según las especificaciones del PG-3 del Ministerio de Fomento en el Estado Español (Figura 5-5).

Además existen otras limitaciones referentes a la granulometría, al contenido de materia orgánica, sales solubles y contenido en yesos, que se recogen en la Tabla 5-3.

De la misma forma, es posible clasificar los materiales preparados en el laboratorio según el *Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS* (Unified Soil Classification System). Así, en la Tabla 5-4 se reflejan la clasificación y descripción de los suelos analizados, a tenor de los resultados obtenidos en los ensayos granulométricos y de los límites de Atterberg realizados.

Figura 5-5.: Catalogación, según especificaciones del PG-3, de suelos en función de la plasticidad y posición en la carta de plasticidad de Casagrande

Suelos SELECCIONADOS	Suelos ADECUADOS	Suelos TOLERABLES	Suelos MARGINALES
$T_{max} < 10cm$	$T_{max} < 10cm$	-	-
% pasa 0,40 UNE < 15 %	% pasa 2 UNE < 80 %	LL < 65	Si LL > 90 IP > 0,73(LL-20)
% pasa 2 UNE < 80 %	% Pasa 0,08 UNE < 35 %	Si LL > 40 IP > 0,73(LL-20)	-
% pasa 0,40 UNE < 65 %	LL < 40	-	-
% Pasa 0,08 UNE < 25 %	Si LL > 30 IP > 4	-	-
LL < 30 y IP < 10	-	-	-
-	-	Asiento de colapso < 1 %	Hinchamiento libre < 5 %
-	-	Hinchamiento libre < 3 %	-
Materia orgánica < 0,2 %	Materia orgánica < 1,0 %	Materia orgánica < 2,0 %	Materia orgánica < 5,0 %
Sales solubles, incluido yeso < 0,2 %,	Sales solubles, incluido yeso < 0,2 %	Contenido en yeso < 5 % Otras sales solubles < 1 %	

Tabla 5-3.: Criterios de clasificación de los materiales según especificaciones PG-3. Los suelos inadecuados se componen de materiales no clasificables en las categorías anteriores

5.2 Ensayos de Clasificación

Muestra	Clasificación U.S.C.S.	Descripción del material	Catalogación del terreno Según PG-3 (*)
MUESTRA PATRÓN (M-1 ARENAS)	GS	Zahorra artificial	Seleccionado
MUESTRA PATRÓN (M-1 ARENAS)	GS	Zahorra artificial	Seleccionado
MUESTRA PATRÓN (M-1 ARENAS)	GS	Zahorra artificial	Seleccionado
ACOPIO N (M-1 ARENAS)	SC	Arenas algo arcillosas de plasticidad media	Seleccionado
ACOPIO N (M-2 ARENAS)	SC	Arenas algo arcillosas de plasticidad media	Seleccionado
ACOPIO N (M-3 ARENAS)	SC	Arenas algo arcillosas de plasticidad media	Seleccionado
ACOPIO N (M-4 ARENAS)	SC	Arenas algo arcillosas de plasticidad baja	Seleccionado
ACOPIO N (M-5 ARENAS)	SC	Arenas algo arcillosas de plasticidad baja	Seleccionado
ACOPIO N (M-6 ARENAS)	SC	Arenas algo arcillosas de plasticidad baja	Seleccionado
ACOPIO N (M-7 ARENAS)	SC	Arenas algo arcillosas de plasticidad baja	Seleccionado
ACOPIO N (M-8 ARENAS)	SC	Arenas algo arcillosas e indicios de gravas de plasticidad baja	Seleccionado
ACOPIO N (M-9 ARENAS)	SC	Arenas con indicios de limos carentes de plasticidad	Seleccionado
ACOPIO N (M-10 ARENAS)	SC	Arenas algo arcillosas e indicios de gravas de plasticidad baja	Seleccionado
ACOPIO S (M-1 ARCILLAS)	MH	Arcillas limosas algo arenosas de plasticidad alta	Marginal
ACOPIO S (M-2 ARCILLAS)	MH	Arcillas limosas algo arenosas de plasticidad alta	Marginal
ACOPIO S (M-3 ARCILLAS)	MH	Arcillas limosas algo arenosas de plasticidad alta	Marginal
ACOPIO S (M-4 ARCILLAS)	MH	Arcillas limosas algo arenosas de plasticidad alta	Marginal
ACOPIO S (M-5 ARCILLAS)	MH	Arcillas limosas algo arenosas de plasticidad alta	Marginal
ACOPIO S (M-6 ARCILLAS)	MH	Arcillas limosas algo arenosas de plasticidad alta	Marginal
ACOPIO S (M-7 ARCILLAS)	MH	Arcillas limosas algo arenosas de plasticidad alta	Marginal
ACOPIO S (M-8 ARCILLAS)	MH	Arcillas limosas algo arenosas de plasticidad alta	Marginal
ACOPIO S (M-9 ARCILLAS)	MH	Arcillas limosas algo arenosas de plasticidad alta	Marginal
ACOPIO S (M-10 ARCILLAS)	MH	Arcillas limosas algo arenosas de plasticidad alta	Marginal

Tabla 5-4.: Correspondencia U.S.C.S y PG-3 de las muestras analizadas

5.3. Ensayos Químicos

La finalidad de los ensayos químicos es la de detectar la presencia de diferentes sustancias en el terreno, a partir de las muestras analizadas. Con este propósito se han realizado ensayos de contenido de sulfatos solubles y contenido de materia orgánica en suelos.

5.3.1. Contenido de sulfatos solubles en suelos

Con este propósito se han realizado 23 análisis cualitativos de sulfatos solubles sobre todas las muestras de suelo procedentes de los dos acopios, dando como resultado en todos los casos, la ausencia de sulfatos solubles. Los resultados obtenidos aparecen reflejados en el cuadro resumen de laboratorio que se adjunta en el anejo A.

5.3.2. Contenido materia orgánica en suelos

Con este propósito se han realizado 23 análisis para determinar la presencia y contenido en materia orgánica sobre todas las muestras de suelo procedentes de los dos acopios, dando como resultado en todos los casos, la ausencia en materia orgánica. Los resultados obtenidos aparecen reflejados en el cuadro resumen de laboratorio que se adjunta en el anejo A.

5.4. Representabilidad de las Muestras; Muestra y Cuarteo

Una vez identificadas y clasificadas cada una de las muestras, se procedió a su mezclado y cuarteo con el propósito de poder definir unas características básicas y comunes de los suelos obtenidos en cada uno de los acopios. Las

muestras resultantes se desglosan en la Tabla **5-5**; y sobre todas ellas se realizaron nuevos ensayos de clasificación, de apisonado y rigidez (Próctor y CBR), cuyos resultados se analizan en los epígrafes siguientes.

5.5. Muestras Patrón Procedentes de la Zahorra Artificial

5.5.1. Ensayos de identificación

Las muestras patrón se corresponden con zahorras de granulometrías gruesas, carentes de plasticidad y unas características de identificación (granulométricas y plásticas) bastante homogéneas, siendo sus valores medios los descritos en la Figura **5-6**.

5.5.2. Ensayos de Apisonado y Rigidez

Ensayos de compactación Próctor Modificado

Con las muestras provenientes de las labores de cuarteo de las muestras provenientes de la muestra patrón, se realizaron ensayos de Próctor Modificado. De los ensayos realizados, según Norma UNE 103500/94, los valores obtenidos para la densidad máxima y la humedad óptima aparecen reflejados en la siguiente Tabla **5-6**.

Índice CBR

El índice de resistencia de los suelos C.B.R. (California Bearing Ratio), no es un valor intrínseco del suelo, sino que depende de sus condiciones de estado, densidad y humedad, así como de la sobrecarga que se le aplique. El ensayo se

5 ENSAYOS DE LABORATORIO: CARACTERIZACIÓN DE CAPAS GRANULARES

Muestra	Clasificación U.S.C.S.	Descripción de la acción	Ensayos realizados AG, LA, PM, CBR (*)
MUESTRA PATRÓN N-1	GS	Zahorra artificial	X
MUESTRA PATRÓN	GS	Zahorra artificial	X
MUESTRA PATRÓN	GS	Zahorra artificial	X
ACOPIO N (M-1 ARENAS)	SC	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO N (M-2 ARENAS)	SC	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO N (M-3 ARENAS)	SC	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO N (M-4 ARENAS)	SC	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO N (M-5 ARENAS)	SC	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO N (M-6 ARENAS)	SC	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO N (M-7 ARENAS)	SC	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO N (M-8 ARENAS)	SC	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO N (M-9 ARENAS)	SC	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO N (M-10 ARENAS)	SC	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO S (M-1 ARCILLAS)	MH	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO S (M-2 ARCILLAS)	MH	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO S (M-3 ARCILLAS)	MH	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO S (M-4 ARCILLAS)	MH	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO S (M-5 ARCILLAS)	MH	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO S (M-6 ARCILLAS)	MH	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO S (M-7 ARCILLAS)	MH	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO S (M-8 ARCILLAS)	MH	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO S (M-9 ARCILLAS)	MH	Mezcla y cuarteo	X
ACOPIO S (M-10 ARCILLAS)	MH	Mezcla y cuarteo	X

Tabla 5-5.: Representabilidad de las muestras; muestra y cuarteo. (*) AG: Análisis Granulométrico. LA: Límites de Atterberg. PM: Proctor modificado. CRB: Índice CBR

Figura 5-6.: Análisis granulométrico de las muestras patrón (zahorra artificial)

Muestras PATRÓN	
Valores	Densidad máxima (g/cm^3)
Máximo	2,34
Medio	2,33
Mínimo	2,32
Valores	Humedad óptima (%)
Máximo	7,1
Medio	7,0
Mínimo	6,9

Tabla 5-6.: Valores característicos de la densidad máxima y humedad óptima del ensayo Próctor Modificado de las muestras patrón

ha realizado sobre muestras compactadas en el laboratorio con unas condiciones de humedad y densidad determinadas. Este ensayo se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos empleados en rellenos compactados. El valor característico obtenido para índice CBR de estas muestras aparece reflejado en la Tabla 5-7.

Índice CBR	Valor 41
------------	-------------

Tabla 5-7.: Valor de Índice CBR obtenido en las muestras patrón

5.5.3. Caracterización geotécnica de las muestras patrón

Las características geotécnicas medias de estos materiales, deducidas de los ensayos realizados sobre las muestras patrón procedentes de los sondeos, son

las incluidas en la Tabla 5-8.

Muestras PATRÓN	
% del material que retiene el tamiz $N^{\circ}5$	70
% de material que pasa por el tamiz $N^{\circ}0,080$	6
Límite líquido	NL
Índice de plasticidad	NP
Clasificación según USCS	GS
Proctor Modificado	
Densidad máxima (g/cm^3)	2,33 – 2,34
Humedad óptima (%)	6,9 – 7,2
Índice CBR	41
Contenido de sulfatos solubles	0
Contenido de materia orgánica	0
Clasificación según PG-3	Seleccionado

Tabla 5-8.: Características geotécnicas básicas de las muestras patrón (zahorra artificial)

5.6. Muestras Procedentes de la Zona de Acopio Norte

5.6.1. Ensayos de identificación

Se corresponden con suelos de granulometrías medias de naturaleza predominantemente arenosa y plasticidad baja (con valores del límite líquido por debajo de 30) con unas características de identificación (granulométricas y

plásticas) bastante homogéneas, siendo sus valores medios los descritos en en la Figura 5-7.

5.6.2. Ensayos de apisonado y rigidez

Ensayos de compactación Proctor Modificado

Con las muestras provenientes de las labores de cuarteo de las muestras provenientes de la zona norte, se realizaron ensayos de Próctor Modificado, Los ensayos realizados, según Norma UNE 103500/94, los valores obtenidos para la densidad máxima y la humedad óptima aparecen reflejados en la siguiente Tabla 5-9.

Muestras ACOPIO NORTE	
Valores	Densidad máxima (g/cm^3)
Máximo	2,01
Medio	1,90
Mínimo	1,80
Valores	Humedad óptima (%)
Máximo	12,8
Medio	12,1
Mínimo	11,8

Tabla 5-9.: Valores característicos de la densidad máxima y humedad óptima del ensayo Próctor Modificado de las muestras del acopio norte

Figura 5-7.: Análisis granulométrico de las muestras procedentes del acopio norte

Índice CBR

El índice de resistencia de los suelos C.B.R. (California Bearing Ratio), no es un valor intrínseco del suelo, sino que depende de sus condiciones de estado, densidad y humedad, así como de la sobrecarga que se le aplique. El ensayo se ha realizado sobre muestras compactadas en el laboratorio con unas condiciones de humedad y densidad determinadas. Este ensayo se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos empleados en rellenos compactados. El valor característico obtenido para índice CBR de estas muestras aparece reflejados en la Tabla 5-10.

Valores	Índice CBR
Máximo	28
Medio	26
Mínimo	25

Tabla 5-10.: Valor de Índice CBR obtenido en las muestras del acopio norte

5.6.3. Caracterización geotécnica de las muestras del acopio norte

Las características geotécnicas medias de estos materiales, deducidas de los ensayos realizados sobre las muestras patrón procedentes de los sondeos, son las incluidas en la Tabla 5-11.

Normal acopio norte	
% del material que retiene el tamiz $N^{\circ}5$	≤ 4
% de material que pasa por el tamiz $N^{\circ}0,080$	≤ 14
Límite líquido	25 – 26
Índice de plasticidad	7
Clasificación según USCS	SC
Proctor Modificado	
Densidad máxima (g/cm^3)	1,90
Humedad óptima (%)	12,1
Índice CBR	26
Clasificación según PG-3	Seleccionado

Tabla 5-11.: Características geotécnicas básicas de las muestras del acopio norte

5.7. Muestras Procedentes de la Zona de Acopio Sur

5.7.1. Ensayos de identificación

Se corresponden con suelos de granulometrías finas a muy finas de naturaleza arcillosa y arcillo-limosa y muy plásticas (con valores del límite líquido por encima de 50) con unas características de identificación (granulométricas y plásticas) bastante homogéneas, siendo sus valores medios los descritos en la Figura 5-8.

5 ENSAYOS DE LABORATORIO: CARACTERIZACIÓN DE CAPAS GRANULARES

Figura 5-8.: Análisis granulométrico de las muestras procedentes del acopio sur

5.7.2. Ensayos de Apisonado y Rigidez

Ensayos de compactación Próctor Modificado

Con las muestras provenientes de las labores de cuarteo de las muestras provenientes de la zona sur, se realizaron ensayos de Próctor Modificado. De los ensayos realizados, según Norma UNE 103500/94, los valores obtenidos para la densidad máxima y la humedad óptima aparecen reflejados en la siguiente Tabla 5-12.

Muestras ACOPIO SUR	
Valores	Densidad máxima (g/cm^3)
Máximo	1,30
Medio	1,28
Mínimo	0,97
Valores	Humedad óptima (%)
Máximo	37,8
Medio	36,4
Mínimo	35,1

Tabla 5-12.: Valores característicos de la densidad máxima y humedad óptima del ensayo Próctor Modificado de las muestras del acopio sur

Índice CBR

El índice de resistencia de los suelos C.B.R. (California Bearing Ratio), no es un valor intrínseco del suelo, sino que depende de sus condiciones de estado, densidad y humedad, así como de la sobrecarga que se le aplique. El ensayo se

ha realizado sobre muestras compactadas en el laboratorio con unas condiciones de humedad y densidad determinadas. Este ensayo se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos empleados en rellenos compactados. El valor característico obtenido para índice CBR de estas muestras aparece reflejados en la Tabla 5-13.

Valores	Índice CBR
Máximo	7
Medio	6
Mínimo	5

Tabla 5-13.: Valor de Índice CBR obtenido en las muestras del acopio sur

5.7.3. Caracterización geotécnica de las muestras del acopio sur

Las características geotécnicas medias de estos materiales, deducidas de los ensayos realizados sobre las muestras patrón procedentes de los sondeos de la zona sur, son las incluidas en la Tabla 5-14.

5.8. Creación de Suelos (Nuevos Materiales)

Siguiendo la línea de investigación marcada, el siguiente paso será la creación de nuevos suelos mediante la mezcla y cuarteo, en proporciones conocidas, de los suelos procedentes de los acopios norte, sur y muestras patrón. El propósito final será la generación de suelos catalogables, según las especificaciones del

Normal acopio sur	
% del material que retiene el tamiz $N^{\circ}5$	0
% de material que pasa por el tamiz $N^{\circ}0,080$	93 – 95
Límite líquido	74 – 81
Índice de plasticidad	26 – 28
Clasificación según USCS	MH
Proctor Modificado	
Densidad máxima (g/cm^3)	1,28
Humedad óptima (%)	36,4
Índice CBR	6
Clasificación según PG-3	Marginal

Tabla 5-14.: Características geotécnicas básicas de las muestras del acopio sur

PG-3, como suelos adecuados y suelos tolerables. Los porcentajes de mezcla de suelos han sido los reflejados en la Tabla 5-15.

Los nuevos tipos de suelos así obtenidos han sido sometidos a una campaña de ensayos de laboratorio con el objeto de comprobar que, efectivamente, cumplen con las especificaciones marcadas, para cada categoría, según las especificaciones del PG-3. La tipología y número de ensayos se resumen en la Tabla 5-16.

En el anejo A de esta memoria se incluye un cuadro resumen con todos los resultados obtenidos, los cuales pasamos a comentar en detalle en los epígrafes siguientes.

5.9. Creación de suelos adecuados

Tras el mezclado y posterior cuarteo de las muestras, según los porcentajes establecidos en la Tabla 5-15, se consiguieron tres (3) tipos de muestras pertenecientes a la categoría de suelos *adecuados*, sobre los que se realizaron nuevos

5 ENSAYOS DE LABORATORIO: CARACTERIZACIÓN DE CAPAS GRANULARES

% en peso empleado de la muestra patrón	% en peso empleado de las arenas de miga (m. seleccionado)	% en peso empleado de peñuelas (m. marginal)	Categoría del suelo resultante
15-20 % en peso del material que retiene el tamiz 10 UNE	50 al 75 % en peso del material retenido por el tamiz 2 UNE	40 al 20 % en peso del material que pasa por el tamiz 0,080 UNE 40	Suelo adecuado
0 al 5 % en peso del material que retiene el tamiz 10 UNE	50 al 60 % en peso del material retenido por el tamiz 2 UNE	30 al 40 % en peso del material que pasa por el tamiz 0,080 UNE	Suelo tolerable

Tabla 5-15.: Tabla de porcentajes en peso de la muestra patrón, suelos seleccionados y suelos marginales para la generación de nuevos suelos

Tipo de ensayo realizado		Norma aplicada	Núm.
Protocolo de descripción de muestras			9
Protocolo de preparación de muestras			9
Ensayos de clasificación	Granulometría por tamizado	UNE 103101:1995	9
	Límites de Atterberg	UNE 103103-103104	9
Ensayos mecánicos	Hinchamiento libre	-	9
Ensayos de apisonado y rigidez	Próctor Modificado	UNE 103501/1994	9
	Índice CBR	UNE 103 502/1995	9
Ensayos químicos	Contenido de sulfatos solubles en suelos	UNE 103202	9
	Contenido en materia orgánica en suelos	-	9

Tabla 5-16.: Cuadro de ensayos de laboratorio de las muestras generadas

ensayos de laboratorio. Los resultados obtenidos se describen en los siguientes epígrafes.

5.9.1. Ensayos de identificación

En la Figura 5-9 se muestra un resumen gráfico de los resultados obtenidos en la caracterización de las muestras.

5.9.2. Ensayos de Apisonado y Rigidez

Ensayos de compactación Próctor Modificado

De los ensayos realizados, según Norma UNE 103500/94, los valores obtenidos para la densidad máxima y la humedad óptima aparecen reflejados en la siguiente Tabla 5-17.

Suelo Adecuado	
Valores	Densidad máxima (g/cm^3)
Máximo	2,08
Medio	2,07
Mínimo	2,06
Valores	Humedad óptima (%)
Máximo	9,3
Medio	8,6
Mínimo	7,3

Tabla 5-17.: Valores característicos de la densidad máxima y humedad óptima del ensayo Próctor Modificado de las muestras generadas de suelos adecuados

Figura 5-9.: Análisis granulométrico de las muestras generadas de suelo adecuado

Índice CBR

El ensayo se ha realizado sobre muestras de suelo adecuado generadas y compactadas en el laboratorio con unas condiciones de humedad y densidad determinadas. Este ensayo se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos empleados en rellenos compactados. El valor característico obtenido para índice CBR de estas muestras aparece reflejados en la Tabla 5-18.

Valores	Índice CBR
Máximo	14
Medio	12
Mínimo	10

Tabla 5-18.: Valor de Índice CBR obtenido en las muestras generadas de suelo adecuado

5.9.3. Ensayos físicos

Hinchamiento libre

Se realizaron además, sobre estas muestras, ensayos de hinchamiento libre, obteniéndose los siguientes resultados mostrados en la Tabla 5-19.

5.9.4. Caracterización geotécnica de las muestras generadas de suelo adecuado

Las características geotécnicas medias de estos materiales, deducidas de los ensayos realizados, son las incluidas en la Tabla 5-20.

Valores	Hinchamiento libre (%)
Máximo	0,25
Medio	0,2
Mínimo	0,15

Tabla 5-19.: Valores característicos de hinchamiento libre obtenidos en las muestras generadas de suelo adecuado

Suelos adecuados	
% del material que retiene el tamiz $N^{\circ}5$	1 – 3
% de material que pasa por el tamiz $N^{\circ}0,080$	40 – 41
Límite líquido	48 – 53
Índice de plasticidad	12 – 20
Clasificación según USCS	SC
Proctor Modificado	
Densidad máxima (g/cm^3)	1,2
Humedad óptima (%)	36,4
Índice CBR	6
Hinchamiento libre (%)	2
Clasificación según PG-3	Adecuado

Tabla 5-20.: Características geotécnicas básicas de las muestras generadas de suelos adecuados

5.10. Creación de suelos tolerables

Al igual que en el caso anterior y, después de ser mezclado y su posterior cuarteo de las muestras, según los porcentajes establecidos en la tabla **5-15**, se consiguieron tres (3) tipos de muestras pertenecientes a esta categoría de suelos *tolerables*, , sobre los que se realizaron nuevos ensayos de laboratorio. Los resultados obtenidos se describen en los siguientes epígrafes.

5.10.1. Ensayos de identificación

Se corresponden con suelos de granulometrías medias-finas de naturaleza arenosa a areno-arcillosa y plasticidad media a alta (con valores del límite líquido de 50) con unas características de identificación (granulométricas y plásticas) bastante homogéneas, siendo sus valores medios los descritos en el siguiente gráfica, siendo sus valores medios los descritos en la Figura **5-10**.

5.10.2. Ensayos de Apisonado y Rigidez

Ensayos de compactación Próctor Modificado

De los ensayos realizados, según Norma UNE 103500/94, los valores obtenidos para la densidad máxima y la humedad óptima aparecen reflejados en la siguiente Tabla **5-21**.

Índice CBR

El ensayo se ha realizado sobre muestras de suelo tolerable generadas y compactadas en el laboratorio con unas condiciones de humedad y densidad determinadas. Este ensayo se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos

Figura 5-10.: Análisis granulométrico de las muestras generadas de suelo tolerable

Muestras PATRÓN	
Valores	Densidad máxima (g/cm^3)
Máximo	2,08
Medio	2,07
Mínimo	2,06
Valores	Humedad óptima (%)
Máximo	8,6
Medio	7,7
Mínimo	7,9

Tabla 5-21.: Valores característicos de la densidad máxima y humedad óptima del ensayo Próctor Modificado de las muestras generadas de suelos tolerables

empleados en rellenos compactados. El valor característico obtenido para índice CBR de estas muestras aparece reflejados en la Tabla **5-22**.

Valores	Índice CBR
Máximo	16
Medio	14
Mínimo	13

Tabla 5-22.: Valor de Índice CBR obtenido en las muestras generadas de suelo tolerable

5.10.3. Ensayos físicos

Hinchamiento libre

Se realizaron además, sobre estas muestras, ensayos de hinchamiento libre, obteniéndose los siguientes resultados mostrados en la Tabla 5-23.

Valores	Hinchamiento libre (%)
Máximo	2,8
Medio	1,9
Mínimo	1,7

Tabla 5-23.: Valores característicos de hinchamiento libre obtenidos en las muestras generadas de suelo tolerable

5.10.4. Caracterización geotécnica de las muestras generadas de suelo tolerable

Las características geotécnicas medias de estos materiales, deducidas de los ensayos realizados, son las incluidas en la Tabla 5-24.

5.11. Variación del Índice CBR con la Humedad de las Muestras

La interpretación de los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio nos permite relacionar el grado de humedad de los suelos con el valor de CBR, el cual, a su vez, está relacionado con su módulo de elasticidad. Se entendería

Suelos adecuados	
% del material que retiene el tamiz $N^{\circ}5$	≤ 1
% de material que pasa por el tamiz $N^{\circ}0,080$	25 – 40
Límite líquido	29 – 32
Índice de plasticidad	12 – 14
Clasificación según USCS	SC
Proctor Modificado	
Densidad máxima (g/cm^3)	2,06 – 2,08
Humedad óptima (%)	7,7 – 8,6
Índice CBR	18 – 8
Hinchamiento libre (%)	1,7 – 2,8
Clasificación según PG-3	Tolerable

Tabla 5-24.: Características geotécnicas básicas de las muestras generadas de suelos tolerables

como periodo húmedo los valores alcanzados tras 4 días de inmersión de las probetas y como periodo seco los resultados tras 1 días de inmersión. El periodo intermedio correspondería a la saturación de la probeta tras 2 ó 3 días de inmersión. El resumen de los resultados obtenidos de este análisis se refleja en las gráficas mostradas a continuación.

5.12. Conclusiones

Se ha desarrollado un procedimiento experimental para la preparación y caracterización de suelos en laboratorio. El procedimiento consiste en la generación de muestras a partir de la mezcla de varios tipos de material granular. La descripción del método es exhaustiva y permite la reproducibilidad de los resultados.

Figura 5-11.: Relación entre el índice CBR con la humedad en las muestras de zahorra

Figura 5-12.: Relación entre el índice CBR con la humedad en las muestras de suelo adecuado

Figura 5-13.: Relación entre el índice CBR con la humedad en las muestras de suelo tolerable

CAPÍTULO 6

DETERMINACIÓN DE LA INFILTRACIÓN DE LAS CAPAS GRANULARES

6.1. Aspectos Generales

Un prerequisite para llevar a cabo una adecuada metodología de diseño analítico, en cualquier disciplina científico-técnica, consiste en la adquisición de mediciones confiables a partir de investigaciones experimentales representativas. En el trabajo de investigación que nos ocupa, se han aplicado un número representativo de mediciones cuyos datos obtenidos darán lugar a la caracterización física-matemática necesaria para analizar el comportamiento en función de la humedad de los materiales granulares utilizados en la construcción de pavimentos.

En el presente capítulo, procedemos a estudiar la capacidad de infiltración de agua meteorológica en las capas granulares del pavimento, con objeto de estimar una respuesta adecuada del pavimento ante diversas condiciones climáticas que puedan inducir variaciones en el contenido de humedad de los materiales granulares.

Medir tasas diarias de variación de humedad de suelos en sistemas de balance hídrico, sería de hecho la forma más óptima para obtener empíricamente los coeficientes de corrección para estimar capacidad portante de un pavimento. Sin embargo, las dificultades de este tipo de medición no pueden ser obviadas, y las estimaciones se pueden mejorar si se logra validar modelos de simulación de variación del contenido de agua del suelo, propósito que nos ocupa en este capítulo.

En modelos de simulación basados en ecuaciones de balance, como la ecuación universal de balance hídrico, la precipitación y la infiltración son normalmente *inputs*. En el caso de materiales granulares para pavimentos, la infiltración es desconocida por la inexistencia de coeficientes de corrección adecuados; sin embargo ésta puede ser estimada mediante rectificación o calibración de la

variación anual del contenido de agua del suelo que cumpla con supuestos de validez universal.

En esta investigación se utiliza la variación de humedad de capas granulares como el “input” que permite validar la infiltración. La variación de humedad de suelo es una característica o un síntoma integrador de todo el movimiento del agua en el suelo. Su valor depende de todos los factores climatológicos, y cumple con un patrón de validez universal, como es el principio de igualdad en el mínimo contenido de humedad del suelo que expresa: *en zonas de clima templado con estaciones claramente diferenciadas o por lo menos con una estación seca-cálida y otra lluviosa, y donde la precipitación anual sea menor que la evapotranspiración potencial anual, el contenido de humedad del suelo el día “i” del mes más seco será aproximadamente igual al registrado el mismo día y mes del año siguiente.* Suponer la no validez de este principio significa admitir que una secuencia de años lluviosos producirá una humectación acumulativa de los suelos, hasta la formación de pantanos o aguazales en vastas áreas planas de las regiones lluviosas en los continentes, sin embargo ello no ocurre. Aunque las temporadas de lluvia sean extremadamente lluviosas, en la temporada de sequía siguiente los suelos llegan a estar tan secos como en la anterior.

Esta característica de la variación de humedad del suelo permite corregir iterativamente curvas de variación de humedad, hasta que éstas cumplan con el principio de igualdad en el mínimo contenido de humedad, mediante las correcciones adecuadas. Esto permite obtener la curva de infiltración legítima, es decir, aquella en que los valores simulados sean estadísticamente iguales a los registros de terreno y que cumpla con el principio antes enunciado. La proposición metodológica consiste entonces en estimar la infiltración de las capas granulares usando su comportamiento teórico determinado a partir de un

método semi-empírico.

6.1.1. Ecuación del balance hídrico

La ecuación del balance hídrico simplificada es

$$P = I + EVT + E - R \quad (6-1)$$

donde:

P es el el volumen de agua de precipitaciones,

I el volumen de agua infiltrada en el terreno,

EVT es el agua incorporada a la atmósfera por efecto combinado de la evaporación de superficies libres de agua y por transpiración de suelos y plantas. Este término incluye además el agua que se condensa durante el proceso de la precipitación y no llega al suelo.

E es la *escorrentía* o escurrimiento, que depende de la tasa de percolación del suelo.

R será el agua que existe en la cuenca, suelo o lugar que estamos considerando antes del tiempo en que consideramos este proceso hidrológico; es decir, se trata del volumen de agua previamente existente.

En el caso que nos ocupa en este estudio, la hipótesis que no podemos asumir es la de que el parámetro de capacidad de almacenamiento del suelo, R , tiene un valor prefijado; es decir, no trataremos de determinar la capacidad de almacenamiento de las distintas capas del firme. Por el contrario, este trabajo pretende determinar los parámetros previos a esa almacenamiento: la infiltración (I) o permeabilidad de la superficie a estudiar (capas de firme).

El estudio podría enfocarse de forma que se obtenga la cantidad de agua in-

filtrada a partir de la diferencia entre las entradas de agua (lluvia y riego) y las salidas por evapotranspiración. El cálculo de la evapotranspiración puede resultar sumamente complejo, teniendo en cuenta que ésta depende, además de los parámetros característicos del suelo, de la temperatura así como de la energía solar irradiada. Sin embargo, se han reportado buenas aproximaciones para el cálculo de la evapotranspiración, como la fórmulas de Turc [45], establecida empíricamente comparando las precipitaciones y escorrentía total de muchas cuencas. Así, la expresión de Turc para la evapotranspiración es:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (6-2)$$

donde:

ETR es la evapotranspiración real en mm/mes

P es la precipitación en mm/mes

L se calcula como $L = 300 + 25T + 0,05T^3$

siendo T la temperatura media mensual, en $^{\circ}C$

En este trabajo, sin embargo, enfocamos el cálculo de la infiltración en las capas del firme a partir de modelos semi-empíricos, como se detallará en secciones posteriores.

6.1.2. Conductividad hidráulica

El agua contenida en el suelo se puede mover en flujo saturado, en flujo no saturado y en forma de vapor [7]. El movimiento de agua en condiciones no saturadas también se denomina *movimiento capilar* e incluye el movimiento de ascensión desde una capa freática.

En nuestro estudio, nos centraremos en el flujo de agua líquida, el cual responde

siempre (tanto en suelos saturados como en suelos no saturados) a un gradiente de potencial hídrico. Así por ejemplo, en condiciones de saturación, el agua que por exceso no puede ser retenida en la matriz del suelo, recibe el nombre de agua gravitacional o agua de drenaje.

La conductividad hidráulica es la propiedad hidráulica más importante que afecta tanto al flujo de agua como también al transporte de solutos en el suelo [49]. Conocer la conductividad hidráulica es necesario para analizar la infiltración de lluvia en un pavimento multicapa.

La conductividad hidráulica hace referencia al factor de proporcionalidad de la ley de Darcy [14]. La ley de Darcy aplicada a un medio poroso, como es el suelo, expresada en forma diferencial y en un sistema unidimensional describe la densidad de flujo de agua o velocidad de flujo como:

$$J_w = -K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (6-3)$$

donde

J_w es la densidad de flujo de agua en $kg \ m^{-2} \ s^{-1}$.

K es la conductividad hidráulica, que es función del contenido volumétrico de agua (θ) en el suelo, en $(kg \ s \ m^{-3})$.

$\frac{\partial \psi}{\partial z}$ es el gradiente de potencial de agua en el suelo, en $(m \ s^{-2})$.

La conductividad hidráulica de un suelo depende del tamaño y distribución de los poros del suelo, y por tanto de la textura, la densidad y la microestructura. Igualmente, la presencia de grietas o canales abiertos, influye en la conductividad del agua en el suelo.

Un aspecto a destacar es el movimiento de agua en suelos muy estratificados. La presencia de un horizonte subsuperficial de textura muy gruesa (arenosa) o

un horizonte arcilloso muy compactado, afectan de forma importante al flujo de agua desde el horizonte superficial menos compactado y con una textura más fina. El efecto más claro es un retraso en el flujo de agua hacia las capas inferiores, lo que facilita el movimiento horizontal.

6.1.3. Infiltración y sortividad

La infiltración es el proceso de entrada de agua en el suelo. La infiltración depende de las condiciones de la superficie del suelo, del contenido de agua y de la *conductividad hidráulica* del suelo.

Es muy difícil hacer experimentos para observar el tiempo que requiere un suelo para infiltrar una determinada cantidad de agua, ya que depende, además del tipo de suelo, de condiciones del entorno como la pendiente o la cobertura del suelo, y del contenido inicial de agua en el suelo. De hecho, los resultados son muy distintos cuando se hacen experimentos con suelo desnudo o con un cultivo que cubre el suelo completamente.

Si la velocidad de infiltración - o flujo de entrada de agua de un suelo - es alta al inicio del proceso, ésta disminuye con el tiempo hasta alcanzar un valor casi constante en el caso de que se trate de una infiltración vertical. En la infiltración horizontal la velocidad de infiltración disminuye hasta un valor cero.

De forma resumida, los factores que influyen en los procesos de infiltración son [24]:

- Tiempo desde el inicio de la lluvia.
- Contenido inicial de agua en el suelo.
- Conductividad hidráulica saturada.

- Condiciones de la superficie.
- Profundidad del perfil del suelo y presencia de horizontes no homogéneos en cuanto a su textura.

Durante el proceso de infiltración, el perfil de contenido de agua varía con el tiempo. En general, se puede distinguir un frente de humedad que separa de forma clara la zona húmeda de la zona seca, y que recibe el nombre de zona de transmisión. La conductividad hidráulica no saturada - que depende de forma importante del contenido de agua en el suelo - es muy distinta en ambas zonas, y ello favorece que el límite entre ellas sea muy nítido. En la zona húmeda la conductividad hidráulica puede ser la de saturación.

El agua infiltra más rápidamente en suelos de textura gruesa que en suelos de textura fina (alto contenido en arcillas). Si la cantidad de agua que se va infiltrando (infiltración acumulada) se traza en una gráfica frente a la raíz cuadrada del tiempo, se obtiene una pendiente cuyo valor es la *sortividad* S del suelo. Así, la sortividad para la infiltración horizontal del agua es [38] [25]:

$$S = \frac{F}{\sqrt{t}} \text{ (ms}^{-1/2}\text{)} \quad (6-4)$$

donde F es la infiltración acumulada (m) y t es el tiempo (s) desde el inicio de la absorción. El significado físico de la sortividad es definido como la capacidad del suelo para absorber agua.

En el caso de la infiltración vertical, la infiltración acumulada F , en mm , se obtiene a partir de la relación:

$$F = St^{1/2} + At \quad (6-5)$$

Modelo de Infiltración	Autores	Notación: f es el
$f = f_c + \frac{b}{F}$	Green y Ampt., 1911 [22]	
$f = Bt^{-n}$	Kostiakov, 1932 [31]	
$f = f_c + (f_0 - f_c) \exp^{-kt}$	Horton, 1933 [28], 1940 [29]	
$f = f_c + \frac{S}{2\sqrt{t}}$	Philip, 1957 [37]	
$f = f_c + a(M - F)^n$	Holtan, 1961 [26]	

volumen de agua que entra en el suelo por unidad de superficie y por unidad de tiempo. F representa el volumen de agua infiltrada acumulada en un tiempo t por unidad de superficie. f_c es el flujo de infiltración que se alcanza para un valor de tiempo elevado; b , B , n , S , a , M y k son constantes.

Tabla 6-1.: Modelos empíricos para describir el proceso de infiltración en los suelos

donde A es un parámetro que varía entre cero (al comienzo de la infiltración) y K_s , conductividad hidráulica saturada, después de un largo periodo de infiltración [17].

6.1.4. Modelos empíricos para describir el proceso de infiltración

La Tabla 6-1 muestra diferentes modelos empíricos propuestos, por orden cronológico, para describir el proceso de infiltración. Una revisión de estas soluciones analíticas puede encontrarse en [25]. La solución numérica para la infiltración puede estudiarse en [9].

Modelo de Horton El modelo de Horton permite simular la curva de capacidad de infiltración del suelo. Se trata de un modelo de tipo empírico, basándose en conceptos simplificados que permiten expresar la capacidad de infiltración como una función del tiempo, de constantes empíricas y parámetros del suelo. La expresión de Horton de tres parámetros es la siguiente:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) \exp^{-kt} \quad (6-6)$$

donde : f es la capacidad de infiltración en el tiempo t , es decir: la máxima cantidad de agua que puede infiltrarse en el suelo por unidad de tiempo en un instante dado, (L/s)

f_0 es la capacidad de infiltración en el tiempo $t = 0$, (L/s)

f_c es la capacidad de infiltración final, (L/s)

k es un parámetro del suelo que controla el decrecimiento de la capacidad de infiltración.

Los parámetros f_0 y k dependen del contenido de agua inicial del suelo, así como también de la tasa de aplicación. Los parámetros de la ecuación se evalúan a partir de datos experimentales. En en caso de estudio, introduciremos en esta ecuación la dependencia con la humedad relativa determinada mediante los sensores de humedad.

Partiendo de la ecuación de Horton, podemos calcular la *infiltración acumulada*, es decir, el volumen de agua infiltrada en el suelo hasta un instante genérico t , por unidad de superficie, L . Calcularemos la infiltración acumulada mediante la adecuada integración de la ecuación de Horton:

$$F(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt = \int_0^t [f_c + (f_0 - f_c) \exp^{-k \cdot t}] dt \quad (6-7)$$

operando, obtenemos la infiltración acumulada:

$$F(t) = \frac{f_0 - f_c}{k} [1 - \exp^{-k \cdot t}] + f_c \cdot t \quad (6-8)$$

En la ecuación 6-8 se observa que el proceso de infiltración se debe a dos efectos. El primer término del segundo miembro de la ecuación, corresponde al volumen de infiltración inicial antes de la saturación, llamado de aquí en adelante F_{iw} , y el segundo término corresponde a pérdidas por infiltración a tasa constante, f_c . Observando las curvas de infiltración para distintos suelos, como las mostradas en la Figura 6-1, extraída de [30], cabe destacar que la capacidad de infiltración decae rápidamente hasta su valor último, por lo que F_{iw} debería satisfacerse durante la primera parte de las lluvias, si el volumen de precipitación es suficiente.

Figura 6-1.: Curvas de capacidad de infiltración para distintos suelos

6.2. Modelización Numérica de la Capacidad de Infiltración de las Capas Granulares

Para analizar la respuesta hidráulica del sistema, se ha creado un modelo de simulación numérica. Para ello se ha empleado el lenguaje científico de programación **FORTRAN**. El programa **MICP**, *Modelo de Infiltración en Capas Granulares*, ha sido realizado ex-profeso para esta tesis doctoral, estando el listado completo del código fuente recogido en el anejo D. Este software de simulación matemática, permite la posibilidad de contemplar la escorrentía urbana y los procesos de flujo. Para el caso de estudio que nos ocupa, se ha desarrollado íntegramente el módulo de cálculo específico para el proceso de infiltración basado en el modelo de Horton, según se detallará en la sección siguiente. Por otra parte, se han contrastado los resultados con los resultados experimentales de medida de humedad relativa de las distintas capas obtenidos mediante los sensores de humedad, obteniendo resultados satisfactorios.

6.2.1. Ajuste del Modelo de Horton

Para realizar el apropiado ajuste del modelo de Horton con los datos experimentales obtenidos a partir de los ensayos de campo, asimilaremos el contenido volumétrico de humedad del suelo θ como la infiltración acumulada. Teniendo que es la *humedad relativa* la medida determinada por los sensores de humedad:

$$\theta_r = \frac{\theta}{\theta_s} \tag{6-9}$$

donde θ_s la humedad en condiciones de saturación.

será posible expresar la ecuación de Horton para la infiltración acumulada de la siguiente manera:

$$\theta_r = \frac{f_0 - f_c}{k \cdot \theta_s} \left[1 - \exp^{-k \cdot t} \right] + \frac{f_c}{\theta_s} \cdot t \quad (6-10)$$

Las constantes de la ecuación de Horton para determinar la capacidad de infiltración de las capas granulares, se determinan a partir del ajuste matemático de las representaciones gráficas humedad relativa, θ_r , versus tiempo, t ; de acuerdo con la curva exponencial expresada en la ecuación anterior.

6.2.2. Conceptualización del problema

La zona de estudio se ha conceptualizado mediante una cuenca que solamente recoge las aguas de lluvia caídas en la misma, puesto que carece de cuencas adyacentes que supongan aportes externos. La escorrentía generada se inyecta en un nodo ficticio, circula por una conducción y sale finalmente del sistema para conectarse a la red de drenaje municipal. En este caso, la técnica empleada corresponde a un pavimento poroso, representado como una sucesión de capas verticales con unas determinadas propiedades, aplicado satisfactoriamente por Andrés et Al., [3]. Durante la simulación, el programa MICG realiza un balance sobre cada capa, permitiendo conocer el movimiento del agua y su almacenamiento entre éstas. En la Figura 6-2 se representan esquemáticamente los procesos y las líneas de flujo características en un pavimento poroso.

El esquema de funcionamiento de un pavimento poroso que se ha implementado en MICG, puede representarse mediante dos nudos divisores y dos unidades de almacenamiento, como se muestra en la Figura 6-3. La lluvia que cae sobre el pavimento poroso se moviliza en primer lugar hacia el *Divisor 1*, donde la

Figura 6-2.: Conceptualización de un pavimento poroso en MICG

intensidad de precipitación se compara con la tasa de percolación del pavimento poroso. Si la tasa de percolación del pavimento poroso es excedida, la lluvia filtrada por el pavimento poroso es dirigida a la *Unidad de Almacenamiento 1*, que tiene una superficie igual al área del pavimento poroso y una profundidad igual a la profundidad del almacenamiento (sub-rasante), afectada de la porosidad. Una vez agotada la capacidad de almacenamiento de la Unidad 1, el exceso de flujo se dirige al *Divisor 2*. El caudal de entrada al Divisor 2 se compara con la conductividad hidráulica saturada del suelo natural, de modo que si el caudal de entrada es igual o inferior a la tasa de infiltración hacia la explanada, se dirige a la Unidad de *Almacenamiento 2* (el suelo). Si el caudal de entrada al Divisor 2 excede la tasa de infiltración hacia la explanada, se dirigirá hacia el sistema de drenaje, y de éste a la salida del sistema.

Figura 6-3.: Esquema conceptual de flujos en un pavimento poroso implementado en MICP

6.3. Resultados y Discusión

6.3.1. Análisis de la fiabilidad de los datos

Previo al análisis científico de los datos de humedad contenida en las capas granulares del tramo de ensayo proporcionados por los sensores, se procede a revisar la bondad de los datos recogidos. Según el modelo de toma de datos propuesto, se deberían recoger un dato cada hora de los cinco puertos instalados en cada *datalogger*, es decir: un dato por hora en los sensores PORT1, PORT2, PORT3, T2 y T1 (de mayor a menor profundidad). Recordemos que se instalaron 10 datalogger en el margen derecho y otros 10 en el margen izquierdo del tramo de ensayo.

Tras una primera inspección realizada en mayo de 2012, se observa que no todos los sensores están funcionando correctamente: solo hay datos continuos de 4 datalogger de los 20 instalados. El resultado de esa primera inspección de

funcionamiento de los sensores se muestra en la Figura 6-4, donde se representan los sensores con funcionamiento óptimo frente a aquellos sensores que han mostrado un malfuncionamiento total o parcial.

Al final del periodo de ensayo, el resultado de la inspección de los datos totales se muestra en la Figura 6-5, representándose de la misma manera los sensores con funcionamiento óptimo frente a aquellos sensores que han mostrado un malfuncionamiento total o parcial. En el anejo G se muestra una relación detallada del estado de funcionamiento de cada uno de los sensores durante todo el periodo de ensayo.

Una vez seleccionados aquellas series de datos fiables proporcionadas por los sensores que han mostrado un buen funcionamiento, previo a la interpretación de los datos, se ha procedido a filtrar convenientemente los mismos con el fin de descartar aquellos datos claramente erróneos: valores de humedad relativa negativa y aquellos que se salían del rango de medida del sensor. La Figura 6-6 muestra un ejemplo del proceso de filtrado y descarte de datos.

6.3.2. Curvas de Retención de Humedad en las Capas Granulares

A cada contenido de humedad en el suelo le corresponde un valor de humedad relativa determinado. Al llevar estos valores a un sistema de ejes coordenados se obtiene una serie de puntos que al unirlos generan una curva de retención de humedad del suelo. En el eje de las ordenadas (Y) se colocan los valores de la humedad relativa, y en las abscisas (X) se coloca el parámetro temporal.

Se presentan a continuación dos series de datos recogidos para el datalogger situado en el punto 4MI.

6 DETERMINACIÓN DE LA INFILTRACIÓN DE LAS CAPAS GRANULARES

	No existen datos
X	Existen datos fiables en algún sensor
X	Existen datos fiables del datalogger en los cinco puertos
x	Datos no fiables
X	Fallo en todos los sensores de humedad
X	Sólo existe un dato puntual

	3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12
1MD							
1MI	x	x	x	x	x	x	
2MD	x	x	x	x	x	x	
2MI							
3MD	x	x					
3MI							
4MD	x	x	x	x	x	x	
4MI							
5MD							
5MI	x	x	x	x	x	X	
6MD							
6MI	x	x	x	x	x	x	
7MD							
7MI	x	x	x	x	x	x	
8MD	x	x	x	x	x	X	
8MI	x	x	x	x	x	x	x
9MD	x	x	x	x	x	x	
9MI	x	x	x	x	x	x	x
10MD	x	x	x	x			
10MI	x	x	x	x	x	x	x

Figura 6-4.: Estado de los sensores hasta mayo de 2012

6.3 Resultados y Discusión

Figura 6-5.: Estado de los sensores durante todo el periodo de ensayo

Figura 6-6.: Ejemplo del proceso de filtrado de datos

6 DETERMINACIÓN DE LA INFILTRACIÓN DE LAS CAPAS GRANULARES

Serie 1: comprende el periodo entre el *22 al 24 de septiembre*. Los datos recogidos en promedio se muestran en la tabla **6-2**. La figura**6-7** representa las curvas de retención de humedad en cada una de las capas (registradas por cada puerto respectivamente) así como las precipitaciones ocurridas en dicho periodo. Se observa que al periodo estudiado le precede un periodo seco, por lo que la retención de humedad es rápida y significativa en la tres capas.

4MI	Explanada	Zahorra Natural	Zahorra Artificial	Estación Central
Día	10HS Soil Moisture	10HS Soil Moisture	10HS Soil Moisture	ECRN-100 Precipitation
22-SEP	% VWC	% VWC	% VWC	mm Precipitación
valor	14,66	19,54	10,2	0,0

Tabla 6-2.: Datos de retención de humedad para la serie de datos 1

Figura 6-7.: Curva de retención de humedad en las distintas capas del 22 al 24 de septiembre

6.3 Resultados y Discusión

Serie 2: comprende el periodo entre del *14 al 16 de diciembre*. Los datos recogidos en promedio se muestran en la Tabla 6-3. La Figura 6-8 representa las curvas de retención de humedad en cada una de las capas (registradas por cada puerto respectivamente) así como las precipitaciones ocurridas en dicho periodo. En este periodo se producen precipitaciones de forma casi continua, no habiendo eventos de periodos secos, por lo que la retención de humedad se produce de forma progresiva hasta llegar a su valor de saturación.

4MI	Explanada	Zahorra Natural	Zahorra Artificial	Estación Central
Día	10HS Soil Moisture	10HS Soil Moisture	10HS Soil Moisture	ECRN-100 Precipitation
14-DIC	% VWC	% VWC	% VWC	mm Precipitación
valor	18,8	23,01	15,5	1,5

Tabla 6-3.: Datos de retención de humedad para la serie de datos 1

Figura 6-8.: Curva de retención de humedad en las distintas capas del 14 al 16 de diciembre

6.3.3. Determinación de la Capacidad de Infiltración de las Capas Granulares

Considerando las dos series de datos analizadas para las curvas de retención de humedad del apartado anterior, se calcula la infiltración acumulada según la ecuación de Horton modificada. A partir de dichos cálculos, se representan las curvas de infiltración acumulada que se muestran en las Figuras 6-9 y 6-10, incluyendo en dichas gráficas además la representación de las precipitaciones acaecidas en dichos periodos.

Figura 6-9.: Infiltración acumulada en las distintas capas del 22 al 23 de septiembre

Figura 6-10.: Infiltración acumulada en las distintas capas del 13 al 14 de diciembre

Entre el 22 y el 23 de septiembre, (Figura 6-10) se presentó un periodo de lluvias intensas al inicio del periodo, lo que originó como consecuencia altos contenidos de humedad disponible en el suelo. En los meses de noviembre y diciembre ocurrieron lluvias de menor cantidad pero continuas, que mantuvieron la humedad acumulada entre 16,5 y 32,7 mm, valores que corresponden a la saturación de la explanada, zona más profunda del perfil del terreno. En este caso, la infiltración estimada es menor que la observada en el periodo de septiembre, debido a que el modelo no considera condiciones de saturación del suelo, cuantificando la infiltración hasta dichas condiciones y en tales situaciones se subestima la humedad contenida.

Tal y como se describió en la sección correspondiente al ajuste de la ecuación de Horton, a partir de las curvas de infiltración acumulada se determinan las constantes de la ecuación de capacidad de infiltración para el modelo de Horton. La tabla **6-4** detalla los resultados obtenidos en dichos cálculos. La Figura **6-11** muestra los ajustes exponenciales realizados con objeto de determinar los parámetros de Horton. Una vez calculados dichos parámetros, se procede a ejecutar el programa fortran MICG, para obtener la simulación matemática de la capacidad de infiltración de las capas granulares en estudio. La Figura **6-12** muestra los resultados gráficos de las simulaciones, obtenida con el programa MICG, plotando las curvas teóricas de capacidad de infiltración para las tres capas granulares objeto de estudio.

4MI 22 SEP	f_c <i>mm</i>	f_0 <i>mm</i>	k h^{-1}
Explanada	0.36	0.1456	-0.15619
Zahorra Natural	0.3073	0.1964	-0.02152
Zahorra Artificial	0.1260	0.1020	-0.03988

Tabla 6-4.: Parámetros empíricos de la capacidad de infiltración para las capas granulares

6.4. Conclusiones

Las capacidades de infiltración obtenidas se calcularon a partir de un mismo evento de lluvia, y su diferencia radica en el comportamiento del agua en los diferentes tipos de suelo que se tiene en el tramo de ensayo.

6.4 Conclusiones

Figura 6-11.: Ajustes exponenciales de las curvas de infiltración acumulada desde 22 al 23 de septiembre

Figura 6-12.: Curvas teóricas obtenidas mediante simulación numérica con MICG para la capacidad de infiltración de las capas granulares

El procedimiento experimental utilizado para la determinación de la humedad retenida en las capas ha demostrado ser satisfactorio, si bien los datos proporcionados por los sensores de humedad no han sido tan intensivos y fiables como era de esperar. A pesar de ello, los resultados de los análisis han permitido la extrapolación de los datos para la realización de un innovador modelo semiempírico de infiltración basado en la ecuación de Horton, modelo ampliamente utilizado para la evaluación de la tasa de infiltración de agua en el suelo.

En general el modelo puede considerarse adecuado para evaluar la capacidad de infiltración de las capas granulares, por la simplicidad de las funciones utilizadas y la información de fácil consecución requerida. Por otro lado, este tipo de modelos puede resultar más fácil usarlo en conjunto con un sistema de información geográfica, para monitorizar la condición de humedad en grandes áreas. En el futuro debe considerarse la obtención de información edáfica, como conductividad hidráulica, sortividad del suelo entre otras características, que permitan generar funciones para evaluar los movimientos ascensionales del agua en los materiales granulares a causa de la capilaridad, o los descensos de humedad por efecto de la gravedad, que fueron los factores más limitativos en la precisión del modelo.

Mediante experimentación en campo durante un año hidrológico, hemos analizado la permeabilidad de las capas granulares del firme para una climatología semihúmeda. El modelo se basa en el balance diario de agua en cada capa granular. La infiltración acumulada se calcula a partir de la retención de la humedad en el suelo y siempre que el suelo haya permanecido en esas condiciones durante al menos dos días, garantizando así que el agua que alcanza cada capa corresponde al agua infiltrada.

La estimación de la tasa de infiltración ha sido verificada utilizando el modelo semiempírico de Horton, corregido según las condiciones iniciales de cada capa,

con resultados altamente satisfactorios y claramente innovadores en cuanto a la metodología de cálculo utilizada.

De las curvas de infiltración analizadas, es importante destacar

- La capa más profunda (EXPLANADA), se satura antes cuando la incidencia de lluvia es más continua. Esta capa permite poca penetrabilidad del agua, si bien es cierto que el volumen de agua que alcanza esta capa es considerablemente menor.
- La capa intermedia (SUB-BASE de Zahorra Natural), posee una tasa de infiltración lenta, llegando a su saturación en periodos de 48 *horas*, dependiendo de la humedad inicial de la capa.
- La capa más superficial (BASE de Zahorra Artificial), permite mayor penetración del agua incluso cuando la intensidad de lluvia es alta.

Comparando las curvas de la serie 1 (septiembre) con respecto a la serie 2 (diciembre), se aprecia el déficit de humedad de las capas en las medidas tomadas en septiembre, después del periodo de verano. Este hecho explica la diferencia en cuanto a la respuesta de la capacidad de almacenamiento de una misma capa en septiembre con respecto a diciembre.

Asimismo, cabe destacar que la dispersión de los valores experimentales fluctúa considerablemente según el periodo del año que se considere. Sin embargo, compensado los efectos puntuales a largo plazo, es posible afirmar que la metodología (diseño y método de cálculo) utilizada es correcta.

CAPÍTULO 7

INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

7.1. Antecedentes Generales

El método AASTHO-93, se basa en experiencias empíricas de la AASTHO efectuada en la década de los 50 en el estado de Illinois, Estados Unidos. De la aplicación del método se obtienen valores requeridos de espesores para distintas estructuras de pavimentos (asfálticas y granulares), con el fin de asegurar que durante un periodo de tiempo determinado, bajo una solicitud de tránsito y nivel de confiabilidad dada, el pavimento no baje de un nivel mínimo de servicio. Sin embargo, el umbral de serviciabilidad por si mismo, no considera y/o discrimina deterioros importantes debidos a factores climatológicos, en concreto el contenido de humedad en el pavimento debida a las precipitaciones. Estos factores pueden provocar deterioros serios que no solo afectan a la serviciabilidad, sino que además, afectarán a la integridad estructural de las diferentes capas que conforman el pavimento.

El objetivo de este capítulo es el estudio de una estructura de pavimento real diseñada con las características de soporte de suelos más usuales en la realidad española, la cual es sometida a variaciones de humedad y analizada mediante criterios mecanicistas, con el propósito de evaluar la influencia del contenido de humedad en la capacidad estructural de las capas granulares de un pavimento.

El modelo AASHTO considera que el deterioro de un pavimento con el tránsito solicitante se manifiesta como la pérdida de serviciabilidad, hasta llegar a un nivel que resulta inaceptable para el usuario. Con el fin de poder determinar el nivel con que un pavimento sirve al usuario, se desarrolló un parámetro denominado PSR, *Present Serviciability Rating*, el cual califica la calidad de una carretera a través de la opinión (subjetiva) de un panel de usuarios y conductores. La calificación se realiza empleando una escala como la mostrada en la Tabla 7-1. Así, de acuerdo a la clasificación PSR, un pavimento nuevo obtiene

PSR	Clasificación
0 – 1	Muy mala
1 – 2	Mala
2 – 3	Regular
3 – 4	Buena
4 – 5	Muy buena

Tabla 7-1.: Calificación del índice de serviciabilidad PSR

una calificación entre 4 y 5, y a medida que se deteriora va disminuyendo su calidad de servicio hasta valores que hacen necesaria su rehabilitación.

Con posterioridad, además de la evaluación subjetiva de cómo los usuarios calificaban la serviciabilidad de los pavimentos (PSR), se incorporaron mediciones físicas del comportamiento y del estado del pavimento, como indicadores que permiten cuantificar objetivamente el deterioro asociado a la pérdida de serviciabilidad que experimenta un pavimento en servicio. La evaluación cuantitativa de la serviciabilidad, se denominó PSI, *Present Serviciability Index*, y utiliza la misma escala de calificación utilizada por el índice PSR.

El índice de serviciabilidad está relacionado analíticamente con varios indicadores de deterioro del pavimento, como son la rugosidad, el área de las grietas visibles, ahuellamiento promedio, etc. No existe, sin embargo, en dicha relación ningún indicador relativo al posible contenido de humedad de las capas integrantes del pavimento, hecho que influye de manera determinante la capacidad estructural del firme y por tanto su nivel de serviciabilidad.

Debido a que el método de diseño AASHTO es un método empírico, una parte importante de las recomendaciones de diseño para su empleo, responden más bien a resultados de investigación y/o experiencias locales en los Estados Unidos, conclusiones que no son necesariamente extrapolables a otras situaciones geográficas específicas, como es el caso de España. En esta última situación,

requiere adaptar el método de diseño e incorporar recomendaciones propias a nuestra realidad.

Para la caracterización de la capacidad de soporte de los materiales granulares que enmarcan la base del pavimento, sería necesario utilizar en rigor el Módulo Resiliente obtenido según el Método de Ensayo AASHTO T-294. Otro aspecto importante del procedimiento se refiere a la definición del valor de diseño a utilizar debido a la variabilidad propia de los estratos del suelo y la variabilidad a lo largo del eje. La toma de muestras y el número de éstas, está supeditada al tipo de ensayo que se va a efectuar y a las características propias del terreno. Existen por lo tanto, diversos métodos para calcular el valor más representativo de diseño del Módulo Resiliente.

Otra alternativa de medición, es mediante la utilización del Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer), el cual produce mayor variabilidad por medición pero permite una mayor cantidad de lecturas. La deflexión permite ser correlacionada con la capacidad estructural de un pavimento, de tal forma que, en términos generales se puede hablar de que si la deflexión es alta en un modelo estructural, la capacidad estructural del modelo de pavimento es débil o deficiente, y viceversa, si la deflexión es baja, quiere decir que el modelo estructural del pavimento tiene buena capacidad estructural.

7.2. Método de Odemark-Boussinesq

Los datos obtenidos a partir de los ensayos de deflectometría realizados sobre el tramo de ensayo, han sido procesados por el programa ELMOD6, desarrollado por *Dynatest International*. El programa utiliza el método de *Odemark-Boussinesq*, MET, basado en la determinación del **espesor equivalente**, según el cual un sistema compuesto de un número finito de capas con distinto módulo elástico, es asimilado a un sistema donde las capas pasan a tener el mismo

módulo elástico. A cada capa del sistema equivalente obtenido, se le aplica entonces las ecuaciones de Boussinesq para finalmente obtener el módulo elástico de cada una de ellas. La ecuación de Boussinesq es utilizada para calcular el módulo elástico mediante *cálculo inverso*. Así por ejemplo, para un sistema compuesto de dos capas, en aproximación lineal elástica, y asumiendo que el material es homogéneo, isótropo y carente de peso, el módulo elástico de la capa inferior vendría dado por:

$$E_{inf} = \frac{0,312}{r_x \cdot D_x} \quad (7-1)$$

donde E_{inf} viene dado en kilopascales, r_x es la distancia radial, en pulgadas, desde el centro de impacto; y D_x es la superficie de deflexión, en pulgadas, a una distancia r_x .

Este método de retrocálculo fue reportado por Ullidtz en 1977 [46], y está basado en los siguientes supuestos para una estructura elástica multicapas:

- A medida que la distancia desde la carga se incrementa, la compresión de las capas superiores llega a ser menos significativa de ser medida en la superficie del pavimento.
- A medida que la distancia desde la carga se incrementa, la aproximación de una carga distribuida por un punto de carga mejora.

Analizando este método, se observa que a una distancia radial suficiente desde la carga aplicada, la deflexión medida en la superficie del pavimento está influenciada mayormente por la deflexión en la parte superior de la explanada. De esta manera, la deflexión medida depende enteramente de las propiedades elásticas de dicha capa, sin tomar en cuenta el número, espesor y propiedades elásticas de las capas superiores. La Figura **7-1** muestra esquemáticamente el

diagrama de flujo conceptual del método de cálculo inverso para la determinación de módulos elásticos de las capas a partir de la medida de deflexiones.

Figura 7-1.: Diagrama de flujo conceptual del método de cálculo inverso

7.3. Campaña Experimental de Deflectometría de Impacto

Desde febrero del 2012 hasta febrero del 2013, se realizaron 15 series de deflectometría de impacto sobre el tramo de prueba de 400 m situado en la zona de ensayo, según se describe en la sección 4.2. Los datos de los tests han sido recogidos en la Tabla 7-2. Se hicieron tests de forma paralela en ambas calzadas, según la configuración usada para la determinación de la humedad en las capas. Los valores de deflexiones obtenidos se adjuntan en el anejo C.

Ensayo	Fecha
Test 1	1 Febrero 2012
Test 2	13 Febrero 2012
Test 3	16 Febrero 2012
Test 4	29 Febrero 2012
Test 5	15 Marzo 2012
Test 6	4 Abril 2012
Test 7	26 Abril 2012
Test 8	9 Mayo 2012
Test 9	25 Mayo 2012
Test 10	28 Agosto 2012
Test 11	20 Septiembre 2012
Test 12	5 Octubre 2012
Test 13	17 Octubre 2012
Test 14	7 Noviembre 2012
Test 15	13 Febrero 2013

Tabla 7-2.: Fechas de las campañas de deflectometría de impacto realizadas en el tramo de ensayo

Una vez tomados los datos de campo, el cálculo de las deflexiones para cada capa consiste en sustraer la lectura final (punto de referencia de deflexión cero) a cada una de las otras, representando las respectivas diferencias la deformación en dichos puntos, las cuales en conjunto definen la curva de deflexión de superficie del pavimento. Según se ha expuesto, la metodología de evaluación estructural de pavimentos basada en la interpretación de deflexiones de superficie se sustenta matemáticamente en el Modelo de Boussinesq y en conceptos de la teoría de la elasticidad y resistencia de materiales.

Todas la secciones del pavimentos se consideraron como un sistema con estructura de 3 capas, siendo la más superficial una capa asfáltica (*asphalt concrete, AC*) de 25 *cm* de profundidad, seguida a continuación por una capa granular de zahorra artificial de 25 *cm* de profundidad, una capa de zahorra natural de 50 *cm* de profundidad sobre una explanada semi-infinita. La Figura 7-2 detalla la estructura del sistema de capas granulares ensayado. El deflectómetro fue midiendo aplicando la carga a la altura de los puntos donde previamente se colocaron los sensores de humedad y temperatura en ambas calzadas (*derecha* e *izquierda*) a lo largo del tramo de ensayo.

Figura 7-2.: Esquema de la estructura de capas granulares ensayada

7.4. Resultados y Discusión

7.4.1. Determinación del módulo elástico de las capas granulares mediante cálculo inverso

Se analizan los valores de los módulos elásticos de las distintas capas granulares del tramo de ensayo obtenidos por cálculo inverso a partir de los valores de los ensayos de deflectometría de impacto. La Tabla **7-3** muestra los valores promedio de los módulos elásticos obtenidos para las distintas capas constituyentes del pavimento de ensayo. Dichos valores se han trasladado a una representación gráfica donde además se incluyen las precipitaciones acaecidas durante el periodo de ensayos (Figura **7-3**) En el anejo C se adjuntan el resto de los resultados de módulos elásticos de las capas granulares obtenidos para las distintas estaciones y periodos de toma de datos durante el año de ensayos.

Fecha de Ensayo	ZAHORRA ARTIFICIAL	ZAHORRA NATURAL	EXPLANADA
	Módulo Elástico (MPa)		
01-feb-12	397,4	231,8	115,9
16-feb-12	283,4	165,3	82,7
29-feb-12	208,7	121,7	60,9
15-mar-12	307,3	179,2	89,6
04-abr-12	351,4	205,0	102,5
26-abr-12	364,0	212,3	106,2
28-ago-12	290,5	169,5	84,7
20-sep-12	320,2	186,8	93,4
05-oct-12	317,6	185,2	92,6
17-oct-12	289,2	168,7	84,4
07-nov-12	267,8	156,2	78,1
17-ene-13	267,3	155,9	78,0
13-feb-13	262,6	153,2	76,6

Tabla 7-3.: Módulos elásticos promedio de las capas granulares del tramo de ensayo obtenido por cálculo inverso

Figura 7-3.: Pluviometría y variación de los módulos elásticos de las capas granulares durante el periodo de ensayo y toma de datos

7.4.2. Variación del módulo elástico con la humedad retenida en las capas granulares

Procedemos ahora a estudiar la influencia de la humedad retenida en los materiales granulares sobre el valor del módulo resiliente o módulo elástico de las capas del pavimento. Para ello, recuperamos los datos de humedad medidos por los sensores embebidos en el pavimento a las distintas profundidades, determinando así el contenido de humedad relativa de cada capa granular del tramo de ensayo durante el día que se efectuó la campaña de deflectometría. Este análisis nos permite conocer la variabilidad de los módulos elásticos con respecto a la humedad de las capas.

Capa base: zahorra artificial

Como se muestra en la Figura 7-4, para la capa de zahorra se observa un decrecimiento lineal del valor del módulo elástico al aumentar la humedad retenida en la capa, hasta que alcanza un valor de saturación en torno a los

260 *MPa*. Los datos experimentales se han ajustado a la siguiente expresión:

$$y = -6,442x + 445,3 \quad R^2 = 0,980 \quad (7-2)$$

Figura 7-4.: Comportamiento del módulo de elasticidad de la capa de zahorra artificial en función de la humedad

Los resultados del valor del módulo elástico para la capa granular de zahorra artificial, de 240 a 380 *MPa* aproximadamente, están en perfecta consonancia con los criterios adoptados por las instrucciones 6.1-IC y 6.2-IC para la comprobación estructural de las secciones del firme [35]. Se observa que el módulo

de elasticidad disminuye al aumentar la humedad retenida por el material, de forma lineal. Este decremento del módulo de elasticidad de la capa se traduce en un aumento de las tensiones en dicha capa al introducirse agua en los intersticios del material. Con el paso del tráfico se producen sobre el suelo deformaciones que dan lugar a cambios de volumen. Si el suelo está saturado, los cambios de volumen implican expulsión de agua de los poros. El incremento de tensión intersticial es debido a la presencia de una carga sin flujo de agua.

Capa sub-base: zahorra natural

Como se muestra en la Figura 7-5, para la capa de zahorra natural se observa igualmente un decrecimiento lineal del valor del módulo elástico al aumentar la humedad retenida en la capa, hasta que alcanza un valor de saturación en torno a los 165 *MPa*. Los datos experimentales se han ajustado a la siguiente expresión:

$$y = -1,924x + 219,9 \qquad R^2 = 0,902 \qquad (7-3)$$

El comportamiento decreciente en el módulo de elasticidad que presenta esta capa es similar al mostrado por la capa de zahorra artificial: ambas capas granulares fueran compactadas en las mismas condiciones de humedad inicial, dando lugar a un aumento de tensión en el material como respuesta a un aumento de la humedad retenida en el mismo.

Capa de explanada: suelo adecuado

Como se muestra en la Figura 7-6, para la capa de explanada se observa asimismo un decrecimiento lineal del valor del módulo elástico al aumentar la

Figura 7-5.: Comportamiento del módulo de elasticidad de la capa de zahorra natural en función de la humedad

humedad retenida en la capa, hasta que alcanza un valor de saturación por debajo de los 80 *MPa*. Los datos experimentales se han ajustado a la siguiente expresión:

$$y = -1,925x + 124,9 \quad R^2 = 0,919 \quad (7-4)$$

La tendencia suavemente decreciente del módulo elástico en la capa de explanada tiene una pendiente claramente menor que en el caso de las capas superiores. Este hecho indica mayor granularidad en la textura de este material, siendo éste un comportamiento típico de suelos sin tratar.

Figura 7-6.: Comportamiento del módulo de elasticidad de la capa de explanada en función de la humedad

Discusión

Para valorar la influencia de la humedad en las capas granulares vamos a proceder a realizar un estudio de los resultados obtenidos utilizando la normativa vigente en España (6.3 IC) y el cálculo desarrollado en el presente estudio de investigación.

Existen dos factores de corrección que modifican directamente el valor de la deflexión característica. Uno de ellos es el factor de corrección por temperatura de la mezcla bituminosa. Los valores de temperatura registrados por el deflectómetro de impacto ya consideran esta corrección, por ese motivo no se aplicaría ningún coeficiente. No obstante, a título informativo se aporta el

gráfico de temperaturas registradas por las estaciones meteorológicas durante el estudio (Figura 7-7).

Figura 7-7.: Gráfico de temperaturas registradas por las estaciones meteorológicas durante el estudio

En lo que se refiere al pavimento diseñado: si se revisa el anejo de firmes del proyecto de ejecución se puede apreciar como aplicando la Norma 6.1 IC que contiene el catálogo de firmes la estructura está diseñada para soportar cargas de tráfico tipo T1, es decir, un número medio de vehículos pesados que oscila entre 800 y 2000 al día como valor medio. La sección escogida de construcción es la 221.

Teniendo en cuenta estas premisas y el análisis del comportamiento estructural de los firmes se ha realizado un estudio comparativo considerando un tráfico de 800 vehículos pesados y un crecimiento anual de un 4 %.

Los valores del módulo de elasticidad obtenidos mediante cálculo inverso con

el programa ELMOD han sido utilizados en un modelo de cálculo directo y los resultados están reflejados en el anejo C de la presente memoria.

Caso a) Rehabilitación del firme existente para el caso del tramo de prueba por el método descrito en la Norma 6.3 IC. El primer paso para aplicar la Norma se han calculado las deflexiones características como el valor medio más dos veces la desviación típica de las mismas. Posteriormente se deberían haber normalizado dichas deflexiones características aplicando dos factores multiplicadores: temperatura y humedad. Como se ha comentado anteriormente, no ha sido necesario realizar la normalización por temperatura. Sí por humedad. Para ello, se han de tener en cuenta las precipitaciones acontecidas en un periodo anterior a la toma de datos. Los datos de pluviometría fueron recogidos en la estación meteorológica de Santiago. Los datos de precipitación aplicados en el cálculo (siguiendo las instrucciones marcadas en la Norma 6.3-I.C.) quedan reflejados en el gráfico de la Figura 7-8.

En el citado gráfico se puede apreciar el coeficiente a aplicar (k_h) en función de las precipitaciones, teniendo en cuenta que la zona de estudio se corresponde con lo que designa la norma como tipo 1, y la Explanada es de tipo A1 (Suelo seleccionado, buenas condiciones de drenaje).

Aplicando en cada caso el coeficiente correspondiente k , se obtiene la deflexión de cálculo (dc) a considerar (Figura 7-9).

Aplicando lo que indica la tabla 5 de la Norma 6.3. IC (Figura 7-10) para firmes flexibles, se determinaría para cada medición, el espesor de refuerzo necesario. En ella se puede apreciar que, para el caso estudiado (T1), no se aplica refuerzo para deflexiones inferiores a 40, y se aplican refuerzos de 8 ó 10 *cm* para deflexiones de entre 40 y 60 *mm*/100, o deflexiones de entre 60 y 80 *mm*/100 respectivamente.

7 INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Figura 7-8.: Pluviometría estación meteorológica aeropuerto

Figura 7-9.: Deflexión de cálculo

DEFLEXION DE CALCULO (d_c) (10^{-2} mm)	T00	T0	T1	T2	T3	T4
0 - 40	10	ZONA DE ACTUACIÓN				
40 - 60	12	10	8	PREVENTIVA		
60 - 80	15	12	10	8		
80 - 100	18	15	12	10	5	
100 - 125		18	15	12	8	5
125 - 150			18	15	10(**)	6(**)
150 - 200				18	12(**)	8(**)
> 200	ZONA DE ESTUDIO ESPECIAL					

Figura 7-10.: Espesor(*) (cm) de recrecimiento con mezcla bituminosa para firmes flexibles y semiflexibles

Por lo tanto, el resultado de la aplicación de la Norma 6.3-I.C. es el mostrado en el la Figura 7-11.

Si continuamos con la serie de datos que aparecen y nos fijamos en los resultados que reflejan los valores medios de deflexión el 29 de Febrero de 2012 se observa como los módulos de elasticidad se han degradado puntualmente en algunos casos casi un 50 %, coincidiendo con series de lluvias en las semanas anteriores.

Lo cierto es que cuando se decide dimensionar una rehabilitación, no se toman medidas de deflexión en distintos días, sino que se consideran válidas las medidas tomadas en un momento puntual, sin tener en cuenta que el coste de las posibles obras de rehabilitación sería mucho más afinado si se pudiera contar con dos o tres series de medidas que evitasen situaciones singulares como la descrita.

Figura 7-11.: Rehabilitación estructural para el caso a)

Caso b) Rehabilitación del firme existente para el caso del tramo de prueba por el método analítico. A continuación se describe la metodología seguida para la realización del cálculo de la rehabilitación estructural por el método de cálculo directo, considerando las leyes de fatiga de los materiales. Se han utilizado como referencia las leyes de fatiga de la mezcla bituminosa publicada en la norma que corresponde a la estudiada por el CEDEX:

$$\log \epsilon_r = -2,19093 - 0,27243 \log N \quad (7-5)$$

Para la explanada se ha utilizado igualmente una de las que aparecen en la citada Norma y que corresponde con la Ley de Brown y Pell:

$$\epsilon_v = 0,0216N - 0,28 \quad (7-6)$$

Suponiendo que el firme recién construido tenía una vida útil de 20 años (periodo de diseño), se han calculado, para todas las mediciones realizadas, los espesores de refuerzo que serían necesarios para alcanzar el periodo de diseño

se muestran gráficamente en la Figura 7-12. Los cálculos realizados quedan reflejados en el Anejo C.

Figura 7-12.: Rehabilitación estructural para el caso b)

Se puede observar cómo, en el peor de los casos, las necesidades de refuerzo no superan los cuatro centímetros de refuerzo.

La comparación entre los resultados de ambas metodologías pone de manifiesto las diferencias existentes en los centímetros del refuerzo (Figura 7-13) siguiendo las instrucciones que refleja la norma 6.3. IC y el cálculo analítico. En la práctica esta situación se puede traducir en diferencias presupuestarias significativas.

Figura 7-13.: Rehabilitación estructural: Norma 6.3 IC versus Cálculo analítico propuesto

7.5. Conclusiones

Los datos de las medidas de las deflexiones tomadas con Deflectómetro de impacto, se utilizaron para obtener, por cálculo inverso, los valores de los módulos de elasticidad de las capas granulares y de la mezcla asfáltica. Los resultados obtenidos son coherentes con los valores prescritos en la normativa para el comportamiento estructural de este tipo de materiales que conforman el firme. Los incrementos de humedad en las capas granulares formadas por zavorra, inducen modificaciones en el módulo de elasticidad de dichas capas, pudiendo darse un aumento de tensión en el material debida a la presencia de agua intersticial cuando soporta las cargas del tráfico. Este es el comportamiento típico de un material granular confinado. En general el comportamiento observado, dentro de unos márgenes comprendidos entre 8 % y 30 % de humedad, se corresponde con decrementos de los módulos resilientes a medida que aumenta la humedad de estas capas.

La metodología empleada permite calcular el módulo elástico de las capas granulares a partir de la información del cuenco de deflexiones obtenido con deflectómetro de impacto. La relación entre el módulo elástico y la humedad retenida define un factor de ajuste, el cual permite estimar con mayor precisión la capacidad portante del firme.

Las investigaciones realizadas en este estudio, confirman la influencia de la humedad sobre el módulo elástico de las capas granulares. En el caso de las capas de zahorra, se observa un decremento progresivo del módulo elástico cuando la humedad retenida en el material aumenta, hasta llegar a un valor de saturación. En consonancia con los resultados reportados por Londoño [34], la evolución del comportamiento puede ser debida a que los materiales se hayan compactado con un contenido de humedad superior al nivel óptimo correspondiente al Proctor modificado, reduciendo la expansión potencial del material.

Como resumen de un estudio de la rehabilitación necesaria para el firme ensayado durante un año en diferentes condiciones de humedad de las capas granulares se puede concluir indicando que los valores de cálculo obtenidos siguiendo la norma 6.3. IC recomiendan, en términos generales, mayores espesores de refuerzo que en el caso de un cálculo analítico utilizando los módulos de elasticidad determinados por cálculo inverso y aplicando las leyes de fatiga de los materiales que componen las capas del firme.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

8.1. Conclusiones

Del trabajo realizado para esta tesis doctoral, se han obtenido contribuciones al conocimiento y estado del arte sobre la caracterización el comportamiento de las capas granulares de los firmes de carreteras. En concreto, se extraen las siguientes conclusiones en base al estudio científico-técnico llevado a cabo:

- Se ha desarrollado un procedimiento experimental para la generación de distintos tipos de suelos en laboratorio a partir de otro tipo de muestras de material granular. La descripción del método es exhaustiva y permite la reproducibilidad de los resultados obtenidos. Para la comprobación de dicha hipótesis se ha partido de tres materiales de origen conocido: una zahorra artificial, una arena de miga y una arcilla para obtener, a partir de las mismas, un suelo adecuado y uno tolerable según las especificaciones del PG3.
- El procedimiento empírico utilizado para la determinación de la humedad retenida en las capas ha demostrado ser satisfactorio, si bien los datos proporcionados por los sensores de humedad no han sido tan intensivos y fiables como hubiera sido deseable. A pesar de ello, los resultados de los análisis han permitido la extrapolación de los datos para la realización de un innovador modelo semi-empírico de infiltración basado en la ecuación de Horton, modelo ampliamente utilizado para la evaluación de la tasa de infiltración de agua en suelos. La aplicación de este modelo a cada una de las capas del pavimento permitirá una extrapolación bastante fiable de los valores de humedad de las distintas capas que componen un firme, conocidas las precipitaciones de la estación meteorológica más próxima, los espesores de las capas y el tipo de material que la componen.
- La utilización de sensores de humedad en capas de carreteras cuyo di-

seño ha estado pensado para suelos agrícolas puede haber sido un factor determinante para la rotura, pérdida de señal o la falta de fiabilidad en las medidas que se han obtenido de la mayor parte de los sensores.

- Tomando como punto de partida el método CBR para la obtención de la capacidad portante de un suelo, se ha desarrollado una modificación de dicho método consistente en la valoración del parámetro que se obtiene siguiendo la misma metodología y determinando dicho valor obtenido como resultado de la inmersión de la muestra a 1, 2, 3 y 4 días. Para cada uno de los casos se ha estudiado la relación existente entre la humedad y el pseudo-CBR obtenido. Los resultados han podido ser ajustados mediante regresión lineal con un alto coeficiente de correlación. De estos pasos se concluye afirmando que existe una relación directa de la capacidad portante con la humedad que contiene una capa granular compactada.
- Los datos de las medidas de las deflexiones FWD se utilizaron para obtener, por calculo inverso, los valores de los módulos de elasticidad de las capas granulares. Los resultados obtenidos son coherentes con los valores prescritos en la normativa para el comportamiento estructural de este tipo de materiales que conforman el pavimento. Se ha observado que incrementos de humedad en las capas granulares formadas por zahorras y suelo seleccionado, inducen decrementos en el módulo de elasticidad de dichas capas, por encima de un valor considerado como humedad óptima que dé lugar a la densidad máxima.
- La aplicación de coeficientes escalonados para corregir los valores de las deflexiones, como propone la Norma 6.3. IC, puede ser muy penalizadora en algunos casos. De la investigación realizada se deduce la conveniencia de aplicar, como mínimo, coeficientes lineales. Profundizando más en los fundamentos del trabajo realizado se concluye igualmente que los

valores de humedad afectan a todas las capas granulares y no solo a la explanada. De hecho las capas superiores son las que sufren, en primera instancia, las consecuencias de la pérdida de cohesión como consecuencia de la presencia de agua de infiltración. Cada tipo de suelo modifica sus características mecánicas de un modo distinto en función del grado de humedad que contiene.

- Para poder establecer, con mayor precisión, un valor de la respuesta mecánica del conjunto de las capas que componen un pavimento sería conveniente:
 1. Conocer las lluvias acontecidas durante un periodo anterior a las medidas y deducir las condiciones de humedad de cada una de las capas que componen el mismo.
 2. Determinar los módulos de elasticidad de cada una de las capas a través de la medida de las deflexiones aplicando cálculo inverso.
 3. Normalizar los módulos de elasticidad de las capas conocido el valor de humedad a una humedad estándar (Ver Figuras **8-1** y **8-2**). Igualmente, aunque no ha sido objeto de estudio en la presente tesis, sería necesario corregir el módulo de elasticidad de las mezclas bituminosas en función de la temperatura. En este caso debe indicarse que esta normalización por temperatura de mezclas asfálticas ha sido profusamente estudiada.
 4. Introducir estos valores en un modelo de cálculo directo para obtener los estados de tensión y deformación de cada una de las capas. El paso final consistirá en introducir los resultados en los modelos de fatiga ampliamente estudiados. Conociendo el tráfico que va a soportar el pavimento estudiado podrá deducirse la vida útil que le resta al mismo y, por tanto, dimensionar el refuerzo que corres-

Figura 8-1.: Evolución del CBR y módulo elástico con la humedad contenida en zahorras artificiales

ponda. El método propuesto su pone un mayor número de cálculos de más o menos complejidad cuestión que no debe preocuparnos ya que se emplearán programas informáticos que rápidamente devolverán los resultados que corresponda. Este método aproxima los resultados al comportamiento real y, por tanto, permitirá optimizar las inversiones en la conservación de las carreteras.

- Resulta necesario acotar los rangos en los que pueden utilizarse estos ajustes de módulos en función de la humedad. Las ecuaciones, en algunos casos, pueden necesitar de un mayor número de ensayos de laboratorio o incluso pueden estar limitadas por unos umbrales. En el caso del suelo tolerable el rango de valores de humedad que se ha obtenido en laboratorio limita la validez del modelo (Ver Figura 8-3). No ha sido posible contrastar los resultados con un caso real. Para los casos reales el rango

Figura 8-2.: Evolución del CBR y módulo elástico con la humedad contenida en suelos adecuados

de datos permite extrapolar resultados de módulo desde el 8 % al 32 % de humedad en los tres materiales ensayados. Para el caso de laboratorio no se podrán extrapolar resultados de manera directa, no tiene aplicación en la zahorra y en el suelo adecuado para valores superiores al 12 %. En el caso de suelo tolerable el rango es mucho más bajo entre 4 % y 8 % aproximadamente.

Figura 8-3.: Evolución del CBR obtenido en laboratorio para suelos tolerables

- El estudio del comportamiento de las capas granulares condiciona de un modo muy significativo la vida útil estructural de una carretera. Todos los datos que aparecen en este trabajo ayudan a mejorar el diseño y el cálculo de una rehabilitación en términos generales, no obstante, resulta evidente que todas las hipótesis se basan en un comportamiento homogéneo e

isótropo. Como es sabido, la presencia de fisuras en la superficie de los pavimentos acelerará el proceso de infiltración del agua de lluvia a las capas inferiores y, por tanto, el proceso de degradación del firme.

- Todas las consideraciones anteriores pueden tenerse en cuenta para una futura revisión de la Norma 6.3. IC de rehabilitación de firmes.

8.2. Futuras Líneas de Investigación

El trabajo desarrollado abre varias líneas de seguimiento e investigación futuras. Seguidamente se relacionan algunas que se han considerado:

- Ampliación del método para la conformación de distintos tipos de suelos tomando como punto de partida un conjunto de materiales granulares con distintas propiedades. Se han conformado suelos adecuados y tolerables a partir de una zahorra artificial, una arena de miga y una arcilla. Pueden conformarse otro tipo de suelos contenido en el PG3 que sirvan como ampliación del presente estudio.
- Profundizar en el diseño de sensores de humedad que respondan a las condiciones de servicio que van a sufrir en la construcción de las carreteras y durante su vida útil. Igualmente sería muy conveniente trabajar en la metodología de puesta en obra, para que puedan ser incorporados durante la generación de los suelos, en las plantas de clasificación o en obra, otro tipo de sensores que puedan transmitir, de manera remota, información correspondiente a las humedades. En este sentido indicar que ya existen sensores similares para otro tipo de aplicaciones.
- Estudiar la degradación estructural que sufren los materiales granulares en zonas con distinto grado de fisuración superficial y, por tanto, como varía la infiltración en función de ésta.

- Continuar con el conocimiento experimental en tramos reales de carretera de nueva construcción, en zonas donde se ejecuten rehabilitaciones mayores y ampliar el conocimiento a los pavimentos rígidos

ANEJO A

Resultados de los Ensayos de Laboratorio

El presente anejo es un compendio de los resultados de los análisis ejecutados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid, realizados sobre los materiales preparados para su caracterización geotécnica. La preparación de las muestras de suelo ha sido realizada en el Laboratorio de Mecánica de Suelos perteneciente al Ministerio de Medio Ambiente situado en la Av. de Portugal en Madrid.

CUADRO RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO ACOPIOS NORTE													
SITUACIÓN		ACOPIOS NORTE EN TRES CANTOS, MADRID											
TIPO DE PROSPECCIÓN		CALCITAS SEMI-MANUALES											
ACOPIO		ACOPIO 1	ACOPIO 2	ACOPIO 3	ACOPIO 4	ACOPIO 5	ACOPIO 6	ACOPIO 7	ACOPIO 8	ACOPIO 9	ACOPIO 10		
TIPO DE MUESTRA	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	SPT	TP	SPT	SPT	TP	SPT			
PROFUNDIDAD	2,80-3,25	5,80-6,25	12,10-12,55	15,00-15,45	3,05-3,50	6,60-6,85	12,10-12,55	5,55-6,00	9,70-10,05	11,55-12,00			
LITOLOGÍA	AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM		
PESO ESP. SECO (KN/m³)							19,10			20,40			
HUMEDAD NATURAL (%)							11,00			9,20			
GRANULOMETRÍA (%)													
Pasa tamiz 100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
Pasa tamiz 20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
Pasa tamiz 5	100,00	98,30	96,50	97,90	99,00	97,00	93,60	96,80	95,00	100,00	100,00		
Pasa tamiz 2	86,90	82,90	78,50	78,40	85,60	76,00	69,40	81,60	77,00	89,40	89,40		
Pasa tamiz 0,4	42,10	28,50	24,00	30,10	41,00	29,00	22,60	30,60	29,00	31,70	31,70		
Pasa tamiz 0,08	15,60	11,70	9,60	14,60	19,20	13,10	10,20	15,30	17,00	11,20	11,20		
LIMITES DE ATTERBERG													
Límite Líquido	24	27	26	25	29	27	24	25	28	26	26		
Límite plástico	14	19	7	17	18	17	14	17	19	19	19		
Índice de plasticidad	10	8	9	8	11	10	10	8	9	7	7		
CLASIFICACIÓN U.S.C.S.	SC	SC	SC	SC	SC	CS	SC	SC	SC	SC	SC		
COMPRESIÓN SIMPLE (Kpa)													
CLASIFICACIÓN PG-3	SELECCIONADO												
SULFATOS, MUESTRA DE SUELO (mg/kg)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
CONTENIDO EN MATERIA ORGÁNICA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		

CUADRO RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO ACOPIOS NORTE												
SITUACIÓN	ACOPIOS NORTE EN TRES CANTOS, MADRID											
TIPO DE PROSPECCIÓN	CALICATAS SEMI-MANUALES											
MEZCLA DE ACOPIOS	ACOPIO 1	ACOPIO 2	ACOPIO 3	ACOPIO 4	ACOPIO 5	ACOPIO 6	ACOPIO 7	ACOPIO 8	ACOPIO 9	ACOPIO 10		
MEZCLA DE ACOPIOS Y CUARTEO	MEZCLA ARENAS 1			MEZCLA ARENAS 2			MEZCLA ARENAS 3					
TIPO DE MUESTRAS	M.A. SACOS			M.A. SACOS			M.A. SACOS					
LITOLOGÍA.	ARENAS DE MIGA											
PESO ESP. SECO (KN/m³)												
HUMEDAD NATURAL (%)												
GRANULOMETRÍA (%)												
Pasa tamiz 100	100,00			100,00			100,00					
Pasa tamiz 20	100,00			100,00			100,00					
Pasa tamiz 5	98,30			96,90			97,30					
Pasa tamiz 2	82,80			77,30			82,70					
Pasa tamiz 0,4	31,60			30,70			30,40					
Pasa tamiz 0,08	12,30			14,30			14,50					
LIMITES DE ATTERBERG												
Límite Líquido	25			26			26					
Límite plástico	13			16			18					
Índice de plasticidad	12			10			8					
CLASIFICACIÓN U.S.C.S.	SC			SC			SC					
COMPRESIÓN SIMPLE (Kpa)												
Deformación (%)												
CLASIFICACIÓN SEGÚN PG-3	SELECCIONADO			SELECCIONADO			SELECCIONADO					
SULFATOS, MUESTRA DE SUELO (mg/Kg)	0,00			0,00			0,00					
CONTENIDO EN MATERIA ORGÁNICA	0,00			0,00			0,00

CUADRO RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO ACOPIOS SUR												
SITUACION	ACOPIOS SUR EN ENSANCHE DE VALLECAS. MADRID											
TIPO DE PROSPECCION	CALCATAS SEMI-MANUALES											
ACOPIO	ACOPIO 1	ACOPIO 2	ACOPIO 3	ACOPIO 4	ACOPIO 5	ACOPIO 6	ACOPIO 7	ACOPIO 8	ACOPIO 9	ACOPIO 10		
TIPO DE MUESTRA	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	SPT	TP	SPT	SPT	TP	SPT		
LITOLOGIA	PÑ	PÑ	PÑ	PÑ	PÑ	PÑ	PÑ	PÑ	PÑ	PÑ		
GRANULOMETRÍA (%)												
Pasa tamiz 100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
Pasa tamiz 20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
Pasa tamiz 5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
Pasa tamiz 2	100,00	100,00	100,00	96,40	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
Pasa tamiz 0,4	96,50	100,00	99,00	91,30	100,00	99,40	99,20	97,50	96,10	100,00		
Pasa tamiz 0,08	91,30	98,20	96,70	87,70	99,10	86,30	98,10	94,30	93,30	99,40		
LIMITES DE ATTERBERG												
Límite Líquido	81	70	72	84	71	81	74	78	80	86		
Límite plástico	57	40	40	60	44	56	45	47	55	57		
Índice de plasticidad	24	30	32	24	27	25	29	31	25	29		
CLASIFICACIÓN U.S.C.S.	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH		
CLASIFICACIÓN PG-3												
	MARGINAL											
SULFATOS, MUESTRA DE SUELO (mg/kg)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
CONTENIDO EN MATERIA ORGÁNICA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		

CUADRO RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO												
SITUACIÓN	ACOPIOS SUR EN ENSANCHE DE VALLECAS. MADRID											
TIPO DE PROSPECCIÓN	CALCATAS SEMI-MANUALES											
MEZCLA DE ACOPIOS	ACOPIO 1	ACOPIO 2	ACOPIO 3	ACOPIO 4	ACOPIO 5	ACOPIO 6	ACOPIO 7	ACOPIO 8	ACOPIO 9	ACOPIO 10		
MEZCLA DE ACOPIOS Y CUARTEO	MEZCLA PEÑUELAS 1						MEZCLA PEÑUELAS 2				MEZCLA PEÑUELAS 3	
TIPO DE MUESTRAS	M.A. SACOS						M.A. SACOS				M.A. SACOS	
LITOLOGÍA.	PEÑUELAS											
GRANULOMETRÍA (%)												
Pasa tamiz 100	100,00			100,00			100,00			100,00		
Pasa tamiz 20	100,00			100,00			100,00			100,00		
Pasa tamiz 5	100,00			100,00			100,00			100,00		
Pasa tamiz 2	100,00			99,10			100,00			100,00		
Pasa tamiz 0,4	99,20			97,50			97,90			97,90		
Pasa tamiz 0,08	95,40			92,80			95,70			95,70		
LÍMITES DE ATTERBERG												
Límite Líquido	74			77			81					
Límite plástico	46			51			53					
Índice de plasticidad	28			26			28					
CLASIFICACIÓN U.S.C.S.	MH			MH			MH					
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	18,00			36,40			72,80					
ÍNDICE C.B.R.	10,00			6,00			3,00					
CLASIFICACIÓN SEGÚN PG-3	MARGINAL			MARGINAL			MARGINAL					
SULFATOS, MUESTRA DE SUELO (mg/kg)	0,00			0,00			0,00					
CONTENIDO EN MATERIA ORGÁNICA	0,00			0,00			0,00

CUADRO RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO DE LA MUESTRAS PATRÓN. ZAHORRA ARTIFICIAL						
SITUACIÓN	MUESTRAS TOMADAS EN CANTERA					
TIPO DE ACCIÓN	MEZCLA Y CUARTEO					
MUESTRAS	ZAHORRA 1	ZAHORRA 2	ZAHORRA 3			
TIPO DE MUESTRA	M.A.	M.A.	M.A.			
LITOLOGIA	ZAHORRA ARTIFICIAL	ARENA ARCILLOSA	ARENA ARCILLOSA			
GRANULOMETRÍA (%)						
Pasa tamiz 100	100,00	100,00	100,00			
Pasa tamiz 25	94,70	88,40	94,10			
Pasa tamiz 20	79,50	76,10	80,00			
pasa tamiz 16	68,10	64,90	69,00			
Pasa tamiz 8	42,70	44,30	41,40			
pasa tamiz 4	29,90	31,20	28,80			
Pasa tamiz 2	23,90	24,90	23,00			
Pasa tamiz 0,5	15,90	16,90	15,40			
Pasa tamiz 0,08	6,22	6,37	6,26			
LIMITES DE ATTERBERG						
Límite Líquido	NL	NL	NL			
Límite plástico	NP	NP	NP			
Índice de plasticidad						
CLASIFICACIÓN U.S.C.S.	GW	GW	GW			
PROCTOR MODIFICADO (kn/m3)	2,32 a 2,34					
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	7,6 a 9,3					
ÍNDICE C.B.R.	32 a 41					
HINCHAMIENTO LIBRE (%)	0,00	0,00	0,00			
CLASIFICACIÓN PG-3	SELECCIONADO					
SULFATOS, MUESTRA DE SUELO (mg/kg)	0,00					
CONTENIDO EN MATERIA ORGÁNICA	0,00					

CARTA DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE MUESTRAS PATRÓN ZAHORRA ARTIFICIAL

CUADRO RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO EN SUELOS ADECUADOS			
SITUACIÓN	CREACIÓN DE SUELOS		
TIPO DE ACCIÓN	MEZCLA Y CUARTEO		
MUESTRAS	TOLERABLE MEZCLA 1	TOLERABLE MEZCLA 2	TOLERABLE MEZCLA 3
TIPO DE MUESTRA	M.A.	M.A.	M.A.
LITOLÓGIA	ARENA ARCILLOSA	ARENA ARCILLOSA	ARENA ARCILLOSA
GRANULOMETRÍA (%)			
Pasa tamiz 100	100,00	100,00	100,00
Pasa tamiz 20	100,00	100,00	100,00
Pasa tamiz 5	95,00	97,10	98,40
Pasa tamiz 2	82,00	76,00	84,10
Pasa tamiz 0,4	63,00	59,80	59,30
Pasa tamiz 0,08	40,90	41,30	41,20
LIMITES DE ATTERBERG			
Limite Líquido	48	53	51
Limite plástico	38	41	32
Indice de plasticidad	20	12	19
CLASIFICACIÓN U.S.C.S.	SC	SC	
PROCTOR NORMAL (kn/m3)	2,08	2,06	2,07
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	7,70	8,60	7,30
INDICE C.B.R.	13,00	10,00	14,00
HINCHAMIENTO LIBRE (%)	0,20	0,00	0,10
CLASIFICACIÓN PG-3	ADECUADO		
SULFATOS, MUESTRA DE SUELO (mg/Kg)	0,00	0,00	0,00
CONTENIDO EN MATERIA ORGÁNICA	0,00	0,00	0,00

CUADRO RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO EN SUELOS TOLERABLES			
SITUACIÓN	CREACIÓN DE SUELOS		
TIPO DE ACCIÓN	MEZCLA Y CUARTEO		
MUESTRAS	TOLERABLE MEZCLA 1	TOLERABLE MEZCLA 2	TOLERABLE MEZCLA 3
TIPO DE MUESTRA	M.A.	M.A.	M.A.
LITOLÓGIA	ARENA ARCILLOSA	ARENA ARCILLOSA	ARENA ARCILLOSA
GRANULOMETRÍA (%)			
Pasa tamiz 100	100,00	100,00	100,00
Pasa tamiz 20	100,00	100,00	100,00
Pasa tamiz 5	99,20	99,80	99,50
Pasa tamiz 2	92,40	95,20	95,10
Pasa tamiz 0,4	50,60	56,10	60,60
Pasa tamiz 0,08	25,30	31,70	39,70
LIMITES DE ATTERBERG			
Límite Líquido	32	29	31
Límite plástico	18	17	18
Índice de plasticidad	14	12	13
CLASIFICACIÓN U.S.C.S.	SC	SC	
PROCTOR NORMAL (kn/m3)	2,08	2,07	2,06
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	7,90	7,70	8,60
ÍNDICE C.B.R.	13,00	18,00	8,00
HINCHAMIENTO LIBRE (%)	1,90	1,70	2,80
CLASIFICACIÓN PG-3	TOLERABLE		
SULFATOS, MUESTRA DE SUELO (mg/Kg)	0,00	0,00	0,00
CONTENIDO EN MATERIA ORGÁNICA	0,00	0,00	0,00

ANEJO B

Resultados de los Ensayos de Campo: Contenido de Humedad en las Capas Granulares

Este anejo recoge los resultados obtenidos de los ensayos de campo relativos a la medición de la humedad retenida en las capas granulares.

A continuación se muestran las representaciones gráficas de los resultados recogidos durante todo el periodo de ensayo (desde 31/01/2012 hasta 27/02/2013), proporcionados por cada uno de los *datalogger* instalados en la zona de ensayos, esto es: 1MD, 1MI, 2MD, 2MI, 3MD, 3MI, 4MD, 4MI, 5MD, 5MI, 6MD, 6MI, 7MD, 7MI, 8MD, 8MI, 9MD, 9MI, 10MD y 10MI. Se muestran los datos individuales de cada sensor así como una gráfica global donde se representan las variaciones de humedad con el tiempo para cada profundidad de estudio.

En todas las gráficas se representa el porcentaje de humedad detectado por los sensores frente a las precipitaciones (*mm de precipitación = l/m²*), obtenidas

B Resultados de los Ensayos de Campo: Contenido de Humedad en las Capas Granulares

a partir las estaciones meteorológicas instaladas en las proximidades del área de estudio.

El código de colores empleado en las gráficas es el siguiente:

Port 1 Port 2 Port 3 Estación Central Estación 12599

siendo

Port 1 El sensor de humedad situado a 200 cm de profundidad
Port 2 El sensor de humedad situado 100 cm de profundidad
Port 3 El sensor de humedad situado a 37,5 cm de profundidad

B Resultados de los Ensayos de Campo: Contenido de Humedad en las Capas Granulares

B Resultados de los Ensayos de Campo: Contenido de Humedad en las Capas Granulares

B Resultados de los Ensayos de Campo: Contenido de Humedad en las Capas Granulares

B Resultados de los Ensayos de Campo: Contenido de Humedad en las Capas Granulares

B Resultados de los Ensayos de Campo: Contenido de Humedad en las Capas Granulares

ANEJO C

Resultados de los Ensayos de Campo: Deflexiones y Capacidad Portante

Este anejo recoge los resultados obtenidos de los ensayos de campo relativos a las medidas con deflectómetros de impacto, y los resultados del modulo de elasticidad obtenidos mediante cálculo inverso.

C.1. Medidas de Deflexiones

MEDICIONES DEFLEXIÓN LADO IZQUIERDO

FEBRERO-MAYO 2012

MEDICIONES DEFLEXIÓN LADO IZQUIERDO

JUNIO-SEPTIEMBRE 2012

MEDICIONES DEFLEXIÓN LADO IZQUIERDO

OCTUBRE 2012-FEBRERO 2013

MEDICIONES DEFLEXIÓN LADO DERECHO

FEBRERO-MAYO 2012

MEDICIONES DEFLEXIÓN LADO DERECHO

JUNIO-SEPTIEMBRE 2012

MEDICIONES DEFLEXIÓN LADO DERECHO

OCTUBRE 2012-FEBRERO 2013

C.2. Módulos de Elasticidad

C Resultados de los Ensayos de Campo: Deflexiones y Capacidad Portante

C.2 Módulos de Elasticidad

C Resultados de los Ensayos de Campo: Deflexiones y Capacidad Portante

C.2 Módulos de Elasticidad

C Resultados de los Ensayos de Campo: Deflexiones y Capacidad Portante

C.2 Módulos de Elasticidad

C.3. Simulación del Deterioro del Firme Ensayado

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_010212.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 28.5

Radio Curvatura: 331

Nº Ejes Equivalentes: 140,529,971

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	3.36	13.6	102
	C.Poisson	0.33	8.52	62.9	7.19	33.5
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.52	62.9	7.19	33.5
	C.Poisson	0.33	6.14	82.3	1.81	-13.5
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	6.14	82.3	1.81	-13.5
	C.Poisson	0.33	0.974	107	-8.23	-97.3
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	3974	0.974	257	-0.0706	-97.3
	C.Poisson	0.35	0.367	130	-0.213	-67.1
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	2318	0.367	171	-0.042	-67.1
	C.Poisson	0.35	0.123	79.8	-0.0879	-43.3
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	1159	0.123	113	-0.0108	-43.3
	C.Poisson	0.35				

Fig. 1. Estado del firme el 01-feb-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_160212.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 36.3

Radio Curvatura: 293

Nº Ejes Equivalentes: 59,122,732

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	-6.54	14.5	112
	C.Poisson	0.33	8.5	57.1	7.68	39.1
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.5	57.1	7.68	39.1
	C.Poisson	0.33	6.04	80.3	1.85	-12.5
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	6.04	80.3	1.85	-12.5
	C.Poisson	0.33	0.787	116	-9.4	-109
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	2834	0.787	291	-0.0526	-109
	C.Poisson	0.35	0.314	155	-0.179	-79.8
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1653	0.314	204	-0.034	-79.8
	C.Poisson	0.35	0.113	102	-0.0787	-54.8
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	827	0.113	144	-0.00903	-54.8
	C.Poisson	0.35				

Fig. 2. Estado del firme el 16-feb-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_160212_refuerzo..ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 34.4

Radio Curvatura: 318

Nº Ejes Equivalentes: 11,664,312

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	2				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	2.68	13.7	102
	C.Poisson	0.33	8.45	19.7	11	76.5
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.45	19.7	11	76.5
	C.Poisson	0.33	8.02	74.5	5.38	15.9
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.02	74.5	5.38	15.9
	C.Poisson	0.33	5.32	79.1	0.865	-19.6
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	5.32	79.1	0.865	-19.6
	C.Poisson	0.33	0.685	104	-8.41	-97.7
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	2834	0.685	256	-0.0573	-97.7
	C.Poisson	0.35	0.28	139	-0.163	-71.9
	Despegada (s/n)	N				
Capa 6	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1653	0.28	183	-0.0321	-71.9
	C.Poisson	0.35	0.104	93.8	-0.0723	-50.5
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	827	0.104	133	-0.00809	-50.5
	C.Poisson	0.35				

Fig. 3. Refuerzo por cálculo analítico para firme del 16-feb-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_290212.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 45.3

Radio Curvatura: 262

Nº Ejes Equivalentes: 11,664,312

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	-15.6	15.4	121
	C.Poisson	0.33	8.48	51.7	8.14	44.3
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.48	51.7	8.14	44.3
	C.Poisson	0.33	5.97	78.6	1.9	-11.7
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	5.97	78.6	1.9	-11.7
	C.Poisson	0.33	0.645	126	-10.4	-120
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	2087	0.645	322	-0.0384	-120
	C.Poisson	0.35	0.27	180	-0.151	-92.4
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1217	0.27	238	-0.0274	-92.4
	C.Poisson	0.35	0.103	125	-0.0703	-67.2
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	609	0.103	178	-0.00743	-67.2
	C.Poisson	0.35				

Fig. 4. Estado del firme el 29-feb-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_290212.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 40.7

Radio Curvatura: 309

Nº Ejes Equivalentes: 28,454,565

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	4				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	3.45	13.6	102
	C.Poisson	0.33	8.72	50.3	8.64	48.6
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.72	50.3	8.64	48.6
	C.Poisson	0.33	7.33	79.4	3.89	3.14
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	7.33	79.4	3.89	3.14
	C.Poisson	0.33	4.57	74.9	0.119	-23.8
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	4.57	74.9	0.119	-23.8
	C.Poisson	0.33	0.489	100	-8.36	-96
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	2087	0.489	249	-0.0452	-96
	C.Poisson	0.35	0.215	145	-0.124	-74.8
	Despegada (s/n)	N				
Capa 6	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1217	0.215	191	-0.0243	-74.8
	C.Poisson	0.35	0.0878	106	-0.0588	-56.7
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	609	0.0878	151	-0.0058	-56.7
	C.Poisson	0.35				

Fig. 5. Refuerzo por cálculo analítico para firme del 29-feb-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_150312.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 34.3

Radio Curvatura: 301

Nº Ejes Equivalentes: 72,512,045

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	-4.16	14.3	109
	C.Poisson	0.33	8.5	58.5	7.57	37.7
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.5	58.5	7.57	37.7
	C.Poisson	0.33	6.06	80.8	1.84	-12.8
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	6.06	80.8	1.84	-12.8
	C.Poisson	0.33	0.829	114	-9.12	-106
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	3073	0.829	283	-0.0568	-106
	C.Poisson	0.35	0.326	149	-0.187	-76.7
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1792	0.326	196	-0.0359	-76.7
	C.Poisson	0.35	0.115	95.9	-0.081	-51.9
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	896	0.115	136	-0.00946	-51.9
	C.Poisson	0.35				

Fig. 6. Estado del firme el 15-mar-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_150312.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 32.5

Radio Curvatura: 327

Nº Ejes Equivalentes: 28,454,565

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	2				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	4.74	13.5	100
	C.Poisson	0.33	8.45	21.4	10.9	74.8
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.45	21.4	10.9	74.8
	C.Poisson	0.33	8.02	75.5	5.3	15
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.02	75.5	5.3	15
	C.Poisson	0.33	5.34	79.4	0.872	-19.6
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	5.34	79.4	0.872	-19.6
	C.Poisson	0.33	0.722	102	-8.17	-95.2
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	3073	0.722	249	-0.0616	-95.2
	C.Poisson	0.35	0.291	134	-0.17	-69.2
	Despegada (s/n)	N				
Capa 6	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1792	0.291	176	-0.0339	-69.2
	C.Poisson	0.35	0.107	88.7	-0.0745	-47.9
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	896	0.107	126	-0.0085	-47.9
	C.Poisson	0.35				

Fig. 7. Refuerzo por cálculo analítico para firme del 15-mar-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_040412.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 31.1

Radio Curvatura: 316

Nº Ejes Equivalentes: 103,811,422

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	-0.222	14	105
	C.Poisson	0.33	8.51	60.8	7.37	35.5
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.51	60.8	7.37	35.5
	C.Poisson	0.33	6.1	81.6	1.83	-13.2
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	6.1	81.6	1.83	-13.2
	C.Poisson	0.33	0.902	110	-8.66	-102
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	3514	0.902	269	-0.0638	-102
	C.Poisson	0.35	0.347	139	-0.2	-71.6
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	2050	0.347	182	-0.0391	-71.6
	C.Poisson	0.35	0.119	87.2	-0.0846	-47.2
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	1025	0.119	123	-0.0101	-47.2
	C.Poisson	0.35				

Fig. 8. Estado del firme el 04-abr-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_040412_refuerzo.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 30.3

Radio Curvatura: 329

Nº Ejes Equivalentes: 6,610,387

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	1				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	4.16	13.6	101
	C.Poisson	0.33	8.03	2.37	12	89.3
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.03	2.37	12	89.3
	C.Poisson	0.33	8.3	70.4	6.18	23.4
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.3	70.4	6.18	23.4
	C.Poisson	0.33	5.73	81.1	1.31	-16.9
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	5.73	81.1	1.31	-16.9
	C.Poisson	0.33	0.841	104	-8.2	-96.2
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	3514	0.841	253	-0.0667	-96.2
	C.Poisson	0.35	0.328	131	-0.191	-68
	Despegada (s/n)	N				
Capa 6	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	2050	0.328	173	-0.038	-68
	C.Poisson	0.35	0.115	83.9	-0.0813	-45.4
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	1025	0.115	119	-0.00965	-45.4
	C.Poisson	0.35				

Fig. 9. Refuerzo por cálculo analítico para firme del 04-abr-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_260412.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 30.3

Radio Curvatura: 320

Nº Ejes Equivalentes: 113,382,143

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	0.806	13.9	104
	C.Poisson	0.33	8.51	61.4	7.32	34.9
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.51	61.4	7.32	34.9
	C.Poisson	0.33	6.11	81.8	1.82	-13.3
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	6.11	81.8	1.82	-13.3
	C.Poisson	0.33	0.922	109	-8.54	-100
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	3640	0.922	266	-0.0658	-100
	C.Poisson	0.35	0.352	136	-0.204	-70.3
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	2123	0.352	179	-0.0399	-70.3
	C.Poisson	0.35	0.121	85	-0.0855	-46.1
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	1062	0.121	120	-0.0103	-46.1
	C.Poisson	0.35				

Fig. 10. Estado del firme el 26-abr-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_260412.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 29.6

Radio Curvatura: 334

Nº Ejes Equivalentes: 103,811,422

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	1				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	5.12	13.5	99.9
	C.Poisson	0.33	8.03	3.24	11.9	88.4
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.03	3.24	11.9	88.4
	C.Poisson	0.33	8.31	70.9	6.14	22.9
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.31	70.9	6.14	22.9
	C.Poisson	0.33	5.74	81.3	1.31	-17
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	5.74	81.3	1.31	-17
	C.Poisson	0.33	0.86	103	-8.08	-95
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	3640	0.86	250	-0.0687	-95
	C.Poisson	0.35	0.333	129	-0.195	-66.8
	Despegada (s/n)	N				
Capa 6	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	2123	0.333	170	-0.0388	-66.8
	C.Poisson	0.35	0.116	81.8	-0.0822	-44.3
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	1062	0.116	116	-0.00982	-44.3
	C.Poisson	0.35				

Fig. 11. Refuerzo por cálculo analítico para firme del 26-abr-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_280812.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 35.7

Radio Curvatura: 295

Nº Ejes Equivalentes: 62,150,966

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	-5.81	14.5	111
	C.Poisson	0.33	8.5	57.5	7.65	38.7
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.5	57.5	7.65	38.7
	C.Poisson	0.33	6.05	80.4	1.85	-12.6
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	6.05	80.4	1.85	-12.6
	C.Poisson	0.33	0.8	116	-9.31	-108
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	2905	0.8	288	-0.0538	-108
	C.Poisson	0.35	0.317	153	-0.181	-78.8
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1695	0.317	202	-0.0347	-78.8
	C.Poisson	0.35	0.113	99.8	-0.0795	-53.9
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	847	0.113	142	-0.00917	-53.9
	C.Poisson	0.35				

Fig. 12. Estado del firme el 28-ago-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_280812_refuerzo.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 33.9

Radio Curvatura: 320

Nº Ejes Equivalentes: 11,948,479

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	2				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	3.31	13.6	102
	C.Poisson	0.33	8.45	20.2	11	76
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.45	20.2	11	76
	C.Poisson	0.33	8.02	74.8	5.35	15.7
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.02	74.8	5.35	15.7
	C.Poisson	0.33	5.32	79.2	0.867	-19.6
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	5.32	79.2	0.867	-19.6
	C.Poisson	0.33	0.696	103	-8.34	-96.9
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	2905	0.696	254	-0.0586	-96.9
	C.Poisson	0.35	0.283	137	-0.165	-71.1
	Despegada (s/n)	N				
Capa 6	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1695	0.283	181	-0.0327	-71.1
	C.Poisson	0.35	0.105	92.2	-0.0731	-49.7
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	847	0.105	131	-0.00822	-49.7
	C.Poisson	0.35				

Fig. 13. Refuerzo por cálculo analítico para firme del 28-ago-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_200912.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 33.3

Radio Curvatura: 306

Nº Ejes Equivalentes: 80,670,295

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	-2.95	14.2	108
	C.Poisson	0.33	8.5	59.2	7.51	37
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.5	59.2	7.51	37
	C.Poisson	0.33	6.07	81	1.84	-12.9
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	6.07	81	1.84	-12.9
	C.Poisson	0.33	0.851	113	-8.98	-105
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	3202	0.851	279	-0.0589	-105
	C.Poisson	0.35	0.332	146	-0.191	-75.1
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1868	0.332	192	-0.0369	-75.1
	C.Poisson	0.35	0.117	93.2	-0.0821	-50.4
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	934	0.117	132	-0.00967	-50.4
	C.Poisson	0.35				

Fig. 14. Estado del firme el 20-sep-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_200912_refuerzo.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 32.4

Radio Curvatura: 319

Nº Ejes Equivalentes: 6,021,268

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	1				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	1.63	13.8	103
	C.Poisson	0.33	8.03	0.0596	12.2	91.6
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.03	0.0596	12.2	91.6
	C.Poisson	0.33	8.3	69	6.29	24.7
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.3	69	6.29	24.7
	C.Poisson	0.33	5.71	80.7	1.31	-16.7
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	5.71	80.7	1.31	-16.7
	C.Poisson	0.33	0.793	107	-8.5	-99.2
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	3202	0.793	261	-0.0617	-99.2
	C.Poisson	0.35	0.314	138	-0.182	-71.3
	Despegada (s/n)	N				
Capa 6	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1868	0.314	181	-0.0358	-71.3
	C.Poisson	0.35	0.112	89.6	-0.0788	-48.4
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	934	0.112	127	-0.00917	-48.4
	C.Poisson	0.35				

Fig. 15. Refuerzo por cálculo analítico para firme del 20-sep-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_051012.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 33.5

Radio Curvatura: 305

Nº Ejes Equivalentes: 78,524,926

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	-3.19	14.2	108
	C.Poisson	0.33	8.5	59	7.52	37.2
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.5	59	7.52	37.2
	C.Poisson	0.33	6.07	81	1.84	-12.9
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	6.07	81	1.84	-12.9
	C.Poisson	0.33	0.846	113	-9.01	-105
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	3176	0.846	279	-0.0585	-105
	C.Poisson	0.35	0.331	146	-0.19	-75.4
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1852	0.331	193	-0.0367	-75.4
	C.Poisson	0.35	0.116	93.7	-0.0819	-50.7
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	926	0.116	133	-0.00963	-50.7
	C.Poisson	0.35				

Fig. 16. Estado del firme el 05-oct-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_051012_refuerzo.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 32.6

Radio Curvatura: 318

Nº Ejes Equivalentes: 5,949,432

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	1				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	1.4	13.8	104
	C.Poisson	0.33	8.03	-0.149	12.2	91.9
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.03	-0.149	12.2	91.9
	C.Poisson	0.33	8.3	68.9	6.3	24.8
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.3	68.9	6.3	24.8
	C.Poisson	0.33	5.7	80.7	1.31	-16.7
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	5.7	80.7	1.31	-16.7
	C.Poisson	0.33	0.789	107	-8.52	-99.5
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	3176	0.789	262	-0.0613	-99.5
	C.Poisson	0.35	0.313	138	-0.181	-71.6
	Despegada (s/n)	N				
Capa 6	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1852	0.313	182	-0.0356	-71.6
	C.Poisson	0.35	0.112	90.1	-0.0785	-48.7
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	926	0.112	128	-0.00913	-48.7
	C.Poisson	0.35				

Fig. 17. Refuerzo por cálculo analítico para firme del 05-oct-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_171012.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 35.8

Radio Curvatura: 295

Nº Ejes Equivalentes: 62,150,966

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	-5.94	14.5	111
	C.Poisson	0.33	8.5	57.4	7.65	38.7
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.5	57.4	7.65	38.7
	C.Poisson	0.33	6.05	80.4	1.85	-12.6
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	6.05	80.4	1.85	-12.6
	C.Poisson	0.33	0.797	116	-9.33	-109
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	2892	0.797	289	-0.0536	-109
	C.Poisson	0.35	0.317	153	-0.181	-79
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1687	0.317	202	-0.0345	-79
	C.Poisson	0.35	0.113	100	-0.0793	-54.1
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	844	0.113	142	-0.00914	-54.1
	C.Poisson	0.35				

Fig. 18. Estado del firme el 17-oct-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_171012_refuerzo.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 34

Radio Curvatura: 320

Nº Ejes Equivalentes: 11,890,946

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	2				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	3.19	13.6	102
	C.Poisson	0.33	8.45	20.1	11	76.1
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.45	20.1	11	76.1
	C.Poisson	0.33	8.02	74.7	5.36	15.7
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.02	74.7	5.36	15.7
	C.Poisson	0.33	5.32	79.2	0.867	-19.6
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	5.32	79.2	0.867	-19.6
	C.Poisson	0.33	0.694	103	-8.35	-97.1
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	2892	0.694	254	-0.0583	-97.1
	C.Poisson	0.35	0.283	138	-0.165	-71.2
	Despegada (s/n)	N				
Capa 6	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1687	0.283	181	-0.0325	-71.2
	C.Poisson	0.35	0.105	92.5	-0.0729	-49.9
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	844	0.105	131	-0.00819	-49.9
	C.Poisson	0.35				

Fig. 19. Refuerzo por cálculo analítico para firme del 17-oct-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_171112.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 37.8

Radio Curvatura: 287

Nº Ejes Equivalentes: 28,454,565

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	-8.22	14.7	113
	C.Poisson	0.33	8.49	56.1	7.77	40
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.49	56.1	7.77	40
	C.Poisson	0.33	6.03	80	1.86	-12.4
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	6.03	80	1.86	-12.4
	C.Poisson	0.33	0.759	118	-9.59	-111
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	2678	0.759	296	-0.0498	-111
	C.Poisson	0.35	0.305	159	-0.174	-82.1
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1562	0.305	210	-0.0328	-82.1
	C.Poisson	0.35	0.111	106	-0.0772	-57
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	781	0.111	150	-0.00874	-57
	C.Poisson	0.35				

Fig. 20. Estado del firme 17-nov-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_171112_refuerzo.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 35

Radio Curvatura: 324

Nº Ejes Equivalentes: 28,454,565

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	3				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	5.32	13.5	99.7
	C.Poisson	0.33	8.68	38.6	9.65	60
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.68	38.6	9.65	60
	C.Poisson	0.33	7.7	78.7	4.51	8.05
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	7.7	78.7	4.51	8.05
	C.Poisson	0.33	4.96	77.3	0.485	-21.9
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	4.96	77.3	0.485	-21.9
	C.Poisson	0.33	0.617	99.7	-8.13	-94.2
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	2678	0.617	245	-0.0558	-94.2
	C.Poisson	0.35	0.258	136	-0.151	-70.3
	Despegada (s/n)	N				
Capa 6	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1562	0.258	179	-0.03	-70.3
	C.Poisson	0.35	0.0988	93.7	-0.068	-50.4
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	781	0.0988	133	-0.00739	-50.4
	C.Poisson	0.35				

Fig. 21. Refuerzo por cálculo analítico para firme del 17-nov-2012

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_170113.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 37.9

Radio Curvatura: 286

Nº Ejes Equivalentes: 51,101,950

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	-8.27	14.7	113
	C.Poisson	0.33	8.49	56	7.77	40.1
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.49	56	7.77	40.1
	C.Poisson	0.33	6.03	80	1.86	-12.4
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	6.03	80	1.86	-12.4
	C.Poisson	0.33	0.758	118	-9.6	-111
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	2673	0.758	297	-0.0497	-111
	C.Poisson	0.35	0.305	160	-0.174	-82.1
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1559	0.305	210	-0.0327	-82.1
	C.Poisson	0.35	0.111	106	-0.0771	-57
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	780	0.111	150	-0.00873	-57
	C.Poisson	0.35				

Fig. 22. Estado del firme el 17-ene-2013

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_170113_refuerzo.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 35

Radio Curvatura: 324

Nº Ejes Equivalentes: 28,454,565

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	3				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	5.27	13.5	99.7
	C.Poisson	0.33	8.68	38.5	9.65	60
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.68	38.5	9.65	60
	C.Poisson	0.33	7.7	78.6	4.51	8.07
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	7.7	78.6	4.51	8.07
	C.Poisson	0.33	4.96	77.3	0.485	-21.9
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	4.96	77.3	0.485	-21.9
	C.Poisson	0.33	0.616	99.8	-8.13	-94.2
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	2673	0.616	245	-0.0557	-94.2
	C.Poisson	0.35	0.258	136	-0.151	-70.3
	Despegada (s/n)	N				
Capa 6	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1559	0.258	179	-0.03	-70.3
	C.Poisson	0.35	0.0988	93.8	-0.0679	-50.5
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	780	0.0988	133	-0.00738	-50.5
	C.Poisson	0.35				

Fig. 23. Refuerzo por cálculo analítico para firme del 17-ene-2013

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_130213.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 38.4

Radio Curvatura: 285

Nº Ejes Equivalentes: 48,740,888

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	-8.79	14.7	114
	C.Poisson	0.33	8.49	55.7	7.8	40.4
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.49	55.7	7.8	40.4
	C.Poisson	0.33	6.02	79.9	1.86	-12.3
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	6.02	79.9	1.86	-12.3
	C.Poisson	0.33	0.749	119	-9.66	-112
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	2626	0.749	298	-0.0488	-112
	C.Poisson	0.35	0.303	161	-0.172	-82.9
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1532	0.303	212	-0.0324	-82.9
	C.Poisson	0.35	0.11	107	-0.0767	-57.7
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	766	0.11	152	-0.00864	-57.7
	C.Poisson	0.35				

Fig. 24. Estado del firme el 13-feb-2013

Cálculo a Fatiga

Fichero: C:\CARACOL\Caracol\TESIS FVS_130213_refuerzo.ENT

Radio: 15

Presión (bares): 9.2

Deflexión: 35.5

Radio Curvatura: 322

Nº Ejes Equivalentes: 27,938,370

Rueda Simple

Capa	Leyenda	Datos	SigmaZ kg/cm2	EpsilonZ 10-6	SigmaH kg/cm2	EpsilonH 10-6
Capa 1	Espesor, cm	3				
	Módulo, kg/cm2	60000	9.2	4.85	13.5	100
	C.Poisson	0.33	8.68	38.2	9.68	60.3
	Despegada (s/n)	N				
Capa 2	Espesor, cm	5				
	Módulo, kg/cm2	60000	8.68	38.2	9.68	60.3
	C.Poisson	0.33	7.7	78.4	4.53	8.24
	Despegada (s/n)	N				
Capa 3	Espesor, cm	6				
	Módulo, kg/cm2	60000	7.7	78.4	4.53	8.24
	C.Poisson	0.33	4.95	77.3	0.482	-21.9
	Despegada (s/n)	N				
Capa 4	Espesor, cm	14				
	Módulo, kg/cm2	60000	4.95	77.3	0.482	-21.9
	C.Poisson	0.33	0.609	100	-8.18	-94.7
	Despegada (s/n)	N				
Capa 5	Espesor, cm	25				
	Módulo, kg/cm2	2626	0.609	247	-0.0548	-94.7
	C.Poisson	0.35	0.255	137	-0.149	-70.9
	Despegada (s/n)	N				
Capa 6	Espesor, cm	50				
	Módulo, kg/cm2	1532	0.255	180	-0.0296	-70.9
	C.Poisson	0.35	0.0982	94.9	-0.0675	-51.1
	Despegada (s/n)	N				
Cimiento	Módulo, kg/cm2	766	0.0982	135	-0.00729	-51.1
	C.Poisson	0.35				

Fig. 25. Refuerzo por cálculo analítico para firme del 13-feb-2013

ANEJO D

Modelo Semi-Empírico de Infiltración: Programa en FORTRAN 90

Este anejo recoge el código fuente del programa MICG, Modelo de Infiltración de las Capas Granulares, realizado en FORTRAN 90, para la modelización de la infiltración en las capas granulares.

```
!  
!UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
!Tesis Doctoral:  
!OPTIMIZACIÓN DE INVERSIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO VIAL  
!FERNANDO VARELA SOTO  
!  
!MICG: MODELO SEMIEMPÍRICO DE INFILTRACIÓN DE LAS CAPAS GRANULARES  
!  
!El programa realiza un ajuste semiempírico del modelo de Horton  
!mediante datos de infiltración obtenidos en el tramo de ensayo  
!  
!El modelo de Horton es una expresión basada en tres parámetros:  
!  $f = f_c + (f_0 - f_c) \cdot \exp(-Kt)$   
!donde  
! f=capacidad de infiltración en un tiempo t  
! fc=capacidad de infiltración constante  
! f0=capacidad de infiltración en t=0  
! k=parámetro característico del suelo que controla  
!la capacidad de infiltración
```

Program infiltracion

```
!declaración de variables lógicas  
  implicit none  
  real::fc,f0,k  
  integer:: n,i,a  
  real,dimension(:),allocatable::f
```

```

    real,dimension(:),allocatable::t

    a=0
    n=200

!Variables físicas
    allocate( t(0:n) , f(0:n) )

!Variable temporal
    t(0)=a
    do i=1,n
        t(i)=t(0)+i
    end do

!MODULO PERCOLACIÓN:
!calcula la capacidad de infiltración en la capa 1:
!ZAHORRA
!sensor port3
    fc=0.1260
    f0=0.1020
    k=-0.03988

    do i=0,n
        f(i)=fc+(f0-fc)*exp(-k*t(i))
    end do

```

```
open(1,file="port3.dat")
do i=0,n
    write(1,*) t(i), f(i)
end do
close(1)

print*,"Capacidad de infiltración calculada en ZAHORRA"

!MODULO INFILTRACIÓN1:
!calcula la capacidad de infiltración en la capa 2:
!SUELO SELECCIONADO
!sensor port2
    fc=0.3073
    f0=0.1964
    k=-0.02152

do i=0,n
    f(i)=fc+(f0-fc)*exp(-k*t(i))
end do

open(1,file="port2.dat")
do i=0,n
    write(1,*) t(i), f(i)
end do
close(1)

print*," Capacidad de infiltración en ZAHORRA NATURAL"
```

```
!MODULO INFILTRACIÓN2:
!calcula la capacidad de infiltración en la capa 3:
!EXPLANADA
!sensor port1
    fc=0.36
    f0=0.1453
    k=-0.15619

    do i=0,n
        f(i)=fc+(f0-fc)*exp(-k*t(i))
    end do

    open(1,file="port1.dat")
    do i=0,n
        write(1,*) t(i), f(i)
    end do
    close(1)

    print*," Capacidad de infiltración en EXPLANADA"

    print*,"Los cálculos han terminado.
Pulse una tecla para continuar."

    end program

!Módulos no implementados:
!DIVISOR1: la tasa de percolación del pavimento es excedida
```

!por la intensidad de lluvia: Unidad de Almacenamiento 1.
!DIVISOR2: agotada la capacidad de almacenamiento de la Unidad 1,
!si hay exceso de flujo: Unidad de Almacenamiento 2.
!DRENAJE: agotada la capacidad de almacenamiento de la Unidad 2,
!el exceso se vierte hacia el sistema de drenaje

ANEJO E

Caracterización de los Materiales de Ensayo en Campo

Este anejo es un compendio de los resultados de los análisis ejecutados por laboratorios certificados sobre los materiales utilizados en los ensayos de campo.

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre

Vía Pasteur, 34-15890 Santiago de Compostela (A Coruña)

Tel: 902 021 911 / 981 581 999 Fax: 981 581 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC N° REGISTRO 15007EHCO53, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007V5G05B, EL 21/04/2005

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE ÁRIDOS POR TAMIZADO UNE-EN 933-1/98

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO N°: 34015/704S1128
FECHA: 07/06/2011

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA

CONTRATISTA:

OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO

LOCALIZACION TOMA DE MUESTRA: 03/06/2011-EXTENDIDO RUA B3 PK 0+020 C.D

TIPO DE MUESTRA: ZAHORRA ARTIFICIAL-PACO GOMEZ

TAMIZ UNE	% Que pasa
125	100,0
63	100,0
40	100,0
31,5	100,0
25	94,7
20	79,5
16	68,1
8	42,7
4	29,9
2	23,9
1	19,3
0,500	15,9
0,250	12,9
0,125	9,0
0,063	6,22

OBSERVACIONES: HUSO-ZA 25

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1°, 2°, 4° y 5°. 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. PH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES
GEOMÉTRICAS DE LOS
ÁRIDOS.EVALUACIÓN DE LOS
FINOS.EQUIVALENTE DE ARENA
UNE EN 933-8/2000**

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO N°: 34015/704S1129
FECHA: 07/06/2011

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA
CONTRATISTA:
OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO
FECHA Y SITIO DE TOMA DE MUESTRA: 03/06/2011-EXTENDIDO RUA B3 PK 0+020 C.D
TIPO DE MUESTRA: ZAHORRA ARTIFICIAL-PACO GOMEZ
RESULTADOS OBTENIDOS:

	1ª SUBMUESTRA	2ª SUBMUESTRA
EQUIVALENTE DE ARENA	21	21
EQUIVALENTE DE ARENA DE LA MUESTRA	21	

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

E Caracterización de los Materiales de Ensayo en Campo

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre

Vía Pasteur, 34-15890 Santiago de Compostela (A Coruña)

Tel: 902 021 911 / 981 581 999 Fax: 981 581 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC N° REGISTRO 15007EHCO53, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007V5G05B, EL 21/04/2005

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE ÁRIDOS POR TAMIZADO UNE-EN 933-1/98

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO N°: 34015/649S1034
FECHA: 09/05/2011

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA

CONTRATISTA:

OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO

LOCALIZACION TOMA DE MUESTRA: 06/05/2011-GLORIETA 3

TIPO DE MUESTRA: ZAHORRA ARTIFICIAL-PACO GOMEZ

TAMIZ UNE	% Que pasa
125	100,0
63	100,0
40	100,0
31,5	98,3
25	94,1
20	80,0
16	69,0
8	41,4
4	28,8
2	23,0
1	18,5
0,500	15,4
0,250	12,9
0,125	9,4
0,063	6,26

OBSERVACIONES: HUSO-ZA 25

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1°, 2°, 4° y 5°. 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. PH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE
LÍQUIDO Y PLÁSTICO DE UN
SUELO**
UNE 103103/94 - UNE 103104/93

Laboratorio: SANTIAGO
Ensayo n°: 34015/649S1035
Fecha: 09/05/2011
Hoja: 1/1

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA
CONTRATISTA:
OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO
LOCALIZACION: 06/05/2011-GLORIETA 3
MUESTRA: ZAHORRA ARTIFICIAL-PACO GOMEZ

LÍMITE LÍQUIDO	NO LÍQUIDO
LÍMITE PLÁSTICO	NO PLÁSTICO

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE
LÍQUIDO Y PLÁSTICO DE UN
SUELO**

UNE 103103/94 - UNE 103104/93

Laboratorio: SANTIAGO

Ensayo nº:

Fecha:

Hoja: 1/1

PETICIONARIO:

CONTRATISTA:

OBRA:

LOCALIZACION:

MUESTRA:

LÍMITE LÍQUIDO	49,0
LÍMITE PLÁSTICO	44,8
INDICE DE PLASTICIDAD	4,3

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES
GEOMÉTRICAS DE LOS
ÁRIDOS.EVALUACIÓN DE LOS
FINOS.EQUIVALENTE DE ARENA
UNE EN 933-8/2000**

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO N°: 34015/649S1036
FECHA: 09/05/2011

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA
CONTRATISTA:
OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO
FECHA Y SITIO DE TOMA DE MUESTRA: 06/05/2011-GLORIETA 3
TIPO DE MUESTRA: ZAHORRA ARTIFICIAL-PACO GOMEZ
RESULTADOS OBTENIDOS:

	1ª SUBMUESTRA	2ª SUBMUESTRA
EQUIVALENTE DE ARENA	19	18
EQUIVALENTE DE ARENA DE LA MUESTRA	18	

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre

Vía Pasteur, 34-15890 Santiago de Compostela (A Coruña)

Tel: 902 021 911 / 981 581 999 Fax: 981 581 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC N° REGISTRO 15007EHCO53, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007V5G05B, EL 21/04/2005

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN POR EL MÉTODO DE ENSAYO DE LOS ÁNGELES UNE EN 1097-2/99,

LABORATORIO: SANTIAGO

ENSAYO N°: 34015/649S1038

FECHA: 09/05/2011

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA

CONTRATISTA:

OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO

FECHA Y SITIO DE TOMA DE MUESTRA: 06/05/2011-GLORIETA 3

TIPO DE MUESTRA: ZAHORRA ARTIFICIAL-PACO GOMEZ

RESULTADOS OBTENIDOS:

COEFICIENTE DE LOS ÁNGELES (LA)

28

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

DETERMINACIÓN DE LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS. ÍNDICE DE LAJAS

UNE-EN-933-3:1997

LABORATORIO: SANTIAGO

ENSAYO N°: 34015/649S1039

FECHA: 09/05/2011

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA

CONTRATISTA:

OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO

FECHA Y SITIO DE TOMA DE MUESTRA: 06/05/2011-GLORIETA 3

TIPO DE MUESTRA: ZAHORRA ARTIFICIAL-PACO GOMEZ

MASA INICIAL	2489
ÍNDICE DE LAJAS GLOBAL	25

Fracciones granulométricas (mm)	Anchura del tamiz de barras (mm)	Índice de lajas para cada fracción
63/80	40	-
50/63	31,5	-
40/50	25	-
31,5/40	20	66
25/31,5	16	29
20/25	12,5	20
16/20	10	22
12,5/16	8	26
10/12,5	6,3	21
8/10	5	30
6,3/8	4	29
5/6,3	3,15	26
4/5	2,5	23

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre

Vía Pasteur, 34-15890 Santiago de Compostela (A Coruña)

Tel: 902 021 911 / 981 581 999 Fax: 981 581 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC N° REGISTRO 15007EHCO53, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007V5G05B, EL 21/04/2005

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE ÁRIDOS POR TAMIZADO UNE-EN 933-1/98

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO N°: 34015/713S1149
FECHA: 08/06/2011

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA

CONTRATISTA:

OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO

LOCALIZACION TOMA DE MUESTRA: 06/06/2011-RUA B-2 PK 0+020 C.D.

TIPO DE MUESTRA: ZAHORRA ARTIFICIAL-PACO GOMEZ

TAMIZ UNE	% Que pasa
125	100,0
63	100,0
40	100,0
31,5	95,5
25	88,4
20	76,1
16	64,9
8	44,3
4	31,2
2	24,9
1	20,0
0,500	16,9
0,250	13,7
0,125	8,9
0,063	6,37

OBSERVACIONES: HUSO-ZA 25

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1°, 2°, 4° y 5°. 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03078ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. PH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES
GEOMÉTRICAS DE LOS
ÁRIDOS.EVALUACIÓN DE LOS
FINOS.EQUIVALENTE DE ARENA
UNE EN 933-8/2000**

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO N°: 34015/713S1150
FECHA: 08/06/2011

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA
CONTRATISTA:
OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO
FECHA Y SITIO DE TOMA DE MUESTRA: 06/06/2011-RUA B-2 PK 0+020 C.D.
TIPO DE MUESTRA: ZAHORRA ARTIFICIAL-PACO GOMEZ
RESULTADOS OBTENIDOS:

	1ª SUBMUESTRA	2ª SUBMUESTRA
EQUIVALENTE DE ARENA	21	20
EQUIVALENTE DE ARENA DE LA MUESTRA	21	

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre

Vía Pasteur, 34-15890 Santiago de Compostela (A Coruña)

Telf.: 902 021 911 / 981 581 999 Fax: 981 581 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC N° REGISTRO 15007EHC053, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007V5G05B, EL 21/04/2005

GEOTECNIA. ENSAYO DE COMPACTACIÓN UNE 103500/94 UNE 103501/94

Laboratorio: SANTIAGO
Ensayo nº: 34015/649S1037
Fecha: 09/05/2011
Hoja: 1/1

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA

CONTRATISTA:

OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO

FECHA Y SITIO TOMA DE MUESTRA: 06/05/2011-GLORIETA 3

MUESTRA: ZAHORRA ARTIFICIAL-PACO GOMEZ

PROCTOR	MODIFICADO
VOLUMEN MOLDE (cm ³)	2320
PESO MAZA (kg)	4,53
ALTURA DE CAIDA (cm)	45,7
Nº DE CAPAS	5
Nº GOLPES POR CAPA	60
TIPO DE COMPACTADORA	AUTOMATICA
MATERIAL UTILIZADO (%)	80

DENSIDAD MÁXIMA	g/cm ³	2,32
HUMEDAD ÓPTIMA	%	6,9

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

**DENSIDAD Y HUMEDAD "IN SITU" POR EL
MÉTODO NUCLEAR
ASTM D 2922/96 - ASTM D 3017/96**

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO N°: 34015/796S1239
FECHA: 20/06/2011
Hoja: 1/1

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA
CONTRATISTA:
OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO
LOCALIZACION TOMA DE MUESTRA: 20/06/11. BASE ZAHORRA. RUA 3-B CD
TIPO DE MUESTRA: ZAHORRA

SITUACIÓN DEL ENSAYO	DENSIDAD HÚMEDA (g/cm ³)	HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA (g/cm ³)	COMPACTACIÓN	
				OBTENIDA (%)	PROCTOR DE REFERENCIA
PK 0+020C	2,582	4,1	2,480	106,0	1
PK 0+040M.D	2,559	4,3	2,453	104,9	1
PK 0+060C	2,539	5,3	2,411	103,0	1
PK 0+080M.I	2,524	5,3	2,397	102,4	1
PK 0+100C	2,572	5,7	2,433	104,0	1
PK 0+120M.D	2,495	5,5	2,365	101,1	1
PK 0+140C	2,451	5,1	2,332	99,7	1
PK 0+160M.I	2,502	5,7	2,367	101,2	1
PK 0+180C	2,546	5,8	2,406	102,8	1
PK 0+200M.D	2,553	5,7	2,415	103,2	1

PROCTOR DE REFERENCIA	1	2	3
	MODIFICADO		
DENSIDAD	2,340		
HUMEDAD	7,2		

OBSERVACIONES: Ensayo realizado a la profundidad de 15,0 cm

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

E Caracterización de los Materiales de Ensayo en Campo

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre
Vía Pasteur, 34-15890 Santiago de Compostela (A Coruña)
Telf: 902 021 911 / 981 581 999 Fax: 981 581 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC N° REGISTRO 15007EHCO53, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007V5G05B, EL 21/04/2005

DENSIDAD Y HUMEDAD "IN SITU" POR EL MÉTODO NUCLEAR ASTM D 2922/96 - ASTM D 3017/96

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO Nº: 34015/797S1240
FECHA: 20/06/2011
Hoja: 1/1

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA

CONTRATISTA:

OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO

LOCALIZACION TOMA DE MUESTRA: 20/06/11. BASE ZAHORRA. RUA B-3

TIPO DE MUESTRA: ZAHORRA

SITUACIÓN DEL ENSAYO	DENSIDAD HÚMEDA (g/cm ³)	HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA (g/cm ³)	COMPACTACIÓN	
				OBTENIDA (%)	PROCTOR DE REFERENCIA
PK 0+220C; CD	2,516	6,4	2,365	101,1	1
PK 0+240M.D; CD	2,468	4,8	2,355	100,6	1
PK 0+260MI; CD	2,544	7,0	2,378	101,6	1
PK 0+220C; CI	2,485	4,9	2,369	101,2	1
PK 0+240MD; CI	2,485	5,0	2,367	101,1	1
PK 0+260MI; CI	2,471	5,3	2,347	100,3	1

PROCTOR DE REFERENCIA	1	2	3
	MODIFICADO		
DENSIDAD	2,340		
HUMEDAD	7,2		

OBSERVACIONES: Ensayo realizado a la profundidad de 15,0 cm

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1", 2", 4" y 5", 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. PH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

**DENSIDAD Y HUMEDAD "IN SITU" POR EL
MÉTODO NUCLEAR
ASTM D 2922/96 - ASTM D 3017/96**

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO N°: 34015/760S1203
FECHA: 14/06/2011
Hoja: 1/1

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA
CONTRATISTA:
OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO
LOCALIZACION TOMA DE MUESTRA: BASE ZAHORRA RUA B-2 CD
TIPO DE MUESTRA: ZAHORRA

SITUACIÓN DEL ENSAYO	DENSIDAD HÚMEDA (g/cm ³)	HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA (g/cm ³)	COMPACTACIÓN	
				OBTENIDA (%)	PROCTOR DE REFERENCIA
PK 0+020 MC	2,563	3,9	2,467	105,4	1
PK 0+040 MD	2,504	3,7	2,415	103,2	1
PK 0+060 MC	2,640	6,2	2,486	106,2	1
PK 0+080 MI	2,631	6,4	2,473	105,7	1
PK 0+100 MC	2,599	6,3	2,445	104,5	1
PK 0+120 MD	2,548	7,2	2,377	101,6	1
PK 0+140 MI	2,515	6,6	2,359	100,8	1
PK 0+160 MC	2,578	7,5	2,398	102,5	1
PK 0+180 MD	2,648	6,5	2,486	106,3	1
PK 0+200 MC	2,552	7,3	2,378	101,6	1

PROCTOR DE REFERENCIA	1	2	3
	MODIFICADO		
DENSIDAD	2,340		
HUMEDAD	7,2		

OBSERVACIONES: Ensayo realizado a la profundidad de 15,0 cm

JEFE DE ÁREA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

273

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1°, 2°, 4° y 5°, 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. PH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

E Caracterización de los Materiales de Ensayo en Campo

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre
Vía Pasteur, 34-15890 Santiago de Compostela (A Coruña)
Telf.: 902 021 911 / 981 581 999 Fax: 981 581 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC N° REGISTRO 15007EHCO53, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007V5G05B, EL 21/04/2005

DENSIDAD Y HUMEDAD "IN SITU" POR EL MÉTODO NUCLEAR ASTM D 2922/96 - ASTM D 3017/96

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO Nº: 34015/763S1204
FECHA: 15/06/2011
Hoja: 1/1

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA

CONTRATISTA:

OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO

LOCALIZACION TOMA DE MUESTRA: 15/06/11; BASE ZAHORRA. RUA B-2 CD

TIPO DE MUESTRA: ZAHORRA

SITUACIÓN DEL ENSAYO	DENSIDAD HÚMEDA (g/cm ³)	HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA (g/cm ³)	COMPACTACIÓN	
				OBTENIDA (%)	PROCTOR DE REFERENCIA
Pk 0+220 CENTRO	2,519	6,6	2,363	101,0	1
Pk 0+240 M.D	2,534	6,8	2,373	101,4	1
Pk 0+260 CENTRO	2,541	7,0	2,375	101,5	1
Pk 0+280 M.I	2,643	7,1	2,468	105,5	1
Pk 0+300 CENTRO	2,634	7,6	2,448	104,6	1
Pk 0+320 M.D	2,635	6,9	2,465	105,3	1
Pk 0+340 CENTRO	2,565	8,5	2,364	101,0	1
Pk 0+360 M.I	2,578	7,3	2,403	102,7	1
Pk 0+380 CENTRO	2,599	6,5	2,440	104,3	1

PROCTOR DE REFERENCIA	1	2	3
	MODIFICADO		
DENSIDAD	2,340		
HUMEDAD	7,2		

OBSERVACIONES: Ensayo realizado a la profundidad de 15,0 cm

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1°, 2°, 4° y 5°. 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. PH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

**DENSIDAD Y HUMEDAD "IN SITU" POR EL
MÉTODO NUCLEAR
ASTM D 2922/96 - ASTM D 3017/96**

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO N°: 34015/764S1205
FECHA: 15/06/2011
Hoja: 1/1

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA
CONTRATISTA:
OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO
LOCALIZACION TOMA DE MUESTRA: 15/06/11; BASE ZAHORRA. RUA B-2. CI
TIPO DE MUESTRA: ZAHORRA

SITUACIÓN DEL ENSAYO	DENSIDAD HÚMEDA (g/cm ³)	HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA (g/cm ³)	COMPACTACIÓN	
				OBTENIDA (%)	PROCTOR DE REFERENCIA
Pk 0+020 CENTRO	2,626	7,1	2,452	104,8	1
Pk 0+040 M.D	2,630	7,4	2,449	104,6	1
Pk 0+060 CENTRO	2,640	6,0	2,491	106,4	1
Pk 0+080 M.I	2,583	6,4	2,428	103,7	1
Pk 0+100 CENTRO	2,512	6,6	2,356	100,7	1
Pk 0+120 M.D	2,603	6,1	2,453	104,8	1
Pk 0+140 CENTRO	2,603	6,3	2,449	104,6	1
Pk 0+160 M.I	2,534	6,0	2,391	102,2	1
Pk 0+180 CENTRO	2,544	7,0	2,378	101,6	1
Pk 0+200 M.D	2,541	6,4	2,388	102,1	1

PROCTOR DE REFERENCIA	1	2	3
	MODIFICADO		
DENSIDAD	2,340		
HUMEDAD	7,2		

OBSERVACIONES: Ensayo realizado a la profundidad de 15,0 cm

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

E Caracterización de los Materiales de Ensayo en Campo

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre
Vía Pasteur, 34-15890 Santiago de Compostela (A Coruña)
Telf: 902 021 911 / 981 581 999 Fax: 981 581 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL
ÁREA EHC N° REGISTRO 15007EHCO53, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007V5G05B, EL 21/04/2005

DENSIDAD Y HUMEDAD "IN SITU" POR EL MÉTODO NUCLEAR ASTM D 2922/96 - ASTM D 3017/96

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO Nº: 34015/765S1206
FECHA: 15/06/2011
Hoja: 1/1

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA

CONTRATISTA:

OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO

LOCALIZACION TOMA DE MUESTRA: 15/06/11; BASE ZAHORRA. RUA B-2. CD

TIPO DE MUESTRA: ZAHORRA

SITUACIÓN DEL ENSAYO	DENSIDAD HÚMEDA (g/cm ³)	HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA (g/cm ³)	COMPACTACIÓN	
				OBTENIDA (%)	PROCTOR DE REFERENCIA
Pk 0+220 CENTRO	2,534	6,8	2,373	101,4	1
Pk 0+240 M.D	2,591	6,5	2,433	104,0	1
Pk 0+260 CENTRO	2,558	8,1	2,366	101,1	1
Pk 0+280 M.I	2,621	8,2	2,422	103,5	1
Pk 0+300 CENTRO	2,530	6,2	2,382	101,8	1
Pk 0+320 M.D	2,542	6,3	2,391	102,2	1
Pk 0+340 CENTRO	2,571	6,7	2,410	103,0	1
Pk 0+360 M.I	2,616	5,8	2,473	105,7	1
Pk 0+380 CENTRO	2,619	6,4	2,461	105,2	1

PROCTOR DE REFERENCIA	1	2	3
	MODIFICADO		
DENSIDAD	2,340		
HUMEDAD	7,2		

OBSERVACIONES: Ensayo realizado a la profundidad de 15,0 cm

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1°, 2°, 4° y 5°. 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. PH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

**DENSIDAD Y HUMEDAD "IN SITU" POR EL
MÉTODO NUCLEAR
ASTM D 2922/96 - ASTM D 3017/96**

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO N°: 34015/671S108
FECHA: 23/05/2011
Hoja: 1/1

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA
CONTRATISTA: SAN JOSE
OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO
LOCALIZACION TOMA DE MUESTRA: 23-5-11 EXPLANADA RUA B-3 C.I
TIPO DE MUESTRA: SUELO

SITUACIÓN DEL ENSAYO	DENSIDAD HÚMEDA (g/cm ³)	HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA (g/cm ³)	COMPACTACIÓN	
				OBTENIDA (%)	PROCTOR REFERENCIA
PK 0+040	2,145	9,5	1,959	98,9	1
PK 0+060	2,232	7,8	2,071	104,6	1
PK 0+080	2,144	8,3	1,980	100,0	1
PK 0+100	2,207	8,1	2,042	103,1	1
PK 0+120	2,168	8,8	1,993	100,6	1
PK 0+140	2,181	9,2	1,997	100,9	1
PK 0+160	2,176	8,4	2,007	101,4	1
PK 0+180	2,186	8,4	2,017	101,8	1
PK 0+200	2,187	7,9	2,027	102,4	1
PK 0+220	2,218	8,0	2,054	103,7	1

PROCTOR DE REFERENCIA	1	2	3
	MODIFICADO		
DENSIDAD	1,980		
HUMEDAD	11,4		

OBSERVACIONES: Ensayo realizado a la profundidad de 15,0 cm

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

277

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1°, 2°, 4° y 5°, 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. PH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

E Caracterización de los Materiales de Ensayo en Campo

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre
Vía Pasteur, 34-15890 Santiago de Compostela (A Coruña)
Telf.: 902 021 911 / 981 581 999 Fax: 981 581 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL
ÁREA EHC N° REGISTRO 15007EHCO53, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007V5G05B, EL 21/04/2005

DENSIDAD Y HUMEDAD "IN SITU" POR EL MÉTODO NUCLEAR ASTM D 2922/96 - ASTM D 3017/96

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO N°: 34015/709S1136
FECHA: 03/06/2011
Hoja: 1/1

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA
CONTRATISTA: SAN JOSE
OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO
LOCALIZACION TOMA DE MUESTRA: 03/06/2011-EXPLANADA RUA B 2
TIPO DE MUESTRA: SUELO

SITUACIÓN DEL ENSAYO	DENSIDAD HÚMEDA (g/cm ³)	HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA (g/cm ³)	COMPACTACIÓN	
				OBTENIDA (%)	PROCTOR REFERENCIA
PK 0+020 CD	2,076	7,2	1,937	101,4	1
PK 0+040 CD	2,135	7,6	1,984	103,9	1
PK 0+020 CD	2,079	7,3	1,938	101,4	1
PK 0+020 CI	2,152	7,6	2,000	104,7	1

PROCTOR DE REFERENCIA	1	2	3
	MODIFICADO		
DENSIDAD	1,910		
HUMEDAD	12,0		

OBSERVACIONES: Ensayo realizado a la profundidad de 15,0 cm

JEFE DE ÁREA

Paulino RIVAS GARCÍA

DIRECTORA DEL LABORATORIO

Cristina PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1°, 2°, 4° y 5°. 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. PH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

**CONTENIDO DE YESOS
EN SUELO
NLT 115/99**

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO N°: 34015/38S172
FECHA: 22/03/2010
Hoja: 1/1

PETICIONARIO: XESTUR CORUÑA
CONTRATISTA:
OBRA: URBANIZACIÓN PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA - SANTIAGO
FECHA Y SITIO DE TOMA DE MUESTRA: 15-03-10 RUA B - 3 - 0+200
TIPO DE MUESTRA: SUELO
RESULTADOS OBTENIDOS:

CONTENIDO TOTAL EN SULFATOS(SO ₄) ²⁻	0,074	%
CONTENIDO PARCIAL DE SULFATOS (SO ₄) ²⁻	0,054	%
CONTENIDO EN YESOS(CaSO ₄ 2H ₂ O)	0,037	%

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

PAULINO RIVAS GARCIA

DIRECTOR DE LABORATORIO

CRISTINA PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1º, 2º, 4º y 5º, 03070EHA05. **GTC:** Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. **GTL:** Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. **VSG:** Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. **EAP:** Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. **EAS:** Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. **AFC:** Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. **AFH:** Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. **ACC:** Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. **ACH:** Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. **APC:** Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. **APH:** Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. **AMC:** Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre
 Vía Pasteur, 34 - 15890 Santiago de Compostela (A Coruña)
 Teléf.: 902 021 911 / 981 561 999 Fax: 981 561 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC, N° REGISTRO 15007EHC05B, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007VSG05B, EL 21/04/2005

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO UNE 103101/95

LABORATORIO: SANTIAGO
 ENSAYO N°: 34015/38S175
 FECHA: 18/03/2010
 HOJA: 1 de 1

PETICIONARIO: XESTUR
 CONTRATISTA: CONSTRUCTORA SAN JOSÉ S.A
 OBRA: URBANIZACIÓN DO PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA -SANTIAGO
 LOCALIZACION TOMA DE MUESTRA: 15-03-10 RUA B - 3 - 0+200
 TIPO DE MUESTRA: SUELO

TAMIZ UNE 7050-2	% Que pasa
100	100,0
80	100,0
63	100,0
50	100,0
40	100,0
25	100,0
20	97,7
12,5	82,5
10	77,2
6,3	65,9
5	61,8
2	48,3
1,25	41,0
0,4	29,0
0,16	19,6
0,08	15,7

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

PAULINO RIVAS GARCIA

DIRECTOR DEL LABORATORIO

CRISTINA PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1º, 2º, 4º y 5º, 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. APH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

**GEOTECNIA. ENSAYO DE
COMPACTACIÓN UNE
103500/94 - UNE 103501/94**

Laboratorio: SANTIAGO
Ensayo n.º: 34015/38S173
Fecha: 17/03/2010

PETICIONARIO: XESTUR
CONTRATISTA: CONSTRUCTORA SAN JOSÉ S.A.
OBRA: URBANIZACIÓN DO PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA -SANTIAGO
LOCALIZACION: 15-03-10 RUA B - 3 - 0+200
MUESTRA: SUELO

PROCTOR	MODIFICADO
VOLUMEN MOLDE (cm ³)	2320
PESO MAZA (g)	4,53
ALTURA DE CAIDA (cm)	45,7
Nº DE CAPAS	5
Nº GOLPES POR CAPA	60
TIPO DE COMPACTADORA	AUTOMÁTICA
MATERIAL UTILIZADO (%)	97,7

DENSIDAD MÁXIMA	g/cm ³	1,79
HUMEDAD ÓPTIMA	%	13,84

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

PAULINO RIVAS GARCIA

DIRECTOR DE LABORATORIO

CRISTINA PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1º, 2º, 4º y 5º, 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. APH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre
Vía Pasteur, 34 - 15890 Santiago de Compostela (A Coruña)
Tel.: 902 021 911 / 981 561 999 Fax: 981 561 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC, N° REGISTRO 15007EHC05B, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007VSG05B, EL 21/04/2005

**CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA
OXIDABLE POR EL MÉTODO DEL
PERMANGANATO POTÁSICO
UNE EN 103204/93**

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO N°: 34015/38S174
FECHA: 22/03/2010

PETICIONARIO: XESTUR
CONTRATISTA: CONSTRUCTORA SAN JOSÉ S.A
OBRA: URBANIZACIÓN DO PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA -SANTIAGO
FECHA Y SITIO DE TOMA DE MUESTRA: 15-03-10 RUA B - 3 - 0+200
TIPO DE MUESTRA: SUELO
RESULTADOS OBTENIDOS:

CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA: 0,27 %

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

PA
PAULINO RIVAS GARCIA

DIRECTOR DE LABORATORIO

CRISTINA PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1º, 2º, 4º y 5º, 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. APH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE
LÍQUIDO Y PLÁSTICO DE UN
SUELO**

UNE 103103/94 - UNE 103104/93

Laboratorio: SANTIAGO
Ensayo n°: 34015/38S177
Fecha: 24/03/2010

PETICIONARIO: XESTUR
CONTRATISTA: CONSTRUCTORA SAN JOSÉ S.A
OBRA: URBANIZACIÓN DO PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA -SANTIAGO
LOCALIZACIÓN: 15-03-10 RUA B - 3 - 0+200
MUESTRA: SUELO

LÍMITE LÍQUIDO	NO LÍQUIDO
LÍMITE PLÁSTICO	NO PLÁSTICO

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA
PAULINO RIVAS GARCIA

DIRECTOR DE LABORATORIO
CRISTINA PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1º, 2º, 4º y 5º, 03070EHA05. **GTC:** Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. **GTL:** Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. **VSG:** Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. **EAP:** Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. **EAS:** Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. **AFC:** Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. **AFH:** Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. **ACC:** Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. **ACH:** Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. **APC:** Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. **APH:** Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. **AMC:** Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre
Vía Pasteur, 34 - 15890 Santiago de Compostela (A Coruña)
Telf.: 902 021 911 / 981 561 999 Fax: 981 561 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC, N° REGISTRO 15007EHC05B, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007VSG05B, EL 21/04/2005

**DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE
SALES SOLUBLES DE UN SUELO
UNE 103205/06**

LABORATORIO: SANTIAGO
ENSAYO N°: 34015/38S178
FECHA: 23/03/2010

PETICIONARIO: XESTUR
CONTRATISTA: CONSTRUCTORA SAN JOSÉ S.A
OBRA: URBANIZACIÓN DO PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA -SANTIAGO
FECHA Y SITIO DE TOMA DE MUESTRA: 15-03-10 RUA B - 3 - 0+200
TIPO DE MUESTRA: SUELO
RESULTADOS OBTENIDOS:

CONTENIDO EN SALES SOLUBLES: 0,11 %

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

PAULINO RIVAS GARCIA

DIRECTOR DE LABORATORIO

CRISTINA PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1º, 2º, 4º y 5º, 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. APH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

**ENSAYO C.B.R.
DE LABORATORIO
UNE 103502/95**

Laboratorio: SANTIAGO
Ensayo n°: 34015/38S176
Fecha: 18/03/2010

PETICIONARIO: XESTUR
CONTRATISTA: CONSTRUCTORA SAN JOSÉ S.A
OBRA: URBANIZACIÓN DO PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA -SANTIAGO
LOCALIZACIÓN: 15-03-10 RUA B - 3 - 0+200
MUESTRA: SUELO

PROCTOR MODIFICADO	Densidad	g/cm³	1,79
	Humedad	%	13,8
SOBRECARGA UTILIZADA		kg	8

Determinación	Expresión Resultados	Punto 1
Densidad Seca	g/cm³	1,79
Humedad	%	14,5
Absorción	%	3,0
Hinchamiento	%	0,5
ÍNDICE C.B.R.		41

% Compactación Próctor de Referencia	100
Densidad (g/cm³)	1,79
Índice C.B.R.	41

E Caracterización de los Materiales de Ensayo en Campo

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre
Via Pasteur, 34 - 15890 Santiago de Compostela (A Coruña)
Telf.: 902 021 911 / 981 561 999 Fax: 981 561 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC, N° REGISTRO 15007EHC05B, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007VSG05B, EL 21/04/2005

Hoja: 2/2

Laboratorio: SANTIAGO
Ensayo n°: 34015/38S176
Fecha: 18/03/2010

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

PAULINO RIVAS GARCIA

DIRECTOR DE LABORATORIO

CRISTINA PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1º, 2º, 4º y 5º, 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. APH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

ANEXO CLASIFICACION MUESTRAS

*** Muestra referencia: 34015/38S172-173-174-175-176-177-178-196**

De acuerdo a las prescripciones del PG-3 y según los resultados de los ensayos analizados a petición del cliente, la muestra de referencia se clasifica como:

"SUELO ADECUADO"

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre
 Vía Pasteur, 34 - 15890 Santiago de Compostela (A Coruña)
 Telf.: 902 021 911 / 981 561 999 Fax: 981 561 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC, N° REGISTRO 15007EHC05B, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007VSG05B, EL 21/04/2005

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO UNE 103101/95

LABORATORIO: SANTIAGO
 ENSAYO N°: M-6
 FECHA: 04/02/2010
 HOJA: 1 de 1

PETICIONARIO: XESTUR
 CONTRATISTA: CONSTRUCTORA SAN JOSÉ S.A
 OBRA: URBANIZACIÓN DO PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA -SANTIAGO
 LOCALIZACION TOMA DE MUESTRA: 01/02/2010-PK 0+080-RUA B-3 - COTA 2
 TIPO DE MUESTRA: SUELO

TAMIZ UNE 7050-2	% Que pasa
100	100,0
80	100,0
63	100,0
50	100,0
40	100,0
25	100,0
20	100,0
12,5	92,9
10	87,6
6,3	78,3
5	75,7
2	65,3
1,25	56,5
0,4	39,4
0,16	25,6
0,08	18,1

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

PAULINO RIVAS GARCIA

DIRECTOR DEL LABORATORIO

CRISTINA PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1º, 2º, 4º y 5º, 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en vias, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. APH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albanilería, 03082AMC05.

**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE
LÍQUIDO Y PLÁSTICO DE UN
SUELO**

UNE 103103/94 - UNE 103104/93

Laboratorio: SANTIAGO
Ensayo n°: M-6
Fecha: 11/02/2010

PETICIONARIO: XESTUR
CONTRATISTA: CONSTRUCTORA SAN JOSÉ S.A
OBRA: URBANIZACIÓN DO PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA -SANTIAGO
LOCALIZACION: 01/02/2010-PK 0+080-RUA B-3 - COTA 2
MUESTRA: SUELO

LÍMITE LÍQUIDO	NO LÍQUIDO
LÍMITE PLÁSTICO	NO PLÁSTICO

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

PAULINO RIVAS GARCIA

DIRECTOR DE LABORATORIO

CRISTINA PEINÓ ÁLVAREZ

E Caracterización de los Materiales de Ensayo en Campo

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre

Vía Pasteur, 34 - 15890 Santiago de Compostela (A Coruña)

Tel.: 902 021 911 / 981 561 999 Fax: 981 561 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC, N° REGISTRO 15007EHC05B, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007VSG05B, EL 21/04/2005

Hoja: 1/2

ENSAYO C.B.R. DE LABORATORIO UNE 103502/95

Laboratorio: SANTIAGO

Ensayo n°: M-6

Fecha: 08/02/2010

PETICIONARIO: XESTUR

CONTRATISTA: CONSTRUCTORA SAN JOSÉ S.A

OBRA: URBANIZACIÓN DO PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA -SANTIAGO

LOCALIZACION: 01/02/2010-PK 0+080-RUA B-3 - COTA 2

MUESTRA: SUELO

PROCTOR MODIFICADO	Densidad	g/cm³	1,89
	Humedad	%	13,7
SOBRECARGA UTILIZADA		kg	8

Determinación	Expresión Resultados	Punto 1
Densidad Seca	g/cm³	1,89
Humedad	%	13,3
Absorción	%	1,3
Hinchamiento	%	0,8
ÍNDICE C.B.R.		16

% Compactación Próctor de Referencia	100
Densidad (g/cm³)	1,89
Índice C.B.R.	16

Euroconsult S.A. - Registro Mercantil de Madrid. Tomo 2.386 General. 1.741 Sección 3ª del Libro de Sociedades. Folio 70. Hoja 15.078. Inscripción 1ª - C.I.F.: A-28217735 - Se prohíbe la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización de Euroconsult S.A. En el caso de que las muestras no hayan sido tomadas directamente por Euroconsult S.A. los resultados de estos ensayos afectan únicamente a las muestras ensayadas. Euroconsult S.A. no se hace responsable en ningún caso, de la interpretación o uso indebido de este documento.

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1º, 2º, 4º y 5º, 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. APH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

Hoja: 2/2

Laboratorio: SANTIAGO
Ensayo nº: M-6
Fecha: 08/02/2010

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

PAULINO RIVAS GARCIA

DIRECTOR DE LABORATORIO

CRISTINA PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1º, 2º, 4º y 5º, 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. APH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albanilería, 03082AMC05.

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre
Vía Pasteur, 34 - 15690 Santiago de Compostela (A Coruña)
Telf.: 902 021 911 / 981 561 999 Fax: 981 561 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC, N° REGISTRO 15007EHCO5B, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007VSG05B, EL 21/04/2005

**CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA
OXIDABLE POR EL MÉTODO DEL
PERMANGANATO POTÁSICO
UNE EN 103204/93**

LABORATORIO: SANTIAGO

ENSAYO N°: M-6

FECHA: 10/02/2010

PETICIONARIO: XESTUR

CONTRATISTA: CONSTRUCTORA SAN JOSÉ S.A

OBRA: URBANIZACIÓN DO PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA -SANTIAGO

FECHA Y SITIO DE TOMA DE MUESTRA: 01/02/2010-PK 0+080-RUA B-3 - COTA 2

TIPO DE MUESTRA: SUELO

RESULTADOS OBTENIDOS:

CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA: 0,39 %

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

PAULINO RIVAS GARCIA

DIRECTOR DE LABORATORIO

CRISTINA PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1º, 2º, 4º y 5º, 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. APH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

**DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE
SALES SOLUBLES DE UN SUELO
UNE 103205/06**

LABORATORIO: SANTIAGO

ENSAYO N°: M-6

FECHA: 10/02/2010

PETICIONARIO: XESTUR

CONTRATISTA: CONSTRUCTORA SAN JOSÉ S.A

OBRA: URBANIZACIÓN DO PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA -SANTIAGO

FECHA Y SITIO DE TOMA DE MUESTRA: 01/02/2010-PK 0+080-RUA B-3 - COTA 2

TIPO DE MUESTRA: SUELO

RESULTADOS OBTENIDOS:

CONTENIDO EN SALES SOLUBLES: 0,14 %

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

PAULINO RIVAS GARCIA

DIRECTOR DE LABORATORIO

CRISTINA PEINÓ ÁLVAREZ

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1º, 2º, 4º y 5º, 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. APH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albanilería, 03082AMC05.

E Caracterización de los Materiales de Ensayo en Campo

Euroconsult S.A. - Polígono Industrial El Tambre
Via Pasteur, 34 - 15890 Santiago de Compostela (A Coruña)
Telf.: 902 021 911 / 981 561 999 Fax: 981 561 809 - www.euroconsult.es

LABORATORIOS ACREDITADOS POR XUNTA DE GALICIA SEGÚN LA ORDEN FOM/2060/2002 EN EL ÁREA EHC, N° REGISTRO 15007EHC05B, Y EL ÁREA VSG, N° REGISTRO 15007VSG05B, EL 21/04/2005

GEOTECNIA. ENSAYO DE COMPACTACIÓN UNE 103500/94 - UNE 103501/94

Laboratorio: SANTIAGO
Ensayo n°: M-6
Fecha: 08/02/2010

PETICIONARIO: XESTUR
CONTRATISTA: CONSTRUCTORA SAN JOSÉ S.A
OBRA: URBANIZACIÓN DO PARQUE EMPRESARIAL DE A SIONLLA -SANTIAGO
LOCALIZACION: 01/02/2010-PK 0+080-RUA B-3 - COTA 2
MUESTRA: SUELO

PROCTOR	MODIFICADO
VOLUMEN MOLDE (cm ³)	2320
PESO MAZA (g)	4,53
ALTURA DE CAIDA (cm)	45,7
N° DE CAPAS	5
N° GOLPES POR CAPA	60
TIPO DE COMPACTADORA	AUTOMÁTICA
MATERIAL UTILIZADO (%)	100

DENSIDAD MÁXIMA	g/cm ³	1,89
HUMEDAD ÓPTIMA	%	13,72

OBSERVACIONES:

JEFE DE ÁREA

PAULINO RIVAS GARCIA

DIRECTOR DE LABORATORIO

CRISTINA PEINÓ ÁLVAREZ

294

ACREDITACIONES LABORATORIO CENTRAL:

EHA: Control de hormigón, sus componentes y de las armaduras de acero, básicos y complementarios 1º, 2º, 4º y 5º, 03070EHA05. GTC: Sondeos para reconocimientos geotécnicos, 03071GTC05. GTL: Ensayos de laboratorio de geotecnia, básicos y complementarios, 03072GTL05. VSG: Suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales, básicos y complementarios, 03073VSG05. EAP: Control de perfiles de acero para estructuras, básicos y complementarios, 0374EAP05. EAS: Control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, básico y complementarios, 03075EAS05. AFC: Control de los materiales de fábricas de piezas de cerámica, 03076AFC05. AFH: Control de los materiales de fábricas de piezas de hormigón, 03077AFH05. ACC: Control de los materiales de cubiertas de piezas de cerámica, 03078ACC05. ACH: Control de los materiales de cubiertas de piezas de hormigón, 03079ACH05. APC: Control de los materiales de pavimentos de piezas de cerámica, 03080APC05. APH: Control de los materiales de pavimentos de piezas de hormigón, 03081APH05. AMC: Control de morteros para albañilería, 03082AMC05.

ANEXO CLASIFICACION MUESTRAS

*** Muestra referencia: Muestra M-6**

De acuerdo a las prescripciones del PG-3 y según los resultados de los ensayos analizados a petición del cliente, la muestra de referencia se clasifica como:

“SUELO ADECUADO”

ANEJO F

Calibración de los Dispositivos de Medida en Campo

Este anejo incluye los informes técnicos de calibración de los instrumentos de medición utilizados en los ensayos de campo.

F Calibración de los Dispositivos de Medida en Campo

% ELEMENTOS GRUESO - MUESTRA PARA CALIBRAR SONDAS

muestra	peso TF	peso E.G.	2-4 mm	4-8 mm	8-1/2inch	>1/2 inch	2-4 mm	4-8 mm	8-1/2inch	>1/2 inch	Total E.G.
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
ZAHORRA	2625,49	2444,51	670,93	814,85	958,73	0,00	13,23	16,07	18,91	0,00	48
MATERIAL-2	4538,38	2051,62	927,89	773,03	350,70	0,00	14,08	11,73	5,32	0,00	31
				0,36			0,1323				
				0,48							
				0,31							

% ELEMENTOS GRUESO - MUESTRA IN SITU

muestra	peso TF	peso E.G.	2-4 mm	4-8 mm	8-1/2inch	>1/2 inch	2-4 mm	4-8 mm	8-1/2inch	>1/2 inch	Total E.G.	
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
ZAHORRA	2625,49	7484,51	670,93	814,85	958,73	5040,00	6,64	8,06	9,48	50	74	24
MATERIAL-2	4538,38	3791,62	927,89	773,03	350,70	1740,00	11,14	9,28	4,21	21	46	25

EG incluidos en la muestra
de calibracion

BOLETÍN PARA CALIBRACIÓN

DATOS MUESTRA

Fecha: 26/07/2011
Cod. Muestra/Boletín núm.
Referencia cliente: zahorra A
Equipo de medida: sensor 10HS, data-logger Em5b (Decagon Devices, Inc.)
Norma:

Determinación solicitada:
PATRÓN-CAL
Análisis complementarios:

Localización:
Fecha Entrada:
Fecha Inicio:
Tipo material:

Observaciones:

Dtor. Análisis: Dr. Carles Rubio

Dtor. Técnico: Dr. Francesc Ferrer

CENTRE ASSESSORIA
DR. FERRER S.L.
CIF: 061994620
c/ Ferran el Catòlic, 3
25200 CERVERA

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA

Granulometría

Arena ($50 < D < 2000 \mu\text{m}$):	%	Cont. Materia Orgánica:	%
Limo ($2 < D < 50 \mu\text{m}$):	%	pH (ext. 1:2,5 H ₂ O):	
Arcilla ($D < 2 \mu\text{m}$):	%	Cond. Elect (ext. 1:2,5 H ₂ O):	dS·m ⁻¹
Clase textural USDA:		Carbonato cálcico equiv.:	%
Cont. Elementos Gruesos (2ϕ 12,7 mm):	14 % en volumen		
Densidad aparente de la muestra:	1,91 Mg·m ⁻³		

ANÁLISIS

raw counts	humedad [m ³ ·m ⁻³]	Comentarios
910,00	0,02	
965,00	0,07	
1152,00	0,22	

Polinomio de ajuste:
 $yf(x) = 0,0008 \cdot x - 0,7206$

Coefficiente ajuste:
 $r^2 = 0,9983$

Los resultados obtenidos sólo dan fé de la muestra analizada

VERSION 6

Grupo_San_Jose_zahorra_A[1]

pág. 1 / 4

LabFerrer

Laboratorio de Análisis de Propiedades Térmicas y Propiedades Hidráulicas
Protocolo de Trabajo basado en Methods for Measurement of Soil Water Capacitance Devices (2002)

Centro de Asesoría Dr Ferrer SL
CIF: B-61994620
c/ Ferran el Catòlic, 3
25200 CERVERA (LLEIDA)
Tel.: 973 532 110
info@lab-ferrer.com
www.lab-ferrer.com

BOLETÍN DE ANÁLISIS

DATOS MUESTRA

Fecha: 13-dic-11
Cod. Muestra/Boletín núm. 1211.172
Referencia cliente: zahorra
Equipo de medida: sensor 10-HS, data-logger Em-50 (Decagon Devices, Inc.)
Norma:

Determinación solicitada:
CALIBRACIÓN SONDA CAPACITIVA - Modelo 10HS
Análisis complementarios:

Localización:
Fecha Entrada: 29-nov-11
Fecha Inicio: 07-dic-11
Tipo material: material relleno y asiento

Observaciones:
Muestra suministrada por Grupo San José. No se facilitaron informaciones de campo.

Dtor. Análisis: Dr. Carles Rubio

Dtor. Técnico: Dr. Francesc Ferrer

CARACTERIZACIÓN FÍSICA y QUÍMICA

Granulometría

Arena ($50 < D < 2000 \mu\text{m}$):	%	Cont. Materia Orgánica:	%
Limo ($2 < D < 50 \mu\text{m}$):	%	pH (ext. 1:2,5 H ₂ O):	
Arcilla ($D < 2 \mu\text{m}$):	%	Cond. Elect (ext. 1:2,5 H ₂ O):	dS·m ⁻¹
Clase textural USDA:		Carbonato cálcico equiv.:	%
Cont. E.G. muestra original ($2 < \phi < 12,5\text{mm}$):	24 % en peso sobre peso seco de finos+EG Totales $\phi > 2\text{mm}$		
Cont. E.G. muestra original ($\phi > 12,5\text{mm}$):	50 % en peso sobre peso seco de finos+EG Totales $\phi > 2\text{mm}$		

ANÁLISIS

Preparación muestra: tamizada a 8 mm y recompactada

	1431	adim.	Comentarios
Raw count máximo:	0,22	[m ³ ·m ⁻³]	+ humedad
Contenido hídrico para Raw máximo:	877	adim.	
Raw count mínimo:	0,04	[m ³ ·m ⁻³]	- humedad
Contenido hídrico para Raw mínimo:	1,56	Mg·m ⁻³	
D.Ap.sms promedio ensayo:			
Cont. E.G. muestra analizada ($2 < \phi < 8\text{mm}$):	36 % en peso sobre peso seco de finos+EG $2 < \phi < 8\text{mm}$		

RAW counts	VWC [m ³ ·m ⁻³]	*D.Ap.sms (Mg·m ⁻³)	Ecuación calibración
1431	0,22	1,72	VWC = (10 ⁻¹⁰ ·RAW ³)+(10 ⁻⁷ ·RAW ²)-(0.0004·RAW)+0.2206
1350	0,17	1,77	
1312	0,15	1,78	
1031	0,06	1,74	
877	0,04	1,74	

Coefficiente de ajuste
R² = 1,000

VERSIÓN 6

1211.172_GSJose_zahorra-1

pág. 1 / 2

Los resultados obtenidos sólo dan fé de la muestra analizada. Humedad (adapt. UNE-EN 1097-5): muestra entera

LabFerrer

Laboratorio de Análisis de Propiedades Térmicas y Propiedades Hidráulicas
Protocolo de Trabajo basado en Methods for Measurement of Soil Water Capacitance Devices (2002)

Centro de Asesoría Dr Ferrer SL
CIF: B-61994620
c/ Ferran el Catòlic, 3
25200 CERVERA (LLEIDA)
Tel.: 973 532 110
info@lab-ferrer.com
www.lab-ferrer.com

BOLETÍN DE ANÁLISIS

DATOS MUESTRA

Fecha: 13-dic-11
Cod. Muestra/Boletín núm. 1211.173
Referencia cliente: material-2
Equipo de medida: sensor 10-HS, data-logger Em-50 (Decagon Devices, Inc.)
Norma:

Determinación solicitada:
CALIBRACIÓN SONDA CAPACITIVA - Modelo 10HS
Análisis complementarios:

Localización:
Fecha Entrada: 29-nov-11
Fecha Inicio: 10-dic-11
Tipo material: material relleno y asiento

Observaciones:
Muestra suministrada por Grupo San José. No se facilitaron informaciones de campo.

Dtor. Análisis: Dr. Carles Rubio

Dtor. Técnico: Dr. Francesc Ferrer

CARACTERIZACIÓN FÍSICA y QUÍMICA

Granulometría

Arena ($50 < D < 2000 \mu\text{m}$):	%	Cont. Materia Orgánica:	%
Limo ($2 < D < 50 \mu\text{m}$):	%	pH (ext. 1:2,5 H ₂ O):	
Arcilla ($D < 2 \mu\text{m}$):	%	Cond. Elect (ext. 1:2,5 H ₂ O):	dS·m ⁻¹
Clase textural USDA:		Carbonato cálcico equiv.:	%
Cont. E.G. muestra original ($2 < \phi < 12,5\text{mm}$):	25 % en peso sobre peso seco de finos+EG Totales $\phi > 2\text{mm}$		
Cont. E.G. muestra original ($\phi > 12,5\text{mm}$):	21 % en peso sobre peso seco de finos+EG Totales $\phi > 2\text{mm}$		

ANÁLISIS

Preparación muestra: tamizada a 12.5 mm y recompactada

			Comentarios
Raw count máximo:	1256	adim.	
Contenido hídrico para Raw máximo:	0,15	[m ³ ·m ⁻³]	+ humedad
Raw count mínimo:	821	adim.	
Contenido hídrico para Raw mínimo:	0,06	[m ³ ·m ⁻³]	- humedad
D.Ap.sms promedio ensayo:	1,56	Mg·m ⁻³	
Cont. E.G. muestra analizada ($2 < \phi < 12,5\text{mm}$):	31 % en peso sobre peso seco de finos+EG $2 < \phi < 12,5\text{mm}$		

RAW counts	VWC [m ³ ·m ⁻³]	*D.Ap.sms (Mg·m ⁻³)	Ecuación calibración
1256	0,15	1,53	VWC = (2·10 ⁻⁹ ·RAW ³)-(7·10 ⁻⁶ ·RAW ²)+(0.0079·RAW)-2.72
1131	0,12	1,54	
999	0,10	1,55	
883	0,09	1,59	
821	0,06	1,60	

Coefficiente de ajuste
R² = 0,993

VERSIÓN 6

1211.173_GSJose_mat-2

pág. 1 / 2

Los resultados obtenidos sólo dan fé de la muestra analizada. Humedad (adapt. UNE-EN 1097-5): muestra entera

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Owner: Applus, Spain	Date of calibration: 12 Jan 2012
Type No.: PRI 2100	Next calibration, geophones: 12 Jan 2013
Serial No.: 0211-080	Next calibration, load cell: 12 Jan 2013
	Next calibration, temp. sensors: 12 Jan 2013
	Calibrated by: MHI

To Whom It May Concern:

We, Grontmij A/S, Pavement Consultants, Kokbjerg 5, DK-6000 Kolding, hereby certify that FWD PRI 2100 with serial number 0211-080 property of Applus, Spain has been calibrated and inspected on 12 January 2012 at the Grontmij calibration station, Kokbjerg 5, DK-6000 Kolding, Denmark.

The calibration was performed in accordance with authorized and approved standards (CROW specifications and Grontmij standards) and we confirm that a true and correct calibration has been achieved.

Calibration details appear from the calibration documents held by Applus, Spain.

Traceability:

The calibration is traceable to DANAK lab certificate 9.1K-0835, and DANAK certificate 22-373483. The calibration is made 14 December 2010.

Signature:

Michael Henriksen
Technician

Grontmij A/S
Pavement Consultants
Kokbjerg 5
6000 Kolding
Denmark

Grontmij A/S
Pavement Consultants
Kokbjerg 5
DK-6000 Kolding
T +45 8228 1400 • F +45 8228 1401

Signature and stamp

Pavement Consultants

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Owner: Applus, Spain	Date of calibration: 12 Jan 2012
Type No.: PRI 2100	Next calibration, geophones: 12 Jan 2013
Serial No.: 0211-080	Next calibration, load cell: 12 Jan 2013
	Next calibration, temp. sensors: 12 Jan 2013
	Calibrated by: MHI

GAIN ADJUSTMENT

Geophone	Cut-off frequency	Offset	Slope
1	4,80785326	-8,51750000	10,80663636
2	4,67619339	1,28300000	10,95000000
3	4,49061991	7,66900000	11,20463636
4	4,64680199	0,22750000	10,97772727
5	4,79532137	-10,92900000	10,72972727
6	4,66736089	18,95200000	10,93154545
7	4,74201293	7,57450000	10,86345455
8	4,90824746	-5,34200000	10,61645455
9	4,71195721	0,82100000	10,92890909
Load cell		136,53437300	0,02384034
Air temperature sensor		199	0,00312645
Surface temp. sensor		808	0,00311765
Manual temp. sensor		686	0,00312326

Traceability:

The calibration is traceable to DANAK lab certificate 9.1K-0835, and DANAK certificate 22-373483. The calibration is made 14 December 2010.

Signature:

Michael Henriksen
Technician

Grontmij A/S
Pavement Consultants
Kokbjerg 5
6000 Kolding
Denmark

Grontmij A/S
Pavement Consultants
Kokbjerg 5
DK-6000 Kolding
T +45 8228 1400 • F +45 8228 1401

Signature and stamp

Grontmij**Pavement Consultants****CERTIFICATE OF CALIBRATION**

Owner: APPLUS	Date of calibration: 15 February 2012
Type no.: PRIMAX 2500	Next calibration, geophones: 15 February 2013
Serial no.: 304	Next calibration, load cell: 15 February 2013
	Calibrated by: MHI

To Whom It May Concern:

We, Grontmij A/S Kokbjerg 5, DK-6000 Kolding, Denmark, hereby certify that FWD PRIMAX 2500 with serial number 304 property of APPLUS, Spain has been calibrated and inspected on 15 February 2012 onsite at Applus, A Coruña, Spain.

The calibration was performed in accordance with authorized and approved standards (SHRP, CROW and Carl specifications Bro standards) and we confirm that a true and correct calibration has been achieved.

Traceability:

The calibration is traceable to FHWA-LTPP Calibration Quality Assurance to be compliant with the guidance and procedures set forth by the AASHTO R32 FWD Calibration Protocol

Through calibration Equipment:

Keithley KUSB DAQ board S/N: 1142332

Reference Load Cell S/N: GCB01

Silicon Designs $\pm$ 5g Accelerometer S/N: 9087

With ref to SHRP Calibration Center certificate from 2 March 2011, issued by Cornell Local Roads Program, US.

Signature:

Grontmij A/S
Pavement Consultants
Kokbjerg 5
6000 Kolding
Denmark

Grontmij A/S
Pavement Consultants
Kokbjerg 5
DK-6000 Kolding
Michael Hemmelsen 45 8228 1401
Technician

Grontmij Pavement Consultants		CERTIFICATE OF CALIBRATION	
Owner: APPLUS		Date of calibration: 15 February 2012	
Type no.: PRIMAX 2500		Next calibration, geophones: 15 February 2013	
Serial no.: 304		Next calibration, load cell: 15 February 2013	
		Calibrated by: MHI	
GAIN ADJUSTMENT			
Geophone	Cut-off frequency	Gain/slope	Relative gain
1	4.77848681	35111	1
2	4.75276159	35511	1
3	4.66610174	35969	1
4	4.541901	36811	1
5	4.61647162	36307	1
6	4.76795889	36307	1
7	4.55679019	36784	1
8	4.70573936	36608	1
9	4.62019332	35430	1
10	4.51871244	36591	1
11	4.70914676	35724	1
12	4.65907036	36252	1
13	Not used	Not used	Not used
14	Not used	Not used	Not used
15	Not used	Not used	Not used
16	Not used	Not used	Not used
17	Not used	Not used	Not used
Loadcell	---	49.11463624	1
Signature: Grontmij A/S Pavement Consultants Kokbjerg 5 6000 Kolding Denmark		Grontmij A/S Pavement Consultants Kokbjerg 5 DK-6000 Kolding T +45 8228 1400 F +45 8228 1401 Michael Henriksen Technician	

Customer
 Aplus
FWD Number
 403
Name of operator:
 MHI
Date:
 16. februar 2012
Offset value:
 200
Slope value:
 49,11463624

mm	Reference (kN)	PR1 (kN)	Difference (%)
50	62,96	63,1	-0,2219%
50	62,82	63	-0,2857%
100	68,84	69,1	-0,3763%
100	68,89	69	-0,1594%
150	74,67	74,7	-0,0402%
150	74,01	74,1	-0,1215%
200	78,54	78,7	-0,2033%
200	79,35	79,5	-0,1887%
250	83,6	83,9	-0,3576%
250	83,05	83,3	-0,3001%
300	88,46	88,6	-0,1580%
300	88,59	89,1	-0,5724%
350	90,09	90,5	-0,4530%
350	90,12	90,7	-0,6395%
400	92,93	93,5	-0,6096%
400	92,92	93,6	-0,7265%

Average
 -0,3383%

Grontmij A/S
 Pavement Consultants
 Kokbjerg 5
 DK-6000 Kolding
 T +45 8228 1400 • F +45 8228 1401
M. Car

Loadcell Calibration

Customer
FWD Number
Name of operator:
Date:
Offset value:
Slope value:

APPLUS
80
MHI
12. januar 2012
136,534373
0,023840348

mm	Reference (kN)	PRI (kN)	Difference (%)
50	25,63	25,47	0,6282%
50	25,66	25,56	0,3912%
100	39,53	39,96	-1,0761%
100	39,5	39,72	-0,5539%
150	50,89	51,13	-0,4694%
150	50,68	50,99	-0,6080%
200	60,62	60,62	0,0000%
200	60,3	60,57	-0,4458%
250	68,85	68,82	0,0436%
250	68,76	68,72	0,0582%
300	75,82	76,28	-0,6030%
300	75,79	76,09	-0,3943%
350	82,96	83,73	-0,9196%
350	82,99	83,11	-0,1444%
400	90,03	89,18	0,9531%
400	90,39	90,66	-0,2978%

Average

-0,2149%

Grontmij A/S
Pavement Consultants
Kokbjerg 5
DK-6000 Kolding
T +45 8228 1400 • F +45 8228 1401

by den

Stacking Tower test

ACCORDING TO CROW.

Drop	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	D(9)	kPa
1	352	353	353	353	353	353	353	353	353	749
2	352	353	353	353	353	353	353	353	353	738
3	352	353	352	352	352	353	352	352	352	741
4	352	352	352	352	352	352	352	352	352	735
5	351	352	352	352	353	353	352	352	352	743
6	351	352	352	351	352	352	352	352	352	734
7	352	352	353	351	352	353	352	352	352	742
8	351	352	352	351	353	352	352	352	352	736
9	355	354	353	353	352	353	353	353	352	742
10	352	352	352	352	352	353	352	352	352	736
11	355	354	353	352	352	353	352	352	352	741
12	353	353	352	353	352	353	353	353	352	734
X	352,4	352,6	352,3	352,0	352,2	352,7	352,2	352,3	352,0	738,4
S	1,4	0,8	0,5	0,6	0,4	0,5	0,4	0,5	0,0	3,5
%	0,4	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,5

Normalized geo vales

Drop	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	D(9)
1	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED
2	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED
3	350,8	351,8	350,8	350,8	350,8	351,8	350,8	350,8	350,8
4	353,6	353,6	353,6	353,6	353,6	353,6	353,6	353,6	353,6
5	348,8	349,8	349,8	349,8	350,8	350,8	349,8	349,8	349,8
6	353,1	354,1	354,1	353,1	354,1	354,1	354,1	354,1	354,1
7	350,3	350,3	351,3	349,3	350,3	351,3	350,3	350,3	350,3
8	352,1	353,1	353,1	353,1	354,2	353,1	353,1	353,1	353,1
9	353,3	352,3	351,3	351,3	350,3	351,3	351,3	351,3	350,3
10	353,1	353,1	353,1	353,1	353,1	354,2	353,1	353,1	353,1
11	353,8	352,8	351,8	350,8	350,8	351,8	350,8	351,8	350,8
12	355,1	355,1	354,1	355,1	354,1	355,1	355,1	355,1	354,1
Xi	352,4	352,6	352,3	352,0	352,2	352,7	352,2	352,3	352,0

Grontmij A/S
Pavement Consultants
Kokbjerg 5
DK-6000 Kolding
T +45 8228 1400 • F +45 8228 1401

M. d. n.

Ri	0,9997	0,9992	1,0000	1,0009	1,0003	0,9989	1,0003	1,0000	1,0009
	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Ri max	1,0009	1,0050							
Ri min	0,9989	0,9950							

Sum X0	352,3									12-jan-12
Sum S0	1,7									MHI

ANEJO G

Revisiones de los Dispositivos de Medida y Visitas Técnicas al Tramo Real de Ensayo

Este anejo incluye los informes realizados tras visitas técnicas e inspecciones realizadas in-situ sobre los instrumentos de medición, así como un análisis pormenorizado por sensor sobre el estado de funcionamiento de los sensores insertados en las distintas capas durante todo el periodo de ensayos.

G.1. Análisis Pormenorizado del Estado de Funcionamiento de los Sensores de Humedad y Temperatura durante el Periodo de Ensayo

Tras el análisis general del funcionamiento de los equipos descrito en el Capítulo 6, se describe a continuación el análisis pormenorizado sobre el funcionamiento y la fiabilidad de los datos que han proporcionado cada uno de los dispositivos de medida insertados en el pavimento.

G.1.1. Sensor 1MD

Desde su puesta en funcionamiento hasta 17/07/2012, no se obtiene ninguna lectura de ninguno de los puertos de medida. A partir de esta fecha, el Port 1 arroja valores un poco altos en torno a 36 % de humedad, el Port 2 da valores negativos, por tanto se descartan dichos datos. El Port 3 de humedad y los dos sensores de temperatura parece que arrojan datos correctos.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13
2	1MD								x		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x

G.1.2. Sensor 1MI

Los dos primeros meses desde el 29/01/2012 hasta el 02/04/2012 se obtiene valores de forma continua y se estiman fiables en todos los puertos. Se dejan de tomar datos de forma continua hasta 03/08/2012, a partir de esa fecha se retoma la tarea y se obtienen datos correctamente hasta el 06/12/2012, donde deja de funcionar el Port 2.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13
3	1MI	x	x	x	x	x	x		x					x	x		x	x	x	x	x	x	x

G.1.3. Sensor 2MD

Los dos primeros meses desde el 29/01/2012 hasta el 02/04/2012, se obtiene valores de forma continua en todos los sensores. No hay datos hasta 24/07/2012, por tanto hay cuatro meses sin valores. El 12/08/2012 el sensor deja de funcionar.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13	
4	2MD	x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	x	x									

G.1.4. Sensor 2MI

Desde su puesta en funcionamiento hasta 03/07/2012, no se obtiene ninguna lectura de ninguno de los puertos. A partir del 07/08/2012 deja de funcionar el Port 1, pero se obtienen datos de los demás puertos hasta el 14/01/2013. A partir de dicha fecha todos los sensores dejan de funcionar.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13	
5	2MI								x					x	x		x	x	x	x	x			

G.1.5. Sensor 3MD

Se obtiene una primera lectura que parece indicar que los sensores funcionan correctamente. Sin embargo, a partir del 8/02/2012 deja de proporcionar información. Después de revisar el funcionamiento del datalogger, desde el 7/08/2012 hasta febrero de 2013 se aprecia que arroja datos de forma continua en todos los sensores.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13	
6	3MD	x	x						x				x	x			x	x	x	x	x	x	x	

G.1.6. Sensor 3MI

En los primeros meses de ensayo el datalogger no proporciona datos. Se revisa y se consigue que hasta el día 7 de agosto todos los sensores funcionen excepto el T5. No obstante no se tienen en cuenta esos datos. A partir del 28/10/2012

G.1 Análisis Pormenorizado del Estado de Funcionamiento de los Sensores de Humedad y Temperatura durante el Periodo de Ensayo

falla el Port 1, pero se obtienen datos aparentemente continuos del resto de los sensores hasta febrero de 2013.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13
7	3MI								x					x			x	x	x	x	x	x	x

G.1.7. Sensor 4MD

Los dos primeros meses desde el 29/01/2012 hasta el 02/04/2012 se obtienen valores de forma continua en todos los sensores. No hay datos hasta 17/07/2012, por tanto hay cuatro meses sin valores. Del 17/07/2012 en adelante, el Port 1 y el Port 2 dejan de funcionar, por lo tanto sólo se recogen valores del Port 3 y de los sensores de Temperatura hasta febrero de 2013.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13
8	4MD	x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x

G.1.8. Sensor 4MI

El data logger comienza a emitir datos desde el 17/07/2012, de los cinco sensores, hasta el 14/02/2013 en el que falla el Port 2.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13
9	4MI								x		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x

G.1.9. Sensor 5MD

El datalogger comienza a emitir datos desde el 17/07/2012, de los cinco sensores, hasta el 15/01/2013 en el que falla el Port 1.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13
10	5MD								x		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x		

G.1.10. Sensor 5MI

Sólo se obtienen datos de todos los sensores en la primera etapa de toma de datos. A partir del 15/02/2012 falla el Port 2 y desde el abril dejan de funcionar todos los sensores de humedad.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13	
11	5MI	x	x	x	x	x	x		x															

G.1.11. Sensor 6MD

No se obtiene ningún dato de este datalogger durante todo el periodo de toma de datos.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13	
12	6MD																							

G.1.12. Sensor 6MI

Se obtienen datos de todos los sensores hasta el 15/02/2012. A partir de esa fecha Port1 y Port2 comienzan a fallar, y de forma puntual falla el Port3 el 15/03/2012. El datalogger deja de funcionar definitivamente 03/08/2012, a partir de esa fecha se obtienen datos de forma continua de todos los sensores hasta noviembre, cuando fallan Port3 y T4. En febrero se deja de tomar datos: no funciona el Port2 ni el T4, aunque el Port3 vuelve a dar valores a partir del 15/01/2013.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13	
13	6MI	x	x	x	x	x	x		x					x		x	x	x	x	x	x	x		

G.1.13. Sensor 7MD

El datalogger comienza a recoger datos desde el 03/08/2012, de los cinco sensores, hasta el 13/11/2013, cuando falla de forma puntual el Port3 hasta el 14/12/2012.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13	
14	7MD								x					x	x		x	x	x	x	x	x		

G.1.14. Sensor 7MI

Se obtienen datos de todos los sensores de forma continua en los cinco sensores desde el comienzo de la toma de datos hasta el 02/04/2012. El 7/08/2012

G.1 Análisis Pormenorizado del Estado de Funcionamiento de los Sensores de Humedad y Temperatura durante el Periodo de Ensayo

se coloca de nuevo el datalogger y se vuelven a tomar datos hasta el final del periodo de estudio. Aunque este datalogger deja de emitir datos durante cuatro meses, parece que los sensores no han dado ningún error de medida en todo el proceso.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13	
15	7MI	x	x	x	x	x	x		x					x	x		x	x	x	x	x	x	x	

G.1.15. Sensor 8MD

Se obtienen datos de todos los sensores de forma continua desde el comienzo del ensayo hasta el 02/04/2042, donde sólo se obtiene un valor puntual. Se revisa el datalogger en julio y vuelve a tomar datos, pero los sensores Port2 y Port3 fallan y a partir de agosto dejan de funcionar.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13	
16	8MD	x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	x										

G.1.16. Sensor 8MI

Desde el comienzo de la toma de datos fallan los sensores Port1 y Port3. El sensor Port2 si reporta datos de manera continua, hasta que en octubre deja de funciona. A partir de esa fecha sólo se obtienen datos de temperatura.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13	
17	8MI	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	

G.1.17. Sensor 9MD

Los cinco sensores reportan datos solo en la primera toma de datos (hasta el 15/02/2012). A partir de esa fecha falla Port1 y posteriormente Port2, hasta que en agosto de 2012 el datalogger deja de funcionar definitivamente.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13	
18	9MD	x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	x										

G.1.18. Sensor 9MI

Se obtienen datos continuos de los cinco sensores hasta el 24/02/2012, en esa fecha el sensor Port2 proporciona datos erróneos. Los demás sensores siguen tomando datos hasta el 07/08/2012, cuando el Port 1 falla, y a partir de septiembre falla también T4. Al final del periodo de estudio solo funciona Port2 y T5.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13
19	9MI	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x

G.1.19. Sensor 10MD

Los cinco sensores reportan datos solo en la primera toma de datos (hasta el 5/02/2012). A partir de esa fecha falla Port1, reportando valores negativos. A partir de la toma de datos puntual de mayo fallan también los sensores de humedad, hasta que en agosto de 2012 el datalogger deja de funcionar definitivamente.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13
18	9MD	x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	x									

G.1.20. Sensor 10MI

Se obtienen datos de todos los sensores de forma continua desde el comienzo del ensayo hasta el 26/04/2042. En mayo sólo se obtiene un valor puntual y se procede a revisar el datalogger. A partir de julio vuelve a funcionar, pero los sensores Port1 y Port3 dejan de funcionar, al igual que el sensor Port2, puntualmente.

1		3-2-12	15-2-12	20-2-12	28-2-12	15-3-12	2-4-12	26-4-12	24-5-12	19-6-12	24-7-12	30-7-12	3-8-12	7-8-12	27-8-12	28-8-12	20-9-12	4-10-12	22-10-12	13-11-12	14-1-13	1-2-13	27-2-13
19	9MI	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x

G.2. Reportaje Fotográfico de las Revisiones y Visitas Técnicas al Tramo de Ensayo

FOTOS: SENSORES

Las fotos 2 y 3, muestran los equipos utilizados para la comprobación de funcionamiento de sensores y data logger.

El amperímetro deberá estar entre 12-17 mA para asegurar el buen estado del sensor, por otro lado Pro-check nos determinará si el data logger registra correctamente los datos de los

G.2 Reportaje Fotográfico de las Revisiones y Visitas Técnicas al Tramo de Ensayo

sensores. Para ello se conectarán uno a uno los sensores, obtenido la humedad en ese momento. Deberá ser similar a la recogida por el data logger en las últimas mediciones previas a la extracción de los datos.

Foto 4

Sin embargo, el data logger arroja buenos datos ya que está comprobado mediante Pro Check.

En la imagen se aprecia la medida errónea (1.6) del amperímetro, por lo que el sensor está dando datos No válidos para el estudio.

Foto 5

La conclusión final para el sensor 8MD será la de descartar sus medidas y trasladar el data logger al sensor 7MI.

Foto 8

Las fotos 7 y 8 muestran la numeración de los sensores.

Foto 9 Sensores 8MD Y 8MI 1

FOTO: ESTACIÓN METEOROLÓGICA EM1

Bibliografía

- [1] AGUILA RODRÍGUEZ, P.: Determinación del módulo resiliente del suelo de fundación mediante método mecanístico-empiricista: método Hogg simplificado. En: *XIV Congreso Ibero latinoamericano del asfalto*. La Habana, Cuba, 2007
- [2] ALONSO, E.E.: succión y humedad en bases y explanadas de carreteras. En: *Simposio Internacional sobre drenaje interno de Firmes y Explanadas*. Granada, España, 1998
- [3] ANDRÉS-DOMÉNECH, I. ; MONTANARI, A. ; MARCO, J.B.: Stochastic rainfall analysis for storm tank performance evaluation. En: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* (2010), p. 1221–1232
- [4] BADILLO, J. ; RODRÍGUEZ, R.: *Mecánica de Suelos Tomo III*. México DF 1991. ISBN 968-18-0471-6, 2004
- [5] BAYOMY, F. ; HARDCASTLE, J.H.: Monitoring and Modeling Subgrade Soil Moisture for- Pavement Design and Maintenance in Idaho. Phase 2: Site Installations. En: *Idaho Transportation Department* (2003)
- [6] BOWLES, J.E.: *Foundation analysis and design*. Mc GraW-Hill, 1981
- [7] BRADY, N.C. ; WEIL, R.R.: *The Nature and Properties of Soils*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999

- [8] BROWN, S.F.: Soil Mechanics in pavement engineering. En: *Geotechnique* 46 (1996), Nr. 3
- [9] CAMPBELL, Gaylon S.: *Soil physics with BASIC: transport models for soil-plant systems*. Vol. 14. Elsevier, 1985
- [10] CARMICHAEL, R.F. ; STUART, E.: Predicting Resilient Modulus: A Study to Determine the Mechanical Properties of Subgrade Soils. En: *Transportation Research Record* (1985)
- [11] CARO, S. ; GARCÍA, C.: Efecto del clima en pavimentos. En: *Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental* (2000)
- [12] CARO, S. ; GARCÍA, C. ; CAICERO, B.: Modelo numérico para analizar el efecto del clima en pavimentos. En: *Revista De Ingeniería* 1 (2002), Nr. 15, p. 4 – 9
- [13] CHAMBERLAIN, E.J. ; DURRELL, G.F.: Resilient Modulus Determination for Frost Conditions. State of the Art. En: *Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Air Fields, Special Report* 89 (1989), Nr. 23
- [14] DARCY, H.: *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. V. Dament. Paris, 1856
- [15] DUNNE, Ty L. ; LEOPOLD, LB: Water in environmental planing. En: *Water in environmental planing* (1978)
- [16] EKBLAD, Jonas: *Influence of Water on Coarse Granular Road Material Properties*, KTH, Civil and Architectural Engineering, Tesis de Grado, 2007. – 65 p.. – QC 20100705

- [17] ELRICK, D. E. ; REYNOLDS, W. D.: Methods for analyzing constant-head well permeameter data. En: *Soil Science Society of America Journal* 56 (1992), Nr. 1, p. 320–323
- [18] ESCARIO URRIBARRI, V.: Caminos Tomo I y II . Firmes , servicios auxiliares del camino.Terraplenes y pedraplenes. En: *MOPU* (1973)
- [19] GARNICA, P. ; GÓMEZ, J.A.: Deformaciones permanentes en materiales granulares para la sección estructural de carreteras. En: *publicación técnica* 176 (2001)
- [20] GOMES, A: Modelling Unbound Granular Materials. En: *XIII Simposio Colombiano sobre Intienieria de Pavimentos*. Universidad de los Andes. Bogota- Colombia, 2001
- [21] GONZÁEZ, B. ; ATIENZA, M.: Auditoría de calidad de las obras de carreteras en Andalucía. Programa ADAR. En: *I Congreso Andaluz de Carreteras*. Andalucía, España, 1998
- [22] GREEN, W. H. ; AMPT, G. A.: En: *J.Agric.Sci.IV* 4 (1911), p. 1
- [23] GRIBBLE, M. ; PATRICK, J.: *Adaptation of the AUSTROADS Pavement Design Guide for New Zealand Conditions*. Opus, Central Laboratories, Lower Hutt, New Zealand, 2008
- [24] HILLEL, D. ; GARDNER, W.: Steady infiltration into crust-topped profiles. En: *Soil Science* 108 (1969), p. 137 – 142
- [25] HILLEL, Daniel: *Environmental soil physics: fundamentals, applications, and environmental considerations*. Academic press, 1998
- [26] HOLTAN, H.: A Concept for Infiltration Estimates in Watershed Engineering. En: *US Department of Agricultural Research Service* (1961)

- [27] HORNYCH, P. ; CORTE, I. ; PAUTE, I.: Etude des deformations permanentes sous chargement-repétés -de -trois-graves non traitées. En: *Laboratoire Central-des Ponts et Chaussées* 90 (1993)
- [28] HORTON, R.E.: The role of infiltration in the hydrologic cycle. En: *Transactions American Geophysical Union* (1933), p. 446 – 460
- [29] HORTON, R.E.: An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. En: *Soil Science Society of America Proceedings* (1940), p. 399 – 417
- [30] JAMES, W. ; HUBER, W.C. ; DICKINSON, R.E. ; JAMES, R.C.: *Water systems models hydrology. User guide to swmm4 runoff and supporting modules (rain, temperature, combine and statistics)*. Guelph, Ontario, Canada: Computational Hydraulics International, 1998
- [31] KOSTIAKOV, A. N.: On the dynamics of coefficient of water-percolation in soils and the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioratium. En: *Transactions Communications of the International Society of Soil Science* (1932), p. 267–272
- [32] LAMBE, T W. ; WHITMAN, Robert V.: *Mecánica de suelos*. Limusa-Wiley, 1972
- [33] LIANG, H.S.: Rainfall estimation for pavement analysis and design. En: *Transportation Research board* 1252 (1989), p. 42 – 49
- [34] LONDOÑO, C: SUBRASANTES Y SUBBASES PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO. En: *MEMORIAS DEL XII SIMPOSIO COLOMBIANO SOBRE INGENIERIA DE PAVIMENTOS*, 1999

- [35] MEDINA, L. ; I., Pérez ; R., CRESPO: Comprobación estructural de las secciones de firme de la instrucción de carreteras 6.1 y 6.2 IC. En: *Revista de Obras Públicas* (2002), Nr. 3.417, p. 35–52
- [36] NORIEGA, M.H.: relación entre el modulo resiliente hallado por retrocálculo y el encontrado en ensayos de laboratorio. En: *publicación técnica* (2010)
- [37] PHILIP, J. R.: The Theory of Infiltration: 4. Sorptivity and Algebraic Infiltration Equations. En: *Journal of Soil Science* (1957), Nr. 3, p. 257–264
- [38] PHILIP, J. R.: Infiltration into crusted soils. En: *Water Resources Research* 34 (1998), Nr. 8, p. 1919–1927. – ISSN 1944–7973
- [39] REYES ORTIZ, O.J. ; CAMACHO TAUT, J.F. ; REYES LIZCANO, F.: Influencia de la temperatura y nivel de energía de compactación en las propiedades dinámicas de una mezcla asfáltica. En: *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquía* (2006), Marzo, p. 121 – 130
- [40] RIDGEWAY, H.H.: Infiltration of Water Through the Pavement Surface (Abridgement). En: *Transportation Research Record, Soil Mechanics: Rutting in Asphalt Pavements, Embankment on Varved Clays, and Foundations* 616 (1976)
- [41] RONDÓN, H.A. ; REYES, A.: metodologías de diseño de pavimentos flexibles tendencias alcances y limitaciones. En: *Ciencia e ingeniería Neogranadina* 17 (2007), Nr. 2
- [42] R.ROBERTSON ; B.BIRGISSON: Evaluation of Water Flow Through Pavement Systems. En: *Simposio Internacional sobre Drenaje Interno de Firmes y Explanadas*. Granada, España, Noviembre 1998

- [43] SIMONSEN, Erik ; JANOO, Vincent C. ; ISACSSON, Ulf: Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions. En: *Journal of Cold Regions Engineering* 16 (2002), Nr. 1, p. 28–50
- [44] THOMPSON, M.R. ; ROBNETT, Q.L.: Resilient properties of subgrade soils. En: *Journal of transportation* 105 (1979), Nr. 1
- [45] TURC, L: Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. En: *Ann. Agron* 12 (1961), Nr. 1, p. 13–49
- [46] ULLIDTZ, P: Overlay and stage by stage design. En: *Volume I of proceedings of 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, August 22-26, 1977.*, 1977
- [47] VANEGAS, I. ; CAICEDO, B.: Estudio de deformaciones permanentes (ahuellamiento) de capas granulares de pavimento. En: *publicación técnica* (2005)
- [48] WODZINSKI, Piotr: Certain properties of humid granular materials. En: *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 42 (2008), p. 195–210
- [49] ZHANG, R.: Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer. En: *Soil Science Society of America Journal* 61 (1997), p. 1024 – 1030