TESIS DOCTORAL

OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES TRATADOS CON CAL EN CARRETERAS: APLICACIÓN A LODOS DE TUNELADORA Y MEZCLAS BITUMINOSAS

Autor

DIANA MOVILLA QUESADA

Directores

Dr. DANIEL CASTRO FRESNO

Dr. ÁNGEL VEGA ZAMANILLO

Santander, Julio 2012

A mi tío Juanín,

gracias por enseñarme un Mundo sin "peros"

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a mis padres y mi hermana por haberme dado todo el apoyo necesario para poder llegar hasta aquí. Gracias por haberme mostrado la relación entre las palabras "enseñanza y vocación", que tantas veces desaparece. Gracias por estar SIEMPRE ahí.

A Daniel Castro Fresno, gracias porque un simple correo puede convertirse en toda una vida. Gracias por tus oportunidades y por tu tiempo. Te estaré eternamente agradecida.

A Ángel Vega Zamanillo y Miguel Ángel Calzada Pérez por su inestimable ayuda y paciencia cuando me hizo falta.

A Joaquín Díaz y Christian Baier. Gracias por hacernos sentir como en casa cuando estábamos tan lejos. Danke schön für alles.

A Ramón Castañeda Vázquez, por ayudarme en TODO. Gracias por haberme demostrado que las palabras amistad y trabajo pueden encontrarse.

A Miguel Gómez Beares, por su ayuda, por su tiempo y por hacerme ver que "para ir a Potes hay que pasar por Panes". Muches gracies Miguelín.

A Aída, Iván y Rubén, porque sin vosotros hubiera sido imposible. Muchas gracias por todas las horas de laboratorio y por convertir el momento más duro en el más ameno.

A todos mis compañeros de GITECO y GCS: Jorge, Natalia, Pablo, Miguel, Andrés, Elsa, Elena-Gu, Elena Blanco María, Luis, Roque, Alejandro, José Ángel, Amaya, Teresa, Jaime, Valerio, Esteban, Manu, Irene por los momentos vividos.

A todos mis compañeros del Máster Europeo en Ingeniería de la Construcción. A Navid Hedayati por su agradable convivencia y su saber estar.

Gracias a la Universidad de Cantabria por gestionar mi doctorado, a la Universidad Technische Hochshule Mittelhessen de Alemania por dejarme realizar la estancia pre-

doctoral y a la Universidad de Oviedo por su colaboración. También quiero agradecer a las empresas ACCIONA y CALCINOR por abastecer los materiales, ya que sin ellos no podría haberse realizado este proyecto.

He querido dejar para el final, no por ser menos importante, mi agradecimiento a la persona que me acompaña desde hace mucho tiempo, y sin cuyo apoyo, hubiera sido imposible. A ti Cristian, por tu paciencia y tu cariño, y por demostrarme lo que es estar SIEMPRE ahí.

ACKNOWLEDGEMENTS

First of all, I would like to thank my parents and my sister for giving me the courage and support to get where I always dreamt of. Thank you for showing me the relationship between words “education and vocation”, which often go away on the road.

Thanks to Daniel Castro Fresno, because a simple mail can change one life. Thanks for all the opportunities, time and over all for being always giving us your support. I will be grateful forever.

I want to single out and thank Ángel Vega Zamanillo and Miguel Ángel Calzada Pérez for their outstanding help and their patience day by day.

I also want to thank Joaquín Díaz and Christian Baier for making us feel at home. Danke shön für alles.

I would like to thank Ramón Castañeda Vázquez,.because without this support and help I would not have been able to carry out this Thesis, and because he has shown me that the words “friendship and work” can be found everyday. Thank you for being who you are and how you are like.

Also, thanks to Aída, Iván, and Rubén because without them, it would has been impossible to finish this work. Thanks for the time in the laboratory, because the hard work was transformed in a fun time.

I would like to thank Miguel Gómez Beares for his help and time, and over all thanks for letting me know that “To go to Potes, you must cross Panes”. Thanks Miguelín.

I would like to thank my GITECO and GCS partners: Jorge, Natalia, Pablo, Miguel, Andrés, Elsa, Elena-Gu, María, Luis, Roque, Alejandro, Jose Angel, Amaya, Teresa, Jaime, Valerio, Esteban, Manu, Irene… thanks for the good times.

Thanks to all my partners of the Master of European Construction Engineering, especially to Navid Hedayati for showing me that although he is far from here our friendship is over everything.

Thanks to the University of Cantabria for monitoring my PhD, to the Technische Hochshule Mittelhessen of Germany for giving me the possibility me to make the PhD internship there and thanks to the University of Oviedo for its collaboration. Also, I would like to thanks the companies ACCIONA y CALCINOR, because without their support it would have been impossible to develop this thesis.

Finally, I would like to make my acknowledge to the person who has been always here for me since a long time ago and withot him, I know that it would be impossible to be here today. For you Cristian, thanks for your patience and your affection, and for the confidence you have always shown me.

RESUMEN

En esta tesis doctoral se presentan diversos estudios experimentales mediante los cuales se mejoran los materiales utilizados en carreteras, tanto en terraplenes como en firmes, añadiendo diferentes fílleres.

Esta investigación está constituida por una compilación de artículos centrados en una misma línea de investigación: tratamiento de materiales utilizados en carreteras con cal, como material de aportación. Este tratamiento abarca diversos tipos de materiales, desde lodos procedentes de excavación que no han sido dispuestos en vertederos para su posterior uso en terraplenes y/o explanadas, hasta el estudio del efecto de la cal ante diferentes agentes externos como agua y temperatura, en el sistema filler-betún para su utilización óptima en mezclas bituminosas.

La primera publicación (DOI: 10.1016/j.clay.2010.11.028) se ha centrado en el tratamiento con cal de los lodos procedentes de excavación aplicada a la mejora de terraplenes y explanadas. Se trata de una técnica que constituye una de las mejores alternativas desde el punto de vista funcional, ambiental y económico, favoreciendo la reutilización del material de la obra como parte de la estructura del terraplén. Este tratamiento "cálcico" muestra una opción con grandes ventajas, por un lado mejora el comportamiento de las propiedades químicas, mineralógicas, geotécnicas y mecánicas del material, y por otro esta mejora se realiza con un bajo valor de inversión, lo cual representa en la práctica un mayor desarrollo de obras de infraestructura. En la presente investigación se muestran los resultados obtenidos a partir del tratamiento con el porcentaje óptimo de cal de cuatro muestras de lodos bentoníticos, llegándose a alcanzar mejoras del 80% en sus propiedades.

La segunda publicación muestra como la utilización de cal tratada en cantidades adecuadas como aditivo en mezclas bituminosas puede mejorar la adhesividad entre el sistema árido-betún, formando una mezcla bituminosa más resistente frente a la acción del agua y las cargas del tráfico. El análisis se ha realizado a partir del método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL), tomando como objeto de estudio tres tipos de filler de naturaleza distinta, mezclados con un 4,5 % de betún. Los resultados obtenidos se presentan mediante curvas de estado, las cuales muestran claras diferencias entre los tres tipos de filler, demostrando que el hidróxido cálcico puede llegar a tener pequeñas pérdidas al desgaste para relaciones de concentración próximas a 1,3, lo que indica una mejora considerable ante el riesgo de deformación plástica, durabilidad de la mezcla y/o adhesividad.

La tercera publicación (DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.093) demuestra que la utilización de hidróxido y carbonato cálcico como filler de aportación en cantidades adecuadas puede mejorar el comportamiento de las mezclas frente a la acción del agua. Para ello se ha realizado un estudio basado en el ensayo cántabro de pérdida por desgaste en vía húmeda, sensibilidad al agua con rotura a tracción indirecta e inmersión-compresión. Los resultados demuestran que la aportación del hidróxido y carbonato cálcico como filler en la mezcla aumenta su resistencia conservada hasta en un 40 % llegando a cumplir las especificaciones para su puesta en obra. Además, se demuestra que esta aportación de filler mejora la adherencia del betún y el árido frente a la acción del agua en un 45%. Por otro lado, se ha realizado un modelo lineal para cada ensayo basado en el tipo de árido, betún y filler de la mezcla.

ABSTRACT

Experimental studies developed to improve the materials used in roads, both embankments and pavements, adding different fillers are included in this research thesis.

The thesis has a compilation of papers focusing on the same research line: treatment of materials with lime, as filler material. This treatment covers several materials, from the sludge from tunnel boring which has not been disposed in landfills, for its later use on embankments or pavements, to the study of the lime effect related to different external agents such as water and temperature, in the filler-bitumen ratio for its optimal use in bituminous mixtures.

The first paper is focused on lime treatment of sludge from tunnel boring applied for the improvement of embankments and pavements. This technique is one of the best alternatives from the functional, environmental and economical point of view, encouraging the reuse of the work materials as part of the embankment structure. Great benefits are obtained for this "Calcium Treatment": On the one hand improves the behavior of chemical, mineralogical, geotechnical and mechanical properties of the material, and on the other hand this enhancement is performed with a low inversion value, which in practice increases further infrastructure development. Moreover, this research paper includes the results obtained from the treatment with the optimum percentage of lime on four samples of bentonite sludge, where 80 % of improvement of its properties is achieved.

In the second research paper, it is explained how the use of lime (in the right quantities) as additive in bituminous mixtures can improve the adhesion between the aggregate-bitumen system, with a mixture more resistant to water and traffic loads actions. The

"Universal Characterization Binders" (UCL) method was used for the analysis, including three different types of filler, mixed with 4,5 % of bitumen. The obtained results are presented in the state curves diagrams, where clear differences between the fillers can be observed. The calcium hydroxide has small losses to erosion for concentration ratios close to 1,3, which indicates an improvement to the plastic strain risk, mixture durability and/or adhesion.

The third published paper includes researches where the use of calcium hydroxide and calcium carbonate as filler material (in adequate quantities) in bituminous mixtures improves the bituminous mixture behavior against the water effect. A study based on the Cantabrian Test (humid route), water sensitivity and immersion-compression tests has been carried out.

According to the obtained results, if hydroxide and calcium carbonate are included as filler material, an increase of strength up to 40 % is obtained, fulfilling the standards requirements for its use in work site. Furthermore, the adhesion between aggregate-bitumen systems improves up to 45 % against the water effect with the use of this kind of filler. In addition, a linear model for each test based on the type of bitumen, aggregate and filler of the bituminous mixture has been developed.

ÍNDICE

ÍNDICE 11

ÍNDICE DE FIGURAS 15

CAPÍTULO I. - INTRODUCCIÓN 21

I.1. MARCO DE LA TESIS 23

I.2. OBJETIVOS 26

I.3. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS 27

CAPÍTULO II. - ESTADO DEL ARTE 31

II.1. DEFINICIÓN 33

II.2. CLASIFICACIÓN DE LA CAL 33

II.3. PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA CAL 36

II.4. APLICACIONES DE LA CAL 37

II.4.1. Aplicación en la Industria 39

II.4.2. Aplicación en Construcción 43

II.4.3. Aplicación en Protección Ambiental 46

II.4.4. Aplicación en Agricultura 48

II.5. LODOS DE PERFORACIÓN 51

II.5.1. Desarrollo de la técnica 52

II.5.2. Clasificación de lodos según su composición 59

II.5.3. Mezcla de lodos con cal. Aplicaciones 66

II.6. MEZCLAS BITUMINOSAS 68

II.6.1. Definición 68

II.6.2. Clasificación de mezclas bituminosas según el número de huecos 68

II.6.3. Dosificación de mezclas bituminosas en caliente. Ensayos *69*

II.6.4. Clasificación del filler o polvo mineral *70*

II.6.5. Fílleres de aportación. Aplicaciones *71*

CAPÍTULO III.-METODOLOGÍA 75

III.1. CARACTERIZACIÓN DE LODOS PARA SU APLICACIÓN COMO TERRAPLENES EN CARRETERAS 77

III.1.1. Caracterización mineralógica *77*

III.1.1a. Análisis químico por fluorescencia de rayos X 77

III.1.1b. Análisis por Espectroscopia IR 79

III.1.1c. Análisis por Difracción de rayos X 80

III.1.2. Caracterización química *82*

III.1.2a. Contenido en materia orgánica por permanganato potásico 82

III.1.2b. Contenido en sulfatos solubles 83

III.1.2c. pH y conductividad eléctrica 84

III.1.2d. Contenido en sales solubles 86

III.1.3. Caracterización mecánica *87*

III.1.3a. Análisis granulométrico 87

III.1.3b. Límites de Atterberg 89

III.1.3c. Humedad natural 91

III.1.3d. Ensayo Proctor Normal 93

III.1.3e. Ensayo CBR. Análisis de la capacidad portante 94

III.1.3f. Hinchamiento libre en expansión 95

III.1.3g. Ensayo de asiento de colapso 96

III.2. CARACTERIZACIÓN ESPECÍFICA DE MEZCLAS BITUMINOSAS CON CAL Y OTROS FÍLLERES COMO FILLER DE APORTACIÓN 96

III.2.1. Caracterización del filler 96

III.2.2. Mezclas bituminosas 98

III.2.3. Densidad relativa en parafina 99

III.2.4. Proceso de fabricación de mezclas bituminosas 100

III.2.5. Método de Fabricación Marshall 102

III.2.6. Método UCL 104

III.2.6a. Ensayo cántabro de desgaste de las mezclas bituminosas 105

III.2.6b. Adhesividad en seco y tras inmersión 106

III.2.6c. Envejecimiento al ensayo cántabro por efecto del tiempo y la temperatura 107

III.2.6d. Susceptibilidad térmica 108

III.2.7. Determinación de la cantidad de filler ideal para cada mezcla 109

III.2.7a. Concentración crítica del filler 109

III.2.7b. Concentración volumétrica del filler 110

III.2.8. Sensibilidad al agua 111

III.2.9. Ensayo de inmersión-compresión 112

CAPÍTULO IV. - ARTÍCULOS PUBLICADOS 115

IV.1. LIME STABILIZATION OF BENTONITE SLUDGE FROM TUNNEL BORING 119

IV.1A. EXTENDED PUBLICATION 1 129

IV.2. - EXPERIMENTAL STUDY OF BITUMINOUS MASTIC BEHAVIOUR USING DIFFERENT FILLERS BASED ON THE UCL METHOD 153

IV.2A. EXTENDED PUBLICATION 2 169

IV.3. - EVALUATION OF WATER EFFECT ON BITUMINOUS MASTICS WITH DIFFERENT CONTRIBUTION FILLERS AND BINDERS 191

IV.3A EXTENDED PUBLICATION 3 203

CAPÍTULO V.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 227

V.1. CONCLUSIONES 229

Publicación 1: Lime stabilization of bentonite sludge from tunnel boring 229

Publicación 2: Experimental study of bituminous mastic behavior using different fillers based on the UCL Method 230

Publicación 3: Evaluation of water effect on bituminous mastics with different contribution fillers and binders 231

V.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 233

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 235

REFERENCIAS GENERALES 236

REFERENCIAS ESPECÍFICAS 255

Publicación 1: Lime stabilization of bentonite sludge from tunnel boring 255

Publicación 2: Experimental study of bituminous mastic behavior using different fillers based on the UCL method 258

Publicación 3: Evaluation of water effect on bituminous mastics with different contribution fillers and binders. 260

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I-1.Impacto medioambiental producido por el vertido de lodos..... 25

Figura I-2. Daños causados en el pavimento..... 25

Figura I-3. Daños causados por la deficiente adhesividad entre árido-ligante..... 26

Figura II-1. Clasificación de cales según su composición y comportamiento frente al agua..... 33

Figura II-2. Proceso de fabricación de la cal 37

Figura II-3. Aplicaciones de la cal en España..... 38

Figura II-4. Aplicaciones de cal a nivel mundial..... 38

Figura II-5. Revestimiento de hornos y refractarios 39

Figura II-6. Ladrillos refractarios..... 40

Figura II-7. Regulación del pH en el proceso metalúrgico..... 40

Figura II-8. Aplicaciones de la cal en el sector infraestructura 43

Figura II-9. Hormigón celular..... 49

Figura II-10. Ladrillos silicocalcáreos 50

Figura II-11. Balanza de lodos utilizada en los años 30 54

Figura II-12. Primer embudo Marsh 55

Figura II-13. Viscosímetro de Stormer 55

Figura II-14. Viscosímetro Fann..... 57

Figura II-15. Clasificación general de lodos de perforación..... 59

Figura II-16. Clasificación de los lodos de perforación de base acuosa..... 60

Figura II-17. Clasificación de lodos de perforación de base sintética 66

Figura II-18. Fílleres de aportación (cal y cemento)..... 71

Figura II-19. Cal utilizada en obras ejecutadas en EEUU (2003)..... 72

Figura III-1. Expulsión y sustitución del electrón interno de la matriz..... 78

Figura III-2. Espectrómetro de fluorescencia de Rayos X..... 78

Figura III-3. Espectrofotómetro infrarrojo..... 79

Figura III-4. Difractómetro de rayos X..... 81

Figura III-5. Registro gráfico de la difracción del polvo cristalino..... 81

Figura III-6. pHmetro y medidores..... 85

Figura III-7. Conductivímetro 85

Figura III-8. Ensayo sobre el contenido de sales en cada muestra 87

Figura III-9. Tamices y máquina del ensayo del análisis granulométrico..... 88

Figura III-10. Densímetro y probeta del ensayo..... 89

Figura III-11. Estados según los límites de Atterberg 89

Figura III-12. Cuchara de Casagrande y acanalador..... 90

Figura III-13. Vidrio y barritas utilizadas en el ensayo de limite plástico..... 90

Figura III-14. Vista en planta y perfil del molde del ensayo Proctor 93

Figura III-15. Cilindro CBR desmontado y montado para el ensayo..... 94

Figura III-16. Máquina de ensayo CBR 95

Figura III-17. Bancada edométrica para los ensayos de colapso e hinchamiento 95

Figura III-18. a) Máquina para medir la porosidad del filler. b) Introducción del filler en la máquina. c) Medición por golpeo de la porosidad del filler..... 98

Figura III-19. Lavado y secado en estufa del árido 101

Figura III-20. Bandeja pesada y aportación de betún a la mezcla..... 101

Figura III-21. Fotografía de una probeta Marshall fabricada en el laboratorio..... 102

Figura III-22. Compactación por el método Marshall..... 102

Figura III-23. Vista de frente y perfil de la máquina compactadora Marshall 103

Figura III-24 a) Máquina de ensayo cántabro de desgaste. b) Dos probetas sometidas y sin someter al ensayo cántabro..... 106

Figura III-25. Probetas ensayadas al test cántabro con distintas cantidades de filler sometidas a una temperatura de 163ºC durante 72 horas 108

Figura III-26. Máquina de ensayo de sensibilidad al agua y probetas sometidas a tracción indirecta 112

Figura III-27. Máquina de ensayo inmersión-compresión 112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II-1. Designación de las cales de construcción……28

Tabla II-2. Clasificación de mezclas bituminosas según el porcentaje de huecos....….63

Tabla III-1. Distribución de tamaños por abertura de tamices……...…81

Tabla III-2. Grado de saturación de las arenas y limos……..……...….85

CAPÍTULO I. - INTRODUCCIÓN

I.1. MARCO DE LA TESIS

El ritmo de la industria de la construcción en nuestro país y en el resto del mundo ha alcanzado altos valores, que derivan en la generación de millones de toneladas de residuos sólidos procedentes de obras de perforación. Esto supera con creces la velocidad de su gestión, sumándose además la escasez de vertederos concertados, el encarecimiento del transporte y la contaminación creciente de suelos y lechos freáticos. La reducción al mínimo de estos vertederos es el factor determinante en esta optimización.

En la construcción de obras de ingeniería civil y cualquier otro tipo de obra que requiera grandes explanaciones es fundamental minimizar y compensar al máximo posible el movimiento de tierras y materiales, debido a consideraciones de tipo económico, ambiental y técnico. Además, las condiciones del entorno y competitividad exigen la continua mejora de los procesos constructivos en cuestiones de coste, plazo y calidad.

Por lo tanto, se hace cada vez más necesaria la reutilización de los materiales minimizando el gasto de materiales originales que se encuentran directamente en la traza de las obras. Pero todo ello obliga a un estudio detallado de sus propiedades, para así adoptar los tratamientos y medidas necesarias con el objetivo de lograr que su comportamiento sea satisfactorio y fiable durante la vida útil de la obra.

En general, las experiencias obtenidas en las estabilizaciones con cal y morteros de cal aplicadas en la construcción de explanadas de carreteras y terraplenes se han extendido a cualquier tipo de obra, llegando a utilizar suelos de baja capacidad portante y con problemas geotécnicos iniciales.

Por otro lado, desde el punto de vista medioambiental, la reutilización de estos materiales permite el empleo de los lodos procedentes de tuneladora en la construcción de carreteras y terraplenes, lo cual implica su valorización potenciando además el papel de la carretera como sumidero de residuos, pero que con técnicas experimentales y constructivas, consiguen características mecánicas que permiten su uso.

Para el tratamiento de secado de estos lodos procedentes de la excavación se utilizan materiales como cal o mortero de cal. Los efectos del óxido de calcio sobre ellos facilitan su manipulación y transporte, y permiten, además, su reutilización en la construcción de infraestructuras civiles, evitando su depósito en vertederos como se viene haciendo hasta ahora.

La gestión de los lodos procedentes de cualquier tipo de tuneladora supone uno de los principales retos medioambientales a los que se enfrenta el campo de la ingeniería civil. Las estabilizaciones y tratamientos de suelos permiten corregir los problemas geotécnicos que pueda tener el uso de este tipo de lodos, permitiendo no sólo su reutilización sino, principalmente, su valorización. De esta manera se mejora la resistencia permitiendo su empleo en capas más exigentes de mayores prestaciones.

Los resultados obtenidos demuestran que los lodos pueden tener otro tipo de gestión, evitando así dos impactos medioambientales destacados: el provocado por la acumulación irresponsable de los lodos (Figura I-1) y el producido por la explotación indiscriminada de otro tipo de yacimientos.

Figura I-1.Impacto medioambiental producido por el vertido de lodos

Por otro lado, el deterioro de los asfaltos es un problema que afecta al conjunto de la población. Las solicitaciones de tráfico a las que se ven sometidos los asfaltos han ido incrementándose en los últimos años provocando daños acelerados en los mismos. Estos daños están directamente relacionados con la cantidad de tráfico y las cargas por eje de los vehículos que circulan por la carretera (Figura I-2), aunque no son su única causa; por ejemplo, las condiciones meteorológicas determinan de una forma significativa el comportamiento del pavimento favoreciendo su deterioro con el paso del tiempo. Este efecto se ve acrecentado por las abundantes lluvias que se registran en España durante gran parte del año.

Figura I-2. Daños causados en el pavimento

Dos de los principales problemas son los deslizamientos entre capas y los descarnados producidos por la deficiente adhesividad entre los componentes de la mezcla bituminosa (Figura I-3).

Figura I-3. Daños causados por la deficiente adhesividad entre árido-ligante

Estos problemas se pueden solucionar por medio de la adicción de fílleres en las mezclas bituminosas, los cuales retardarán, la aparición de los desperfectos, patologías, etc., aumentando la vida útil de los pavimentos.

I.2. OBJETIVOS

Uno de los objetivos de esta tesis consiste en valorizar un residuo de la construcción y demolición (RCD) en forma de lodos procedentes de tuneladora y transformarlo como material de construcción para seguidamente implantar en obra estos nuevos materiales reciclados, según las siguientes etapas:

1) Estudiar la posibilidad de reutilización y valorización de los lodos y determinar la efectividad de transformación de los mismos en nuevos materiales de construcción, mediante la fabricación de material para terraplén y/o suelo estabilizado con cal con lodo de tuneladora.

2) Implantación en obra de aquellas opciones de valorización que cumplan con las especificaciones de las aplicaciones donde van destinadas, siendo las aplicaciones las siguientes: empleo de los lodos estabilizados con cal para la construcción de terraplenes y explanadas.

Con estas actuaciones se conseguirá minimizar o eliminar los costes derivados del transporte y almacenamiento de los lodos en vertederos controlados, aumentando los beneficios empresariales y contribuyendo al desarrollo sostenible.

3) Otro de los objetivos fijados en esta tesis doctoral es la mejora de una mezcla bituminosa para capa de rodadura con unas características óptimas de cara a ofrecer un comportamiento eficiente ante las cargas de tráfico y las condiciones meteorológicas que mejoren su sensibilidad al agua, mediante el uso de filleres.

   Para ello se utilizará como herramienta de cálculo el método UCL, lo cual dará a conocer de manera más exacta la concentración óptima para cada filler utilizado, sin concentrarse únicamente en la cantidad de betún de cada mezcla, y el análisis mediante ensayos mecánicos.

I.3. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

De acuerdo con la normativa vigente de la Universidad de Cantabria (CG 16/02/07) y del Departamento de Transportes, Proyectos y Tecnología de Procesos, esta Tesis Doctoral se presenta como compendio de artículos previamente publicados en revistas indexadas en el *Journal Citation Reports* (JCR) del *Science Citation Index* (SCI). No obstante, además de incluir los artículos aceptados y publicados (Capítulo IV), también se enumeran otros trabajos realizados en el marco de esta línea de investigación, y que están en proceso de evaluación, para su posterior publicación.

- **ARTÍCULOS PUBLICADOS**

LIME STABILIZATION OF BENTONITE SLUDGE FROM TUNNEL BORING

Daniel Castro-Fresno, Diana Movilla-Quesada, Ángel Vega-Zamanillo, Miguel A. Calzada-Pérez.

Applied Clay Science Journal, 51 (3), 250-257, 2010.

DOI: 10.1016/j.clay.2010.11.028

EXPERIMENTAL STUDY OF BITUMINOUS MASTIC BEHAVIOUR USING DIFFERENT FILLERS BASED ON THE UCL METHOD

Diana Movilla-Quesada, Ángel Vega-Zamanillo, Miguel Ángel
Calzada-Pérez, Daniel Castro-Fresno.

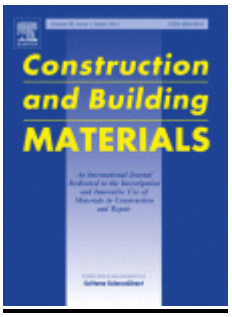
Journal of Civil Engineering and Management, 2010.

EVALUATION OF WATER EFFECT ON BITUMINOUS MASTICS WITH DIFFERENT CONTRIBUTION FILLERS AND BINDERS

Diana Movilla-Quesada, Ángel Vega-Zamanillo, Miguel Ángel
Calzada-Pérez, Daniel Castro-Fresno.

Construction and Building Materials, 29, 339-347, 2012.

DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.093



- **ARTÍCULOS EN REVISIÓN**

A REVIEW OF TREATMENT AND MANAGEMENT OF DRILLING SLUDGE USED IN ENGINEERING WORK
D. Movilla-Quesada; A. Vega-Zamanillo; D. Castro-Fresno; J. Rodríguez-Hernández
Tunnelling and Underground Space Technology

REUSE OF SLUDGE PROCEEDING FROM TUNNEL BORING IN LIME MORTARS FOR APPLICATION IN CONSTRUCTION WORK
Movilla-Quesada Diana, Vega-Zamanillo Ángel , Castro-Fresno Daniel , Calzada-Pérez Miguel A.
Cement and concrete composites
Elsevier Ltd.

- **PATENTES**

INSTALACIÓN PARA PROCESADO Y TRATAMIENTO DE LODOS

Solicitud: P201100610

Castro-Fresno, D., Del-Coz Díaz, J.J.; Vega-Zamanillo, A.; Movilla-Quesada, D.

Colaboración entre la Universidad de Cantabria y la Universidad de Oviedo. Área y campo de aplicación: Control y cuidado del medio ambiente.

Por último, se hace constar que el presente documento adopta el formato de Tesis Doctoral por compendio de publicaciones, y por tanto consiste en una síntesis de los

conceptos teóricos que sustentan los trabajos de investigación publicados o en desarrollo, en lugar del formato tradicional del documento.

CAPÍTULO II. - ESTADO DEL ARTE

II.1. DEFINICIÓN

La cal es un material procedente de la manipulación de la piedra caliza localizada en cantidades elevadas en la corteza terrestre. El término "cal" designa todas las formas físicas en las que pueden aparecer el óxido de calcio y/o magnesio (CaO/MgO) o el hidróxido cálcico magnésico ($Ca(OH)_2/Mg(OH)_2$) (Asociación Nacional de Fabricantes de Cal (ANFAC)).

La cal está formada por un 100% de $CaCO_3$, siendo un 56% de monóxido de calcio (CaO) y un 44% de dióxido de carbono (CO_2). Sin embargo, es casi imposible encontrar caliza tan pura en la naturaleza ya que siempre contiene arcillas, cuarzo o algún otro elemento (Bell, 1996).

II.2. CLASIFICACIÓN DE LA CAL

La Asociación Nacional de Cales de España (ANCADE, 2007) ofrece una clasificación muy completa de cales, atendiendo a su composición y comportamiento frente al agua (Figura II-1).

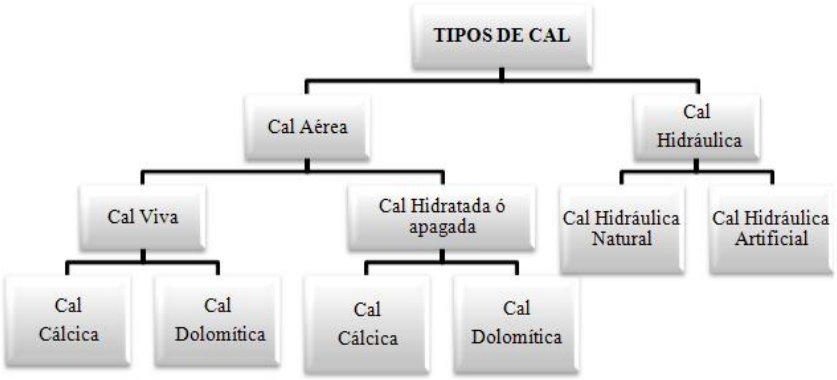


Figura II-1. Clasificación de cales según su composición y comportamiento frente al agua

- Cal aérea: Constituida principalmente por óxido ó hidróxido cálcico. Este tipo de cales endurecen lentamente al aire bajo el efecto del dióxido de carbono. Además, no poseen propiedades hidráulicas por lo que no endurecen bajo el agua.
    - Cal viva: Está constituida por óxido de calcio y magnesio, producidos por la calcinación de caliza y/o dolomía. En contacto con el agua, este tipo de cales tienen una reacción exotérmica.
    - Cal hidratada: Es la cal resultante del apagado controlado de las cales vivas.
    - Cal cálcica: Está constituida por óxido o hidróxido cálcico, sin adición de materiales puzolánicos o hidráulicos.
    - Cal dolomítica: Principalmente constituida por óxidos e hidróxidos de cal y de magnesio, sin adición de materiales puzolánicos o hidráulicos.

- Cal hidráulica natural: Está producida por la calcinación de calizas arcillosas o silíceas con reducción de polvo mediante apagado con o sin molienda. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer con el agua.
- Cal hidráulica artificial: Constituida principalmente por hidróxido cálcico, silicato de calcio y aluminato de calcio. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer en contacto con el agua. Al igual que en las cales hidráulicas naturales, el dióxido de carbono (CO_2) contribuye al proceso de endurecimiento.

Por su parte, Bustillo *et al*. (2008) hacen referencia a los diferentes tipos de cales basándose en la norma UNE EN 459-1 (2002). Esta norma define la cal como *"término genérico que designa todas las formas físicas en las que puede aparecer el óxido de calcio y el de magnesio (CaO y MgO) y/o el hidróxido de calcio y el de magnesio*

($Ca(OH)_2$ Y $Mg(OH)_2$)" y define a la cal de construcción como "*cales utilizadas en la construcción de edificios y en la Ingeniería Civil"*. Además, según este autor las cales se denominan según la tabla II-1:

Tabla II-1. Designación de las cales de construcción

Designación	**Notación**
Cal cálcica 90	CL 90
Cal cálcica 80	CL 80
Cal cálcica 70	CL 70
Cales dolomíticas 85	DL 85
Cales dolomíticas 80	DL 80
Cal hidráulica 2	HL 2
Cal hidráulica 3.5	HL 3.5
Cal hidráulica 5	HL 5
Cal hidráulica natural 2	NHL 2
Cal hidráulica natural 3.5	NHL 3.5
Cal hidráulica natural 5	NHL 5

Por el contrario, los autores Carlos Jofré *et al*. (2009) presentaron una clasificación de las cales según su contenido en magnesio; es decir, cuando el contenido en magnesio es inferior al 5% las cales son denominadas cálcicas, mientras que si el contenido es superior al 5% entonces son denominadas cales dolomíticas (Jofré *et al*., 2008). No obstante, al igual que los autores anteriores la denominación de las cales se completa con el contenido mínimo de la suma de óxido cálcico (CaO) y óxido de magnesio (MgO), añadiendo la letra "Q" si se trata de cal viva o "S" si se trata de cal apagada (ANCADE, 2007).

II.3. PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA CAL

El proceso de fabricación comienza desde la cantera. Desde allí la piedra caliza es transportada hasta el lugar donde es sometida a un proceso de trituración introduciéndola posteriormente en un horno industrial a una temperatura de 950-1000 ºC. Durante este proceso tiene lugar la calcinación o disociación del carbonato mediante una reacción endotérmica que requiere aproximadamente 425 kilocalorías por kilogramo de caliza. Gracias a esta calcinación se obtiene el óxido de calcio o cal viva (CaO) con una pérdida del 44% del peso de la caliza a consecuencia del desprendimiento del dióxido de carbono (CO_2). La reacción básica que se produce durante el proceso de calcinación es la siguiente (II-a):

$CaCO_3$ (Carbonato cálcico) + Q (Calor) → CaO (Óxido cálcico) + CO_2 (Dióxido de carbono) (II-a)

Posteriormente el óxido cálcico (CaO) puede ser combinado con agua (H_2O) en un proceso industrial controlando la hidratación dando lugar a la cal hidrata o apagada ($Ca(OH)_2$) y calor (II-b) (Hassibi, 1999):

CaO (Óxido cálcico) + H_2O (Agua) → $Ca(OH)_2$ (Cal hidratada) + Q (Calor) (II-b)

El arquitecto Briguz y Bru se centró en el estudio y análisis de un tipo de cal localizada en la región de Metz (Francia). Esta cal se caracterizaba por tener un apagado inferior a las cales normales, sin apenas humo, endureciendo en tan sólo un año de tal forma que podía ser utilizada en las obras como canto, y su calidad era tan buena que se utilizaba para realizar obras subterráneas (Briguz y Bru, 1738).

A continuación, la Figura II-2 muestra de manera gráfica el proceso de fabricación de la cal a partir de la obtención de roca caliza.

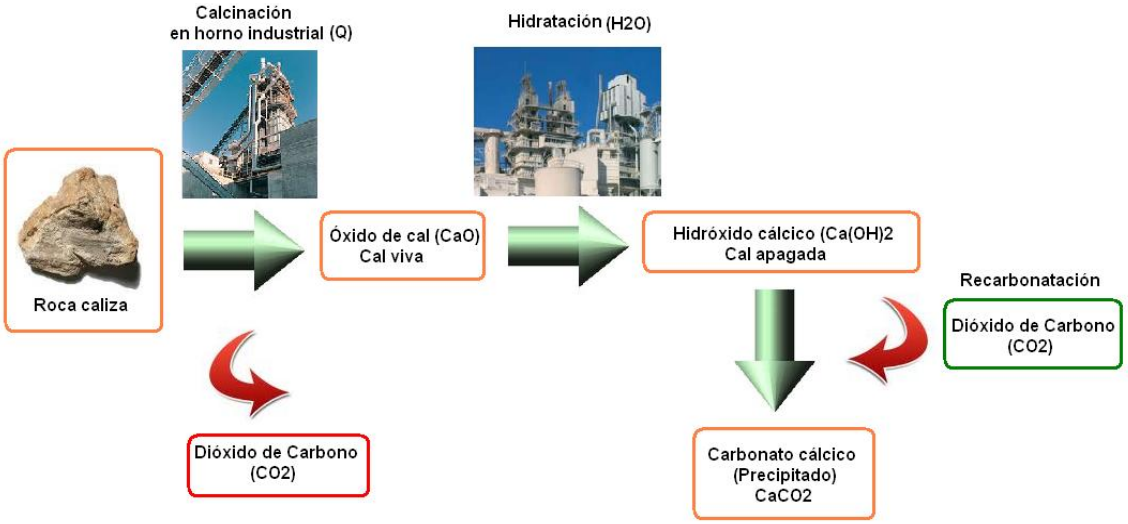


Figura II-2. Proceso de fabricación de la cal

Habrá que tener en cuenta que si en vez de carbonato cálcico se utiliza una dolomía la reacción química quedaría de la siguiente forma (II-c):

$$CaMg(CO_3)_2\ (Dolomía) + Q\ (Calor) \rightarrow CaO + MgO + CO_2 \qquad \text{(II-c)}$$

Dependiendo de la cantidad de distintos elementos que presente el carbonato (sílice, alúminas, álcalis, etc.) puede variar la temperatura en el proceso de disociación. La temperatura normalmente utilizada ronda los 900 ºC, aunque existen silicatos capaces de descomponerse en sílica (SiO_2) a una temperatura de 700 ºC (García-Serrano, 1974).

II.4. APLICACIONES DE LA CAL

A lo largo del tiempo, la cal se ha utilizado principalmente en cuatro sectores: industria, construcción, protección ambiental y agricultura.

En el año 2011 la Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España presentó en una de sus publicaciones un diagrama de sectores, en el cual podían apreciarse en porcentajes sus diferentes aplicaciones a nivel español (Figura II-3) y a

nivel mundial (Figura II-4) (Asociación Nacional de Fabricantes de cales y derivados de España, 2011).

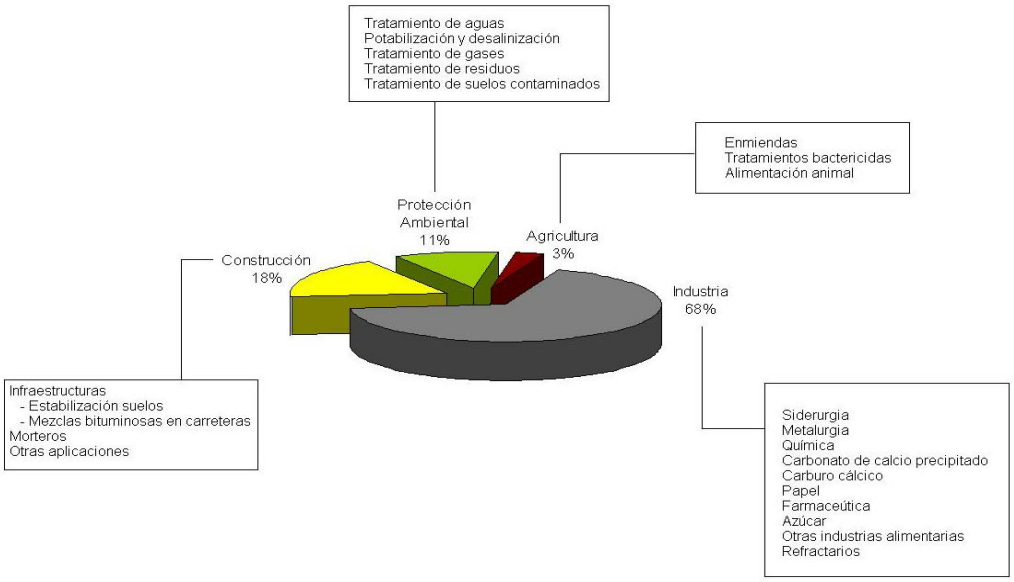


Figura II-3. Aplicaciones de la cal en España

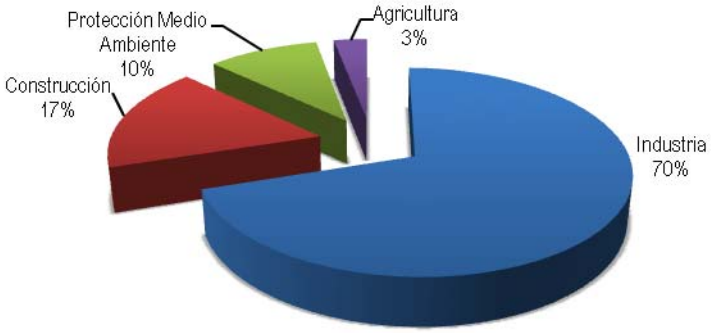


Figura II-4. Aplicaciones de cal a nivel mundial

El uso de la cal es diferente según la localización; es decir, por ejemplo en España el consumo per cápita es de 46,35 kg/hombre-año, mientras que el uso de este material en otros países de la U.E. como por ejemplo Alemania, el consumo per cápita es de 80,48 kg/hombre-año (Sampedro-Rodríguez, 2005b).

Sin embargo, hoy en día la información sobre este producto es amplia en todos sus campos y se está consiguiendo crear nuevos hornos y fábricas donde tratar este material

para ser utilizado posteriormente en numerosas aplicaciones (Sampedro-Rodríguez 2005a).

II.4.1. Aplicación en la Industria

- *Sector Siderúrgico*

En este sector la cal se utiliza principalmente de tres modos: cal viva, dolomía calcinada y dolomía sinterizada (Warren, 2000a).

La cal viva es añadida en los hornos eléctricos y convertidores como fundente y convierte en escoria las impurezas que perjudican la calidad del metal.

Por otro lado, la dolomía calcinada se emplea en los revestimientos refractarios de los hornos y cucharas (Figura II-5), mientras que la dolomía sinterizada se emplea para la fabricación de ladrillos refractarios básicos de alta densidad y con bajos contenidos en fundentes (Mazadiego Martínez *et al*., 2004).

Figura II-5. Revestimiento de hornos y refractarios

Para la obtención de materiales refractarios se utiliza dolomía sinterizada obtenida a partir de la sinterización a altas temperaturas de la dolomía calcinada (Figura II-6) (Bongers & Stradtmann, 1995).

Figura II-6. Ladrillos refractarios

- *Sector Metalúrgico*

En la metalurgia se utilizan dos tipos de producto: el producto natural (calizas y dolomías) y los productos cálcicos calcinados (cal viva y cal hidratada).

El producto natural (cal viva) se utiliza para separar por flotación las impurezas de las distintas sales metálicas y como regulador del pH de las aguas empleadas en el proceso de fabricación de distintos elementos como cobre, zinc, plomo, plata, níquel, oro, uranio, etc. (Figura II-7).

En otras producciones como la del magnesio puede utilizarse cal viva y cal hidratada, siendo la cal viva utilizada en el proceso de reducción y la cal hidratada en el proceso electrolítico. Además, en la producción del aluminio, la cal viva actúa como agente escorificante evitando la formación de compuestos de sílice y aluminio.

Figura II-7. Regulación del pH en el proceso metalúrgico

- *Sector Químico*

La cal es considerada como un reactivo químico natural siendo utilizada en aplicaciones como reactivo de compuestos químicos orgánicos e inorgánicos (hipoclorito de calcio, ácido nítrico, etc.). Además de corregir el pH es capaz de regenerar reactivos más costosos, siendo también utilizada para la producción de grasas untuosas.

La cal en forma de óxido cálcico es utilizada también en el caucho con el propósito de aumentar la vulcanización y reducir el exceso de humedad (Coloma-Álvarez, 2008).

- *Papel*

Durante el proceso de caustificación en la fabricación de pasta de papel, el carbonato de sodio se trata con cal viva para regenerar la sosa cáustica. Además, la cal es utilizada para producir un licor de bisulfato que diluye los elementos no celulósicos de la madera (Botella-Gómez, 1981).

No obstante, tanto las cales vivas como hidratadas se emplean en el blanqueamiento del papel actuando como agente floculante, neutralizante y clarificante de las aguas residuales procedentes del proceso de fabricación del papel (Vettorazzo, Amaral & Chitolina, 1999).

En la actualidad el carbonato de calcio micronizado natural o precipitado (PCC) es muy codiciado en el mundo del papel, ya que aporta una gran calidad.

- *Industria farmacéutica*

El carbonato cálcico precipitado derivado de la cal es un producto altamente puro utilizado por la industria farmacéutica en numerosos medicamentos, ya que es

fácilmente asimilable por el organismo y se asocia con las moléculas activas. Según numerosos estudios, el carbonato de calcio es un suplemento alimenticio cuando el régimen alimenticio es insuficiente, siendo necesario para mantener sanos los huesos, músculos, sistema nervioso y corazón. Además, el carbonato de calcio se usa como antiácido para aliviar enfermedades de tipo estomacal, como pueden ser acidez o pirosis.

La cal también es incorporada en productos de cosmética y depilatorios en los que se utilizan sus propiedades básicas.

- *Azúcar*

El sector del azúcar consume grandes cantidades de cal viva con bajos contenidos en sílice y magnesio para precipitar las impurezas orgánicas o minerales que se encuentran mezcladas con el azúcar (Flores-Amado, 1996).

En la fabricación del azúcar de caña o de remolacha se utiliza cal viva, ya que actúa como precipitante de sucrosa separándola de las impurezas.

- *Vidrio*

Los fabricantes de vidrio utilizan caliza y dolomías de alta pureza cuidadosamente seleccionadas, trituradas y calibradas en el proceso de fabricación. Estos productos aportan calcio y magnesio, dos elementos indispensables para los productos procedentes del vidrio como la fibra de vidrio, el vidrio hueco, lana de vidrio, etc. (Torres Martínez *et al*., 2005).

Se ha demostrado que la utilización de cal viva proporciona vidrios más brillantes y con mejora en el color, reduciéndose el coste de fabricación ya que el proceso de fusión es más rápido (Navarro, 2003).

- *Curtidos*

El uso de la cal en curtidos es una aplicación muy antigua. Los baños de lechada de cal en los que están las pieles en tránsito permiten dominar mejor la extracción del pelo y su hinchamiento (Jin, Wang & Ran, 1991).

II.4.2. Aplicación en Construcción

- *Infraestructuras*

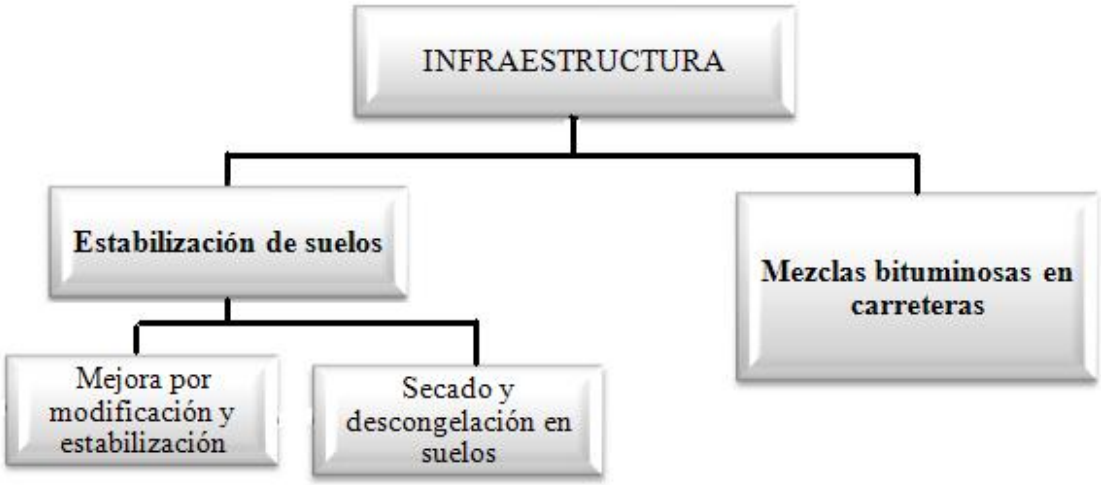


Figura II-8. Aplicaciones de la cal en el sector infraestructura

- *Estabilización de suelos*

Existen numerosas aplicaciones de la cal en el sector de los suelos en función del tratamiento que se les quiera dar: secado y descongelación de suelos, modificación de sus propiedades y estabilización general (Figura II-8) (Rodríguez *et al*., 2008).

Secado y descongelación

La adición de cal viva en presencia de humedad provoca una reacción exotérmica que libera calor disminuyendo el contenido de humedad existente en el suelo. Este efecto se produce por la combinación de la cal con el agua para formar hidróxido cálcico. A partir de numerosas investigaciones se ha comprobado que el contenido de humedad de un suelo puede disminuir hasta en un 5% con un aporte del 1% de cal viva (Hassibi, 1999).

En España se han realizado varias obras de secado y descongelamiento utilizando como material conglomerante la cal. En el año 1999 se realizó un secado de tierras con cal en una urbanización de Soto de Llanera (Asturias) utilizando un 2 % de cal viva.

Más tarde en 2001 se construyó el tramo de Ledigos-Carrión de los Condes perteneciente a la autovía Burgos-León. En este caso era muy difícil terminar la obra ya que las lluvias eran prácticamente diarias e impedían terminar los terraplenes y colocar el firme. Por esta razón, se decidió secar la parte superior de las tierras con porcentajes entre un 1 % ó un 2 % de cal viva en función de la cantidad de lluvia en el día. Éste método permitió entregar la obra en el plazo señalado.

En el año 2007, el tramo San Rafael- Segovia de la autopista A6 fue realizado bajo unas condiciones extremas de temperatura entre -6 ºC y 12 ºC reutilizando materiales sobrantes de una obra colindante mezclados con un porcentaje de cal (ANCADE, 2007).

Un año más tarde, fueron estabilizadas la Pista 15 y 18 del aeropuerto de Barajas (Madrid) con un porcentaje de cal variable entre el 1 % y 3 % dependiendo del nivel de humedad que hubiera el día en que se ejecutara la estabilización. Además, en la pista, se utilizó cal para la ejecución de la plataforma del edificio satélite. En ese mismo año fue

estabilizada con cal la pista de rodadura del aeropuerto de Bilbao (Rodríguez *et al.*, 2008).

Mejora de suelos por modificación y estabilización

Mediante este método se pretende reducir el contenido de agua retenida por la arcilla mejorando su trabajabilidad de forma que se produzca una modificación inmediata de sus propiedades geotécnicas en un intervalo corto de tiempo.

La mezcla entre la cal y el material a modificar provoca reacciones físico-químicas producidas por cambios iónicos, neutralizantes y floculantes, siempre con la condición de que el suelo presente una cantidad de finos determinada (Mallela, Harold Von Quintus & Smith, 2004). Una vez realizada la mezcla, esta adquiere un carácter arenoso mejorando la capacidad portante del material. Normalmente el porcentaje de cal a utilizar oscila entre el 1 y 3 % de cal, aunque en algunas ocasiones y dependiendo del contenido de agua del material puede aumentar (Ruiz, Andrés & Irabien, 1999).

Una de las obras más representativas de España en la estabilización de suelos con cal es la Autovía A-381 de Jerez - Los Barrios (Cádiz) (Ortuño & Rodríguez, 2000). En el año 2000 se estabilizaron los caminos que bordean el Aeropuerto del Prat en Barcelona, ya que su deterioro era constante por la cercanía del agua. Además, dicho aeropuerto está asentado sobre terrenos limo-arcillosos lo que hace que su estabilización con cal viva sea todavía más efectiva (Cadenas-Armentia, Romero-Robles & Ainchil-Lavin, 2007).

Otras obras de menor relevancia son las instalaciones deportivas y Campo de Fútbol de Ciempozuelos (Madrid). En este caso se construyó la ciudad deportiva en lo que anteriormente había sido un vertedero formado por arcillas mezclada con otro tipo de materiales como plásticos, vigas, piedras, etc. (Sampedro-Rodríguez, 2008).

Otro tramo estabilizado con cal está localizado en la autovía M-45 de Madrid (O´Donell – NIV). El problema de este tramo era su formación por sepiolita, un material clasificado como "marginal" (Domingo *et al*., 2000). El tráfico denso de Madrid y la cantidad de material a disponer en vertedero (aproximadamente 1 millón de m^3) fueron razones de peso para buscar otra alternativa. El terraplén fue estabilizado con diferentes porcentajes de cal apagada en cimiento, núcleo y espaldones (ANTER, 2008).

- *Mezclas bituminosas en carreteras*

En los hormigones asfálticos y materiales bituminosos, la sustitución de una parte de los fílleres por cal adecuadamente dosificada mejora la adherencia árido-ligante, además de disminuir el envejecimiento y el desgaste. La afinidad de la cal con los betunes y los áridos refuerza los enlaces en el interior de la estructura de la mezcla bituminosa. El resultado es una capa homogénea y compacta, duradera y sin problemas de fisuración (Devecseri, 2010).

II.4.3. Aplicación en Protección Ambiental

- *Tratamiento de aguas*

La cal es un material muy utilizado en las depuradoras de aguas procedentes del uso industrial o urbano (EDAR) actuando como coagulante, floculante y controladora del pH. Se utiliza también como precipitadora de metales pesados como el plomo o el cobre y otros elementos disueltos (aluminio, hierro y cinc) que precipitan bajo forma de hidróxidos (Elías, 2006). Además es utilizada en el tratamiento de los fangos que proceden de la limpieza de aguas potables y residuales (Herrera-Suárez, 2003).

- *Potabilización y desalinización*

El agua potable debe tener un equilibrio calcio-carbónico que a veces es difícil de mantener, por lo que una de las soluciones para mantenerlo es emplear tanto cal viva como hidróxido cálcico permitiendo ajustar el pH, remineralizar y descarbonatar las aguas demasiado duras (II-d) (Olcina-Cantos, 2002).

$$Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O + CO_2 \qquad \text{(II-d)}$$

Además, la cal es utilizada en post-tratamientos de agua como la desalinización, elaborando una lechada de cal a partir de hidróxido cálcico. El aporte de cal permite realizar un acondicionamiento del agua desalada que puede ir desde un ajuste del pH hasta la remineralización por el aporte de calcio (Ramilo, De Soler & Coppari, 2003).

- *Tratamiento de gases*

La lluvia ácida es uno de los problemas más graves para el medio ambiente, siendo producida por el anhídrido sulfúrico precipitado de la quema de combustibles. Esta lluvia es nociva para el ser humano y para el medio ambiente. Por ello, una de las soluciones más rentables como desulfurante es el aporte de cal para eliminar el anhídrido y otros gases ácidos de los humos industriales, de las centrales térmicas o de las incineradoras de residuos sólidos urbanos.

- *Tratamiento de residuos*

La cal es un medio muy seguro para el tratamiento de los vertidos de basura con el fin de prevenir el desarrollo de malos olores y lixiviados contaminados (Castells, 2000). También se utiliza para la regeneración de aceites usados industriales y de motor.

- *Tratamiento de suelos contaminados*

Existen dos técnicas de descontaminación de suelos: "in situ" o "ex situ". La más económica es la técnica "in situ" ya que no produce coste de transporte y laboratorio. Esta técnica consiste en la decloración por dispersión mezclando el óxido de calcio (CaO) con el suelo. Esta reacción se potencia por el calor que se produce al añadir el óxido. En un principio esta técnica fue desarrollada para estabilizar vertidos de petróleo, aunque más tarde fue utilizada para declorar suelos contaminados por Policlorobifenilos (PCBs).

Sin embargo, en la técnica de descontaminación de suelos" ex situ" el volumen de suelo contaminado es excavado, transportado y tratado en una instalación destinada a tal efecto.

II.4.4. Aplicación en Agricultura

- *Enmiendas*

Las enmiendas cálcicas y magnésicas se utilizan para mejorar las propiedades de acidez, porosidad y/o actividad biológica de los suelos destinados a la agricultura.

Estas enmiendas permiten una fertilización mineral óptima (raciocinio en el tratamiento con estiércol) además de una valorización de las producciones vegetales y animales (proceso de tratamiento de calidad de la hierba, del cereal, etc.).

- *Tratamientos bactericidas*

La cal garantiza la depuración por destrucción de los gérmenes patógenos, la desodorización y la decantación de los líquidos del estiércol y otros efluentes del

ganado. Además, el uso de cal apagada reduce la acción bacteriana actuando como agente esterilizante permitiendo la circulación del aire y la evaporación de la humedad.

Los residuos de cal apagada son conocidos también como "gallinaza", la cual suele aplicarse en campos de cultivo aportando fósforo, nitrógeno, potasio, azufre, calcio, magnesio y materia orgánica.

II.4.5. Otras Aplicaciones

- *Hormigón celular*

El hormigón celular es un material de construcción conocido también como hormigón espumoso o aireado. Este material de construcción se fabrica a partir de mezclas molidas de cal y materias silíceas, añadiendo agua y polvo de aluminio de forma que la mezcla tenga textura homogénea (Figura II-9). El hormigón celular se caracteriza por sus propiedades acústicas, térmicas y por su baja densidad. Además es un material liviano, de precisión dimensional y rápida construcción, que tiene en cuenta el impacto medioambiental tanto en su fabricación como en su ciclo de vida (Hotza *et al*., 2010).

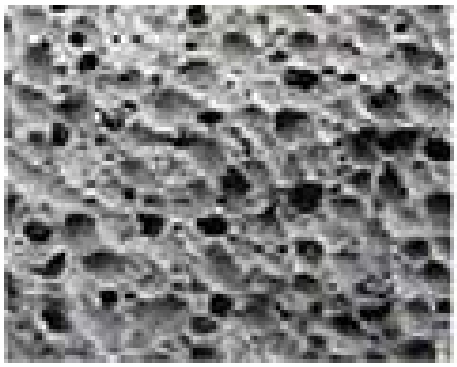


Figura II-9. Hormigón celular

- *Ladrillos silicocalcáreos*

Entre 1850 y 1870 se inventa y patenta el ladrillo silicocalcáreo. Se caracteriza por su color blanco y sus altas propiedades mecánicas. La cal activa la reacción puzolánica con la sílice y la arcilla que compone el ladrillo aportándole propiedades muy resistentes a la temperatura (Figura II-10) (León *et al*., 2009).

Figura II-10. Ladrillos silicocalcáreos

- *Pinturas*

Existen tres tipos de pinturas en las que el elemento predominante es la cal: pintura a la caseína, pintura blanco satinado y blanco de titanio. La pintura a la caseína se caracteriza por la mezcla entre el hidróxido cálcico y la caseína que es una fosfoproteína procedente de la leche y sus derivados, dando un compuesto de calcio y duro de caseína de gran resistencia ante agentes atmosféricos como el agua de la lluvia o el viento.

La pintura blanco satinado se obtiene tratando el sulfato de aluminio, libre de hierro y finalmente molido, con lechada de cal en caliente. Esta pintura es mucho más resistente a la suciedad y se caracterizan por ser lavables.

La pintura "blanco de titanio" apareció en 1921 cuando empresas estadounidenses y noruegas comenzaron su producción. Sin embargo, en la actualidad el mayor productor

de este pigmento es Noruega. Este material se fabrica tratando la ilmenita con carbón e hidróxido cálcico. De esta mezcla se obtiene hierro y escorias, de las cuales se obtiene un dióxido de titanio en un estado de pureza muy elevado. Este material fue utilizado por muchos artistas a lo largo de la historia ya que tiene un poder cubriente y colorante muy elevado.

II.5. LODOS DE PERFORACIÓN

Existen numerosos tipos de perforación en el terreno, desde exploraciones de petróleo y gas hasta aplicaciones en obra civil como un túnel. En ambos casos, se debe tener en cuenta la multitud de características geotécnicas que se pueden encontrar, desde la diversidad de materiales hasta el tipo de recortes que se pueden presentar. Muchos de los terrenos donde se desarrollan dichas obras presentan inestabilidad a la hora de realizar cualquier tipo de perforación, por lo que se utilizan fluidos que garantizan una serie de propiedades en el frente de perforación. La utilización de los lodos de perforación comenzó a principios del siglo XX, como una mezcla básica de bentonita, agua y otros aditivos. Su composición ha ido variando con el paso del tiempo y con la evolución que se ha producido en el sector de la ingeniería civil. Sin embargo, el impacto medioambiental que puede arrastrar la descarga y uso de estos fluidos acuosos puede ser considerable ya que su disposición en zonas permanentes como vertederos, conlleva a un gasto adicional para la empresa, además de la posibilidad de causar un impacto en el medioambiente. Por ello, su reutilización en obra minimizará la cantidad de residuo además de economizar el gasto de mantenimiento y materiales de préstamo a las empresas.

II.5.1. Desarrollo de la técnica

La técnica de perforación aparece en China en el siglo III a. C., donde se operaba con herramienta por cable. El método consistía en dejar caer la herramienta de gran peso y mediante un contenedor de forma tubular, retirar la roca pulverizada. Desde aquella época se les atribuye el uso intencionado del agua como fluido, en el proceso de perforación (Li *et al*., 2007).

Alrededor del año 1833, el ingeniero francés Fauvelle ideó una instalación que consistía en bombear el agua que se encontraba en la perforación hacia el interior de un vástago y arrastrar los trocitos de rocas (detritos) a la superficie aprovechando el espacio existente entre la pared del pozo y dicho vástago. Esta idea surgió de forma inesperada por parte de Fauvelle, ya que simplemente cierto día utilizando la herramienta por cable el aparato se topó con agua y se dio cuenta de que el agua podría actuar como fluido conduciendo el material sobrante hacia la superficie (Fauvelle, 1846; Schlumberguer, 1994).

Más tarde, Lorenz propone utilizar lodos bentoníticos como materiales de estabilización contra el frente de un túnel, pero no es hasta 1896 cuando el ingeniero H.H. Dlarymple-Hay utiliza por primera vez arcilla para estabilizar el frente en terrenos no cohesivos. En este momento nace el denominado “escudo de tierras”, cuyo diseño es desarrollado posteriormente por los japoneses (Bleier, 1980)(Liu *et al.,* 2009).

En el año 1901 en Spindleton (EEUU), los trabajadores de un pozo de perforación condujeron una manada de vacas a través de un foso que estaba lleno de agua. Al paso del ganado se fue formando una mezcla de arcilla y agua. Fue entonces cuando idearon la manera de bombear esa mezcla dentro del pozo llegándose así a los primeros lodos de perforación.

En 1914 los ingenieros Heggem y Pollard propusieron el llenado de tuberías con la mezcla agua y arcillas (barro) para que no se produjeran explosiones en pozos de gas. En aquella época se definió este material líquido como "*mezcla de agua con cualquier material arcilloso que se mantiene en suspensión durante un tiempo considerable"*, aunque esta definición sería relativamente errónea en años posteriores. Por otro lado, estos investigadores llegaron a la conclusión de que cuanto más pegajosas fuesen las arcillas, más adecuadas serían a la hora de usarlas en las excavaciones y recomendaron una proporción de arcilla en agua del 20% en peso (Heggem & Pollard, 1914).

Dos años más tarde, Lewis y McMurray realizaron algunas averiguaciones sobre las propiedades de estos lodos. Se dieron cuenta de que una de las características fundamentales era la capacidad de sellar las arenas de formación y además contrarrestar las presiones de gas que podían formarse, por lo que cambiaron la definición hecha hasta el momento de estos materiales. El barro se convertía entonces en "*una mezcla de agua con algún material arcilloso que permanece en suspensión por un tiempo considerable y que además tiene una densidad de 1.05 a 1.1 g/cm^3 y debe de ser delgada como el agua para evitar efectos negativos en algunas formaciones* (Lewis & McMurray, 1916).

En 1918 un investigador llamado Brantley mencionó que 4 toneladas y media de recortes de hierro fueron añadidas a un lodo con la intención de controlar las presiones de gas producidas en un pozo que se estaba excavando. De ahí, dos años después se patentaba un nuevo material denominado Bentonita y Barita.

A partir de 1921 el óxido de hierro comenzó a ser utilizado en lechadas bombeables que alcanzaban un rango de densidades próximas a 18 gr/cm^3. En esta época, un ingeniero llamado Stroud fue el artífice del aumento de dicha densidad que además

ayudaba a prevenir las explosiones en los pozos de gas. Fue entonces mediante estudios realizados por Stroud sobre la acción que podía producir el hierro en estos materiales cuando sustituyeron este material por otro denominado *baritina*. La baritina está constituida por sulfato de bario (SO_4Ba) y es de color blanco; no es un material abrasivo como el hierro y además aumenta en mayor proporción la densidad del lodo. Tiene la ventaja de ser insoluble ante la presencia de aguas o aceite y el 25% de su producción se realizaba en Estados Unidos. No obstante, aunque se siguió utilizando este tipo de compuesto en las mezclas se continuó estudiando este procedimiento y sobre todo un aspecto muy importante fue la búsqueda de materiales que fuesen capaces de aportar viscosidad al lodo (Stroud, 1925).

Las primeras mezclas contenían aluminatos de sodio y soda cáustica, aunque no fue hasta 1929 cuando dieron con el aditivo casi perfecto. Se trataba de las arcillas bentoníticas desarrolladas por Hatz y Cruz, que eran capaces de dar la viscosidad deseada para cada aplicación. Se decía que este aditivo era casi perfecto porque su comportamiento era excelente para lodos con base de agua dulce, aunque el problema aparecía cuando intentaban utilizarse lodos de base salada (Cross, 1929) .

A principios de los años 30 aparecen los primeros aparatos que permiten medir la densidad de estos materiales, la balanza de lodos (Figura II-11).

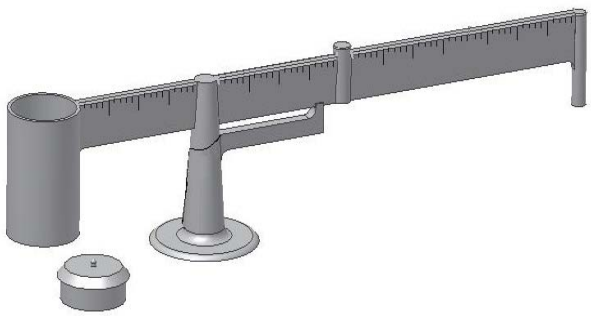


Figura II-11. Balanza de lodos utilizada en los años 30

En 1931 aparece el primer embudo Marsh, aparato con el cual era posible medir la viscosidad del lodo. A mediados de la década comenzó a utilizarse silicato de sodio y con ello aparecieron los primeros lodos de base aceite (OBMs) (Figura II-12).

Figura II-12. Primer embudo Marsh

En esta misma época aparece el viscosímetro de Stormer (Figura II-13), el cual se utiliza para medir la viscosidad aparente y tixotropía del material (Marsh, 1931).

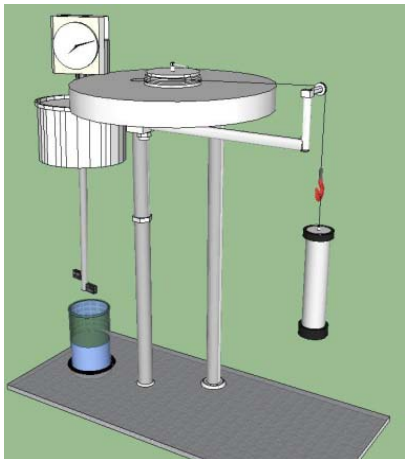


Figura II-13. Viscosímetro de Stormer

Alrededor de 1935 se desarrolla el primer filtro prensa API, mediante el cual se puede determinar el volumen de líquido sometido a cierta presión pasando a través de un filtro.

En el año 1937 apareció la "atapulguita", un material que era capaz de dar viscosidad a lodos de base salada. Ante la poca confianza de Jones y Babson (1935) frente a este aditivo desarrollaron otros materiales denominados coloides encargados de darle un mejor control de filtrado a la mezcla. En un principio se utilizaron coloides orgánicos como el almidón de maíz, pero el proceso de fermentado relativamente lento con la temperatura de este material hizo que se buscaran otras soluciones menos orgánicas como el carboxilmetilcelulosa.

En este mismo año Cia Barod estudia la pérdida de fluido bajo parámetros estáticos y presiones de 100 PSI, llegando a producir mejoras en el diseño anterior del filtro prensa.

Otro problema que apareció en la década de los 40 fue el aumento de viscosidad y geles que aparecían a medida que se iban excavando pozos más profundos. Esta vez, el problema no era intentar darle viscosidad a la mezcla sino todo lo contrario. Por ello, un ingeniero llamado Parsons mencionó el uso de adelgazantes estabilizadores y comenzó a desarrollar el efecto del pH producido sobre la viscosidad del lodo.

Más tarde Lummus y Ambrose (1949) patentaron un aditivo procedente de la sintetización de las plantas denominado tanino natural.

En la 2ª Guerra Mundial la necesidad de una mejora en los pozos de perforación y el deseo de encontrar petróleo para su uso en la maquinaria de combate permitieron la aparición de otro tipo de productos más modernos como cal, yeso, ligno-sulfonatos de calcio, lignina y ligno-sulfonatos de hierro y cromo.

Los primeros tipos de lodos diseñados artificialmente estaban basados en silicatos de sodio, aunque más tarde debido a los problemas producidos sobre todo por la hidratación al trabajar en la perforación de arcillas activas, se comenzaron a utilizar lodos basados en cal cuyos iones eran capaces de controlar este problema.

Las modificaciones en el contenido de cal fueron desarrolladas años más tarde, ya que por medio de nuevos estudios e investigaciones se dieron cuenta de que modificando la base se podía mejorar la perforación y la trabajabilidad del material.

Más tarde en 1950 se utilizaron los lodos de base aceite (OBMs) en un sistema llamado viscosímetro Fann (Figura II-14), el cual permite calcular las densidades aparentes de los fluidos.

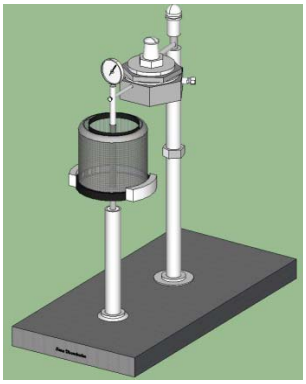


Figura II-14. Viscosímetro Fann

Posteriormente, dos investigadores de la época, Membrose y Liliensthall, desarrollaron un instrumento rotacional denominado viscosímetro rotacional, utilizado para medir puntos cedentes y viscosidades plásticas, que tiene la peculiaridad de ser utilizado tanto en campo como en laboratorio.

En el año 1953 el investigador Lewis consiguió desarrollar un lodo de yeso, el cual era bajo en pH y cuyos iones solubles mejoraban el trabajo con altas temperaturas.

En 1960 se realizan una serie de estudios basados en la utilización de lodos con base de aceite mineral (OBMs) con salmuera de cloruro de calcio emulsionada con una proporción del lodo bastante inferior a la de cloruro.

A partir de 1963, se desarrollan en Japón nuevos diseños de estabilización de túneles utilizando lodos bentoníticos provenientes de la misma excavación aplicados a presión contra el frente (Slurry Shield). Más tarde, en el año 1967, la firma inglesa Markham diseña el primer escudo producido por la mezcla de los materiales excavados con agua a una presión de 3 bares y que fueron utilizados posteriormente en la excavación de túneles de desagüe de la ciudad de México.

En la década de los 70 aparecen los nuevos materiales poliméricos. Numerosas compañías dedicadas al estudio de los lodos decidieron añadir como aditivos algunos de estos materiales, cuyas propiedades mejoraban bastante las características de las mezclas. Además, en ésta época comenzaron a aparecer nuevos sistemas de medición de viscosidad denominados "Multi-Speed" (Greenwood *et al.,* 1999*)*.

En 1971, se construye un escudo experimental que trabaja con una mezcla de lodos, cal y agua a una presión de dos bares. Este diseño fue patentado por la firma R.L. Priestley (Cornejo-Álvarez, 2000).

Con la llegada de los 90 y la sonada preocupación por los aspectos medioambientales aparecieron los primeros lodos capaces de desbancar a los lodos de base aceite (OBMs) denominados como lodos sintéticos (Monteiro, Ribeiro & Lomba, 2010).

A partir de entonces y con la llegada del siglo XXI la tipología de los lodos ha cambiado bastante. Hoy en día los lodos que se utilizan en la industria de la perforación están fabricados con la mira puesta en el medio ambiente.

En el año 2004, investigadores procedentes del Centro de Investigación de la empresa PetroChina, realizaron estudios sobre un nuevo tipo de lodo basado en un tetra óxido de manganeso. Este incluye daños causados por calcificación, la acidificación del lodo y el bloqueo acuoso del aditivo (Zhao, Xu & Lu, 2005).

A partir de los estudios realizados anteriormente, en el año 2009 el Departamento de Ingeniería del Petróleo de la Universidad de Shandong comenzó a investigar en profundidad un tipo de lodo más respetuoso con el medioambiente que pudiera utilizarse tanto en zonas terrestres como marítimas. Para ello se utilizaron un tipo de polímeros de aluminio y otros materiales exentos de toxicidad (Luo *et al*., 2010).

II.5.2. Clasificación de lodos según su composición

Los lodos de perforación son compuestos formados por una base líquida, un agente espesante, una arcilla bentonítica, lignosulfatos y lignitas (Figura II-15). La base líquida está compuesta por agua o aceite diesel acompañada por el sulfato de bario que suele actuar como agente espesante. La arcilla bentonítica tiene como característica principal ayudar al proceso de retiro de los recortes del pozo y a su vez actuar como elemento filtrante en las paredes del agujero. Además, los lignosulfatos y lignitas son las encargadas de mantener el lodo en estado líquido. Es importante indicar que muchas veces son utilizados aditivos que cumplen funciones específicas (Plee *et al*., 1990).

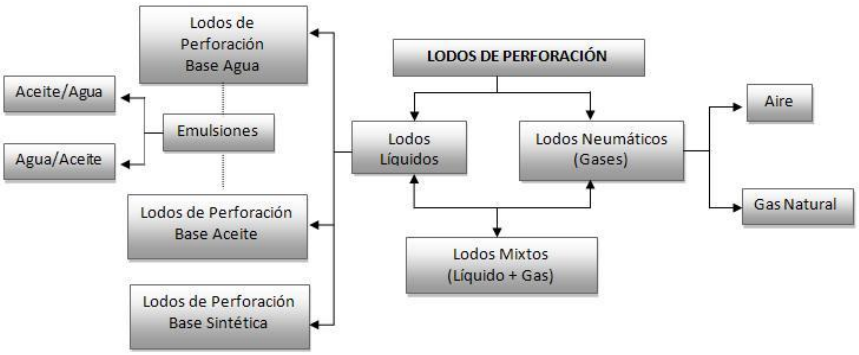


Figura II-15. Clasificación general de lodos de perforación

- *Lodos base agua*

Los lodos de perforación se dividen generalmente en lodos con base acuosa, con base aceite y con base sintética (Figura II-16).

Los lodos con base acuosa (*WBMs*) pueden ser utilizados inmediatamente sobre el terreno en la mayoría de las zonas marinas y los recortes pueden ser descargados en las aguas lejanas a la costa, siempre y cuando sigan las normativas de vertido actuales. Además, su precio en el mercado es relativamente bajo en comparación con otro tipo de lodos y no presentan problemas medioambientales para cualquier tipo de organismo presente (Burke & Veil, 1995; Al-Yami *et al*., 2008).

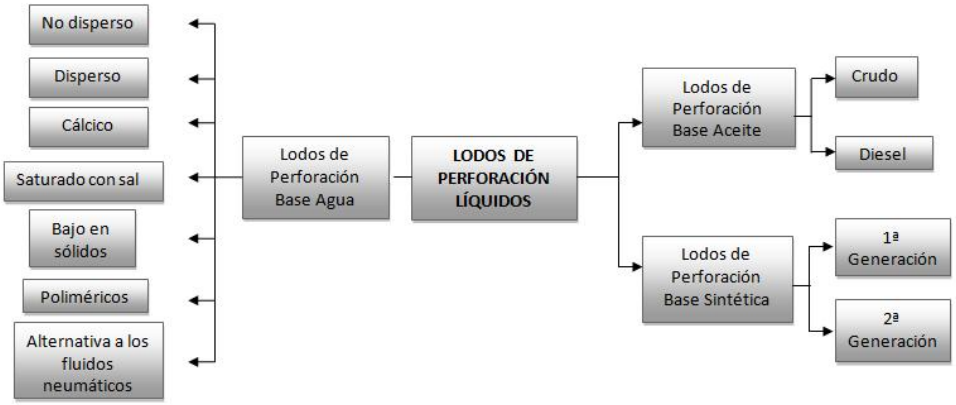


Figura II-16. Clasificación de los lodos de perforación de base acuosa

Sin embargo, pueden aparecer problemas a la hora de realizar la perforación en terrenos de pozos profundos u horizontales muy extensos, ya que este tipo de lodos no presentan muy buen comportamiento en la perforación terrestre. En estas situaciones se propone la utilización de lodos de base aceitosa (*OBMs*).

Lodos no dispersos

Este tipo de materiales están compuestos por bentonita, agua dulce e hidróxido cálcico. La bentonita se hidrata y se mezcla con hidróxido cálcico para aumentar o disminuir el valor del punto de cedencia y así mejorar el transporte de recortes en pozos de poca profundidad (Christidis & Huff, 2009).

El problema fundamental es que este tipo de lodos no es muy resistente a altas temperaturas (~205º C).

En la década de los 80 se realizan estudios sobre este tipo de materiales ante materiales más "novedosos", como los polímeros no iónicos (almidón o xilo), capaces de respetar el punto de cedencia logrado por la cal permitiendo un mejor control en las pérdidas de filtrado.

Lodos de calcio

Este tipo de materiales son capaces de inhibir el hinchamiento que se produce en las arcillas y con ello controlar el punto de cedencia que puede darse en cualquier perforación. Una de las características principales de estos lodos es que una vez que se mezclan con cal, el contenido en bentonita se convierte en arcilla base calcio, lo que conlleva a una disminución de la viscosidad y por lo tanto, a un aumento en la solidificación (Warren, 2000b). Las concentraciones que se utilizan hoy en día pueden variar según la naturaleza del lodo y el contenido en agua natural desde 1 a 5 kg/m^3 denominándose lodos de bajo contenido, hasta 15-50 kg/m^3 siendo lodos de alto contenido en cal.

Lodos dispersos

Presentan un alto contenido de bentonita y agentes dispersantes como lignosulfatos y lignitos, por lo que dispersan fácilmente las arcillas, dejando las partículas floculando en un líquido y reduciendo la permeabilidad. Son utilizados en pozos de mayor profundidad ya que el agente dispersante actúa frente a la estabilidad de la perforación funcionando hasta temperaturas de 180º C.

Los estudios realizados muestran que estos materiales son capaces de desestabilizar arcillas con contenidos en montmorillonita, caolín, illlita y cloritos.

Lodos bajos en sólidos

La composición de este tipo de lodos ha ido variando a lo largo del tiempo. Hoy en día la mezcla consta de agua dulce o agua salada, cloruro de potasio, un polímero de inhibición llamado poliacrilamida, un polímero generador de viscosidad, bentonita ya hidratada, almidón estabilizado o CMC, soda cáustica y otros lubricantes.

No obstante, esa nueva composición ha variado de forma relativa algunas de las propiedades de estos materiales. Por ejemplo, al haber adicionado polímeros se limita la temperatura a la que pueden estar expuestos (~120º C). Además, al ser sometidos a numerosos tratamientos para su preparación, se eleva a la vez su coste.

Lodos saturados con sal

Los lodos saturados con sal están compuestos por una base prehidratada de bentonita y una serie de aditivos como el almidón o carboximetilcelulosa (CMC) que ayudan a controlar las pérdidas de flujo que se producen. En cuanto a su aplicabilidad en perforación, estos lodos después de los de base aceite y cloruro potásico, son los que mejor comportamiento presentan. Es importante indicar que en muchas ocasiones se

desestima utilizar este tipo de materiales por la dificultad que presentan en sus propiedades reológicas, ya que al disminuir su concentración salina puede darse el caso de que los recortes se dispersen en el lodo, lo cual produciría un problema de almacenamiento masivo en la perforación (Guo *et al*., 2006).

Lodos con materiales poliméricos

Están compuestos por una base de agua (dulce o salada) y materiales poliméricos como el almidón, gomas de "guar", lignito, celulosa polianiónica, poliacrilatos, sulfonatos, ácidos poliaminados, metilglucosa, etc. Todos estos polímeros son de cadena larga, lo que proporciona un aumento del peso molecular, por lo que se producen una serie de factores importantes en las características del material. Entre estos factores, se produce una mejora del control de pérdidas de filtrado, mantenimiento de la estabilidad de las zonas perforadas, estabilidad térmica, prevención de la corrosión, mejora en la trabajabilidad, etc. (Baba-Hamed & Belhadri, 2009).

La mayor desventaja que presenta este tipo de lodos es el coste, ya que los materiales poliméricos de los que están formados son relativamente "novedosos" y por tanto bastante caros.

Alternativa a los fluidos neumáticos

A comienzos de la década de los 80, el Departamento de Energía de los Estados Unidos comienza a desarrollar un nuevo tipo de lodos de fácil remolición y además reciclables.

Estos nuevos materiales, al igual que los lodos neumáticos, pueden utilizarse en perforaciones altas disminuyendo las pérdidas de circulación, e incluso son capaces de inhibir la corrosión. Gracias a las características físicas que presentan, se eliminan los grandes compresores que anteriormente se utilizaban con los lodos neumáticos y se

parecen a las herramientas "*Measurement While Drilling*" (MWD) y más tarde a las "*Logging While Drilling*" (LWD).

- *Lodos base aceite*

Por su naturaleza, este tipo de lodo está sujeto a otro tipo de regulaciones ante su uso en cualquier tipo de obra. Su contenido en aceites diesel y minerales como fluido base puede presentar algún tipo de problemas medioambientales, por lo que está completamente prohibido su uso en zonas marinas. Sin embargo, las regulaciones ambientales europeas prohíben el uso de lodo de base aceite, por lo que pozos de alta temperatura son perforados con lodos de base agua. Un componente muy común de estos fluidos son los cromo-lignosulfonatos que actúan como un dispersante de alta calidad, además de conferir un excelente control de la pérdida de flujo y de las propiedades reológicas (Shahbazi *et al*., 2006).

Sin embargo, los continuos cambios en la normativa medioambiental hacen que surjan dudas sobre la utilización de estos elementos por su composición de base cromo, por lo que se ha investigado sobre otro tipo de lodos basado en arcillas y polímeros capaces de proporcionar casi las mismas características que los lodos de base aceite (Oakley *et al*., 1993; Tehrani *et al*., 2009).

En el año 2009, en la zona china de Zhangdian surgieron problemas a la hora de realizar un agujero de cierto diámetro por la presencia de alta cantidad de arcillas activas. Fue entonces cuando utilizaron un tipo de fluido de perforación basado en siliconas de alto peso molecular que permitió realizar las obras disminuyendo la hinchazón que proporcionaban las arcillas (He *et al*., 2009).

- *Lodos de base sintética*

El problema principal que presentan los lodos de base aceite (OBMs) es su capacidad nula para la biodegradación. Además, la estricta legislación obliga a muchas empresas a controlar los derrames fuera de costa. Por ejemplo, en las regiones del Mar del Norte no está permitida la descarga de recortes aceitosos, ni en el Golfo de México donde la descarga de dichos recortes dependen del tipo y la cantidad de aceite que los recubra.

Para poder solventar dichos problemas medioambientales, en 1993 se crearon una serie de productos sintéticos que sustituyeron a los aceites, transformando los lodos en una mezcla con un comportamiento similar a los lodos de base agua.

Los lodos sintéticos dependen del nivel de biodegradación y bioacumulación que se requiera (por ejemplo, los materiales con contenido en oxígeno se degradan más fácilmente) y de la eliminación parcial o total que quiera hacerse de los hidrocarbonos aromáticos (que condicionan la toxicidad del aceite) (Ripa *et al*., 2010).

Una forma sencilla de clasificar los fluidos sintéticos dependerá de su solubilidad en agua (Figura II-17):

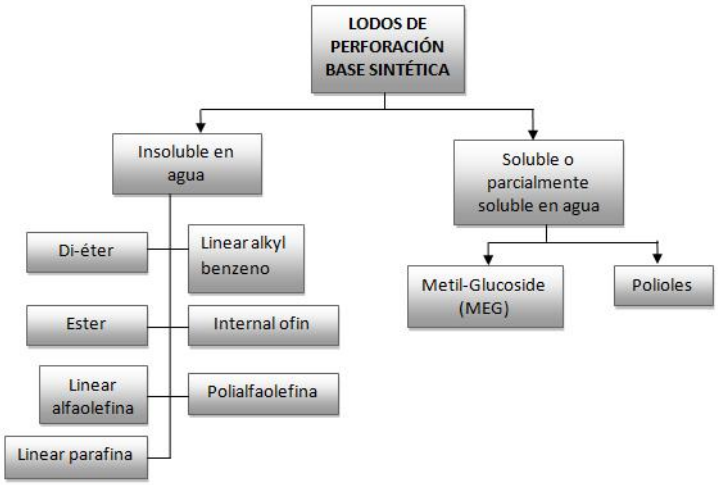


Figura II-17. Clasificación de lodos de perforación de base sintética

II.5.3. Mezcla de lodos con cal. Aplicaciones

Los lodos procedentes de la construcción subterránea son materiales que presentan una serie de condiciones que no afectan de forma positiva al medioambiente, siendo la mayoría depositados en vertederos autorizados o incluso no autorizados por la legislación vigente.

En EEUU se ha utilizado mucho la técnica lodo-cal a lo largo del tiempo, sobre todo en pistas de aeropuertos. Por ejemplo, en los aeropuertos de Denver, Dallas Ft. Worth y Newark se ampliaron las pistas de aterrizaje y despegue a partir de materiales procedentes de obras colindantes tratados con cal. No obstante, al tratarse de pistas que iban a estar sometidas a numerosas tensiones decidieron utilizar lechada de cal debido a que la cal seca podía empolvar los aviones y el equipo mecánico (Esrig, Mac Kenna & Forte, 2003).

En 1994 se puso en práctica esta técnica sobre las ruinas de Angkor localizadas en Camboya. El proyecto fue realizado por el gobierno japonés y se centró en estabilizar con cal los lodos que aparecían alrededor del edificio central, de manera que no se

produjera ningún tipo de desprendimientos. Los resultados obtenidos demostraron que el uso de la cal aumentaba la capacidad portante, con lo que disminuían las oportunidades de derrumbe (Nakazawa *et al*., 2005).

En el año 2000 en el aeropuerto del Prat en Barcelona surgieron problemas por el asentamiento limo-arcilloso sobre el que estaba ubicado el aeropuerto y por su cercanía con el nivel freático. Después de numerosos estudios, los investigadores optaron como solución al problema utilizar materiales cercanos al propio aeropuerto, tratados con cal en una capa de 40 cm. de espesor. Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios, llegando incluso a utilizar este método en pistas de despegue y aterrizaje (Oteo, 2003).

En el año 2006 se inauguró la prolongación de la línea 11 del metro de Madrid. Esta prolongación conectaba los barrios existentes de la ciudad con los que estaban emergiendo en ese momento. Durante esta obra fueron reutilizados 165.000 m^3 de lodos procedentes de la excavación, siendo tratados con un 2 % de cal para su aplicación en los caballones anti-ruido de la R-5 (Martín-Diaz, 2007).

En el año 2007, el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Toronto (Canadá) publicó en una revista de alto prestigio una serie de estudios basados en la estabilización de los suelos de Papúa (Nueva Guinea) utilizando cal y otros recursos naturales. Los resultados obtenidos tuvieron gran éxito por parte del gobierno guineano, llegando incluso a utilizar este tratamiento en presas, viviendas y aeropuertos (Hossain, Lachemi & Easa, 2007).

Más tarde, este mismo tratamiento fue utilizado en las obras de la pista 15 del aeropuerto de Barajas (Madrid) y del edifico satélite. En esta ocasión, utilizaron un 3% de cal ya que los materiales de aportación contenían una cantidad superior de humedad.

Sin embargo, no solo se han utilizado las mezclas lodo-cal para estabilizar pavimentos para el transporte, también se han utilizado para estabilizar cimientos de edificios en construcción. En el año 2009 fue estabilizada una superficie de 80.000 m^2 con cal localizada en Windhaven (Alemania), con el objetivo de construir una nave industrial para el almacenamiento agrícola.

II.6. MEZCLAS BITUMINOSAS

II.6.1. Definición

Según el artículo 542 del PG-3 se definen como *"mezclas bituminosas para capas de rodadura, drenantes y discontinua, aquellas cuyos materiales son la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos, polvo mineral y eventualmente aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante"*. Sin embargo, en esta tesis se presentan dos publicaciones internacionales sobre mezclas bituminosas, centradas en el comportamiento del filler o polvo mineral y en la mejora de las propiedades de las mezclas bituminosas.

II.6.2. Clasificación de mezclas bituminosas según el número de huecos

La clasificación tradicional de las mezclas bituminosas se compone de mezclas bituminosas fabricadas en frío y en caliente.

Las mezclas bituminosas en frío son una combinación de un árido y un ligante bituminoso (bien en frío o en caliente) que puede manejarse, extenderse y compactarse a temperatura ambiente. Por el contrario, las mezclas bituminosas en caliente son una combinación entre áridos y ligante, los cuales deben ser calentados (no necesariamente

el filler) y que son extendidos y compactados siempre a temperatura superior a la ambiental.

Por otro lado, existe otro tipo de clasificación de mezclas bituminosas que atiende de forma más exacta a las tratadas en este trabajo de investigación. Dicha clasificación está basada en los huecos que contiene cada mezcla una vez compactada. Las mezclas que contienen un número grande de huecos se denominan *mezclas porosas,* mientras que las que presentan un número pequeño de huecos se denominan *mezclas cerradas.* No obstante, las que presentan un rango intermedio son denominadas *mezclas semicerradas*.

Según el artículo 542 del PG-3 el contenido de huecos que presentan las mezclas bituminosas es un parámetro fundamental a la hora de su aplicación en obra. El ensayo del contenido de huecos viene determinado por la norma UNE EN 12697-8 (2003).

A continuación, se presenta la Tabla II-2 con una clasificación de mezclas bituminosas según el número de huecos que presentan:

Tabla II-2. Clasificación de mezclas bituminosas según el porcentaje de huecos

Tipo	Según porcentaje de huecos
Cerradas	h < 6 %
Semi-cerradas	6 < h < 12 %
Abiertas	12 < h < 20 %
Porosas	h > 20 %

II.6.3. Dosificación de mezclas bituminosas en caliente. Ensayos.

Los ensayos a tener en cuenta en la dosificación de mezclas bituminosas en caliente son numerosos. No obstante, a continuación se enumeran algunos de los que se han desarrollado para este trabajo de investigación.

- Determinación del contenido de huecos
- Determinación de las densidades de las mezclas bituminosas
- Ensayo de compactación Marshall
- Ensayo de inmersión-compresión
- Ensayo de sensibilidad al agua
- Ensayo cántabro de pérdida por desgaste

II.6.4. Clasificación del filler o polvo mineral

El filler tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas bituminosas debido a su elevada superficie específica y al aumento de la cohesión y adherencia que aporta al resto de áridos y ligante. El objetivo de este polvo mineral es rellenar los huecos del esqueleto de los áridos gruesos y finos, e impermeabilizar y densificar el esqueleto (Kraemer *et al*., 2004).

Es importante que el material de "relleno" no sea plástico, ya que su naturaleza, finura, actividad, y proporción, marcarán muchas de las características que tenga la mezcla bituminosa una vez aplicada en obra. Este material puede proceder de la trituración de los propios áridos que integran la mezcla, procedentes de yacimientos de origen fluvial, eólico, o marino y canteras. Los áridos procedentes de yacimientos pueden utilizarse tal y como se extraen (áridos rodados), mientras que los procedentes de canteras son áridos sometidos a un proceso total o parcial de machaqueo (Dorfman & Rivara, 1985).

Sin embargo, también existen "fílleres de aportación", procedentes de procesos industriales y utilizados por la escasez de recursos naturales o por otro tipo de razones especiales (Figura II-18). Algunos de estos filleres de aportaciones usados hoy en día son las cales, cemento, cenizas volantes, polvo de neumático fuera de uso (NFUs),

escorias de acero, residuos de plástico, residuos de construcción y demolición (RCDs), etc.

Figura II-18. Fílleres de aportación (cal y cemento)

II.6.5. Fílleres de aportación. Aplicaciones

El concepto de filler se conoce desde hace más de 50 años en carreteras y es durante los últimos 20 años cuando ha experimentado un mayor desarrollo.

A finales del siglo XIX la compañía *National Vulcanite* utilizó una mezcla asfáltica denominada "vulcanita" la cual contenía un 0,3 % de cal en las ciudades de Washington D.C. y Buffalo. Posteriormente, a principios del siglo XX Richardson menciona la utilización de cal apagada en Inglaterra.

Décadas más tarde, los científicos Duriez y Arrambide recomendaban en Francia la utilización de cal en las mezclas para mejorar la adhesividad entre el betún y los áridos. De esta forma, fueron ellos los que recomendaron el uso de este material en las pistas de aterrizaje en Inglaterra, Francia y Alemania. Además, según dichos autores cuanto mayor era la superficie específica del material, mayor era su carácter activo en la modificación de las características de los pavimentos bituminosos.

En 1965 el ingeniero de caminos Fernández del Campo explicaba como en Francia se utilizaban cal, cemento y cenizas volantes como filler en la construcción de pavimentos flexibles. Una de las construcciones que señala es la Autopista del Sur en las proximidades del Valle de L'Ecole en la que se utilizaron este tipo de materiales para su pavimentación.

Pero no fue hasta la década de los 70 cuando se produjo un gran interés por la utilización de la cal en mezclas bituminosas en EEUU. En parte, este interés fue debido a la disminución en la calidad del asfalto por la enorme crisis del petróleo de 1973. La humedad y las heladas eran los problemas principales de los daños que se producían en las carreteras, por lo que tuvieron que buscar una solución que no fuese muy cara para acabar con estos inconvenientes. La Asociación Nacional de la Cal presentó en el año 2003 numerosas obras ejecutadas con cal en los EEUU concluyendo con que las propiedades de la cal son beneficiosas a largo plazo para las mezclas bituminosas.

Agency	Lime Treated			Non-Lime Treated		
	10%	Average	90%	10%	Average	90%
a) Interstate						
Arizona	13	15	17	10	12	14
California	8	10	12	6	8	10
Colorado	8	10	12	6	8	10
Georgia	7	10	15		N/A	
Mississippi	7	10	15		N/A	
Nevada*	7	8	9	3	4	7
Oregon	10	15	20	8	12	15
South Carolina	10	12	15		N/A	
Texas	8	12	15	7	10	12
Utah	15	20	25	7	10	15
b) State and U.S. Highways						
Arizona	18	20	22	15	17	20
California	8	10	12	6	8	10
Colorado*	8	10	12		8	
FHWA	15	20	25		N/A	
Georgia	8	10	14		N/A	
Mississippi	12	15	17		N/A	
Nevada	10	12	14	6	8	10
Oregon	15	17	20	8	12	15
South Carolina	8	10	12		N/A	
Texas	10	12	15	8	10	12
Utah	15	20	25	7	10	15
c) Low Volume Roads						
Arizona	20	25	30	15	20	25
California		N/A			N/A	
Colorado*	10	12	15	8	10	12
FHWA	15	20	25		N/A	
Georgia	8	10	15	8	10	15
Mississippi	12	15	17		N/A	
Nevada	18	20	22	12	15	18
Oregon	15	20	25	7	10	15
South Carolina	10	15	20		N/A	
Texas	8	12	15	7	10	15
Utah	7	10	15	3	5	7

*Pavement preservation
N/A = not applicable

Figura II-19. Cal utilizada en obras ejecutadas en EEUU (2003)

El uso de la cal como filler de aportación en mezclas bituminosas en Europa es escaso en comparación con EEUU (Figura II-19). Algunos países como Holanda, Austria o Alemania poseen carreteras con mezclas que han sido elaboradas con cal en su composición y que están demostrando buenas prestaciones mecánicas y resultados satisfactorios a lo largo de sus ciclos de vida.

Una de las primeras aplicaciones de cal en mezclas bituminosas se produjo en Francia en 1984, concretamente en la Autopista A1 (París-Lille). Esta carretera forma parte de la red SANEF, una de las más concurridas en Francia transitada aproximadamente por 35.000 vehículos al día, con un 27% de camiones pesados. SANEF observó que la cal modificaba las mezclas bituminosas mejorando su resistencia entre un 20-25 %. Posteriormente, se hicieron estudio en centros ubicados en los Países Bajos sobre mezclas porosas con cal, las cuales incrementaban la resistencia de la mezcla hasta en un 40 %. Hoy en día, estas mezclas cubren el 70 % de las carreteras del País.
La experiencia en el país danés también fue satisfactoria, aumentando la durabilidad de las carreteras en un 20 %.

Sin embargo, en España se restringe el uso de la cal a circuitos de la Fórmula 1 como Valencia o Alcañiz, pero aún no se ha dado el caso de utilizarlo en autovías teniendo preferencia por el cemento (Gallego-Medina, 2002).

En 1984 el Instituto Tecnológico de Warangai (India) presenta un estudio sobre la reducción del betún en las mezclas bituminosas utilizando cal como filler. En este caso la cal es elegida por su afinidad con el betún y su finura, además de por su bajo coste y su abundancia en el país. Los resultados obtenidos en este estudio fueron de gran impacto en el sector de la ingeniería civil ya que demostraban que el aporte de este material podía economizar sustancialmente la fabricación de las mezclas bituminosas.

Más tarde, el investigador Esa Maninen (1986) realizó un estudio comparativo entre el uso de la cal y la escoria de acero en las temporadas de otoño y verano con dos betunes de procedencia distinta. Los resultados demostraron que el uso de estos materiales como filler disminuía el desgaste de las mezclas hasta en un 30 %.

En el año 2007, la Universidad Politécnica de Cataluña en asociación con la Universidad de la Plata (Argentina) presentó una serie de resultados ligados al método funcional denominado "Universal de Caracterización de Ligantes" más conocido como Método UCL, en los cuales se demostraba que si la proporción en volumen del filler no excedía a la relación concentración volumétrica / concentración crítica (C_v/C_c), se obtendría una buena resistencia al envejecimiento.

A partir del desarrollo de este método, se han ido variando las clases de filler utilizadas, como por ejemplo la utilización de polvo de neumático como filler en mezclas bituminosas desarrollado por la Universidad de Cataluña, en el cual los resultados demuestran como este tipo de filler disminuye la compactabilidad de la mezcla y a su vez es el causante de que se produzcan mayores pérdidas en el ensayo cántabro.

En el año 2009 la empresa del Grupo CALIDRA suministró a la empresa PRODECON 1.200 toneladas de cal para construir 22 km. de carretera con dos vías en sentido contrario de dos carriles cada una. Esta carretera estaba ubicada en el Departamento de Comayagua (Honduras) y se utilizó 1 % de cal por cada tonelada de asfalto.

CAPÍTULO III.- METODOLOGÍA

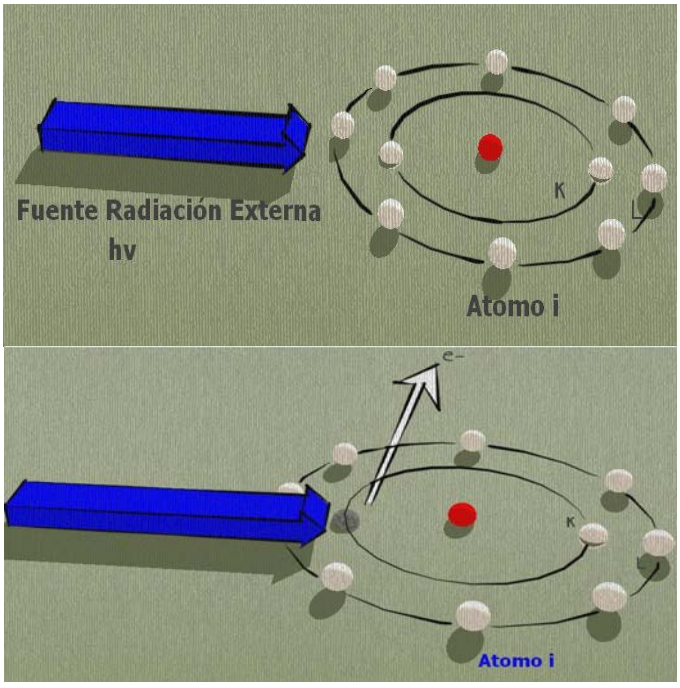
III.1. CARACTERIZACIÓN DE LODOS PARA SU APLICACIÓN COMO TERRAPLENES EN CARRETERAS

III.1.1. Caracterización mineralógica

III.1.1a. Análisis químico por fluorescencia de rayos X

Las partículas de los suelos naturales están formadas por minerales formados a partir de una erosión química y su composición es distinta de las rocas de las que proceden cada uno de ellos (Ninov & Donchev, 2008). Por ello, es necesario realizar diversos análisis mineralógicos para determinar los elementos químicos que las componen.

El análisis químico por fluorescencia de rayos X es una técnica multi-elemental que consiste en irradiar la muestra con radiación X provocando la expulsión de un electrón interno de los átomos presentes en la matriz. El electrón expulsado es sustituido por otro, de una capa superior y este proceso genera la emisión de fotones de rayos X característicos de cada elemento presente en la muestra (Figura III-1).



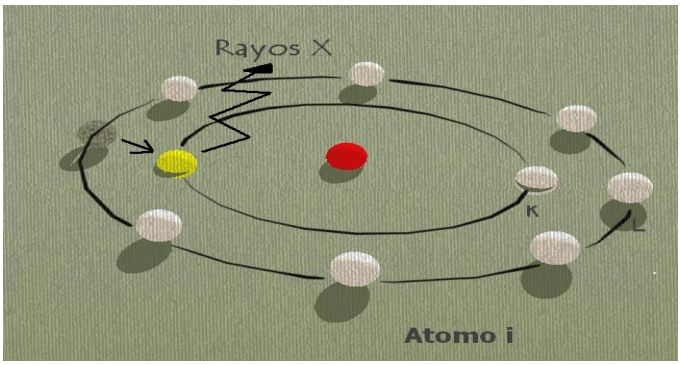


Figura III-1. Expulsión y sustitución del electrón interno de la matriz

Las ventajas de este tipo de ensayo son numerosas pero hay que señalar la rapidez con la que se obtiene el resultado y la determinación simultánea de 25 o 30 elementos, además de su alta sensibilidad.

Para la realización de este ensayo se ha utilizado un espectrómetro de fluorescencia de rayos X ARL ADVANT´XP (XRF) (Figura III-2).

Figura III-2. Espectrómetro de fluorescencia de Rayos X

III.1.1b. Análisis por Espectroscopia IR

Los primeros equipos comerciales de espectroscopia infrarroja aparecieron durante la Segunda Guerra Mundial (1939), cuando fueron utilizados para la síntesis del caucho sintético. Además, éste método fue utilizado para determinar la estructura molecular de la penicilina cuyo progreso ha llegado hasta nuestros días. Posteriormente, esta técnica fue utilizada para el estudio de los silicatos, incluyendo los minerales de la arcilla, y en forma más limitada al estudio de los componentes orgánicos.

Esta técnica se basa en la capacidad de absorción de la radiación infrarroja por parte de cualquier sustancia. La absorción de este tipo de radiación está relacionada con los diferentes modos de vibración de las moléculas que componen la muestra a analizar. De esta manera, cada muestra tiene asociado un espectro de absorción en el infrarrojo característico. Esta técnica es apropiada para el análisis e identificación tanto de sustancias orgánicas como inorgánicas (Figura III-3).

Figura III-3. Espectrofotómetro infrarrojo

III.1.1c. Análisis por Difracción de rayos X

A partir del descubrimiento realizado por W.C. Roëntgen (1895) en Viena de los rayos X y su difracción en los cristales, se desarrolla con bastante rapidez el estudio sobre la difracción de rayos X extendiéndose hasta Alemania. Dos ingenieros llamados P. Debye y P. Scherrer (1916) junto con A. Hull de Estados Unidos emplearon este método en polvo policristalino, del cual salieron tres variantes de estudio distintas: Técnica de Debye-Scherrer, la técnica de Seeman-Bohlin y la técnica del difractómetro.

La difracción de rayos X es una técnica no destructiva basada en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación. Cuando un haz de rayos X incide sobre la muestra pulverizada, parte de este haz se dispersa en todas direcciones a causa de los electrones asociados a los átomos o iones que se encuentra en el trayecto, pero el resto del haz da lugar al fenómeno de difracción. Este fenómeno tiene lugar siempre que la estructura esté ordenada y si se cumplen las condiciones dadas por la Ley de Bragg, que relaciona la longitud de onda de los rayos X y la distancia interatómica con el ángulo de incidencia del haz difractado.

Para el análisis de difracción por rayos X se ha utilizado un difractómetro de rayos X PHILIPS PW 1820 (Figura III-4).

Figura III-4. Difractómetro de rayos X

Los resultados de este ensayo sobre las muestras pulverizadas se recogen en difractogramas que muestran una distribución de picos en función de los valores angulares, 2θ correspondientes a las reflexiones que representan. Las alturas máximas de los picos y sus áreas constituyen magnitudes muy representativas de las intensidades de las reflexiones correspondientes, las cuales son medidas con gran exactitud (Figura III-5).

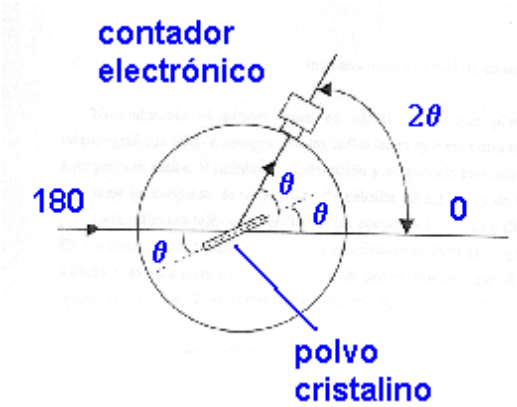


Figura III-5. Registro gráfico de la difracción del polvo cristalino

III.1.2. Caracterización química

III.1.2a. Contenido en materia orgánica por permanganato potásico

Para la obtención del contenido en materia orgánica de las muestras, existen dos procedimientos:

- Método del agua oxigenada (UNE-EN 7368 (1977)).

- Método del permanganato potásico (UNE-EN 103-204 (1993)).

En esta investigación se optó por el método del permanganato potásico porque es un ensayo relativamente sencillo.

Para este ensayo se utilizan 50 g de muestra pasado por un tamiz de 160 μm. Esta fracción de material se seca en estufa a una temperatura aproximada de 110º C durante 24 horas. Posteriormente la fracción de muestra se enfría en un desecador con cloruro cálcico y se pesan dos porciones en una balanza de precisión de 0,2 y 0,3 g.

Se coloca cada porción en un matraz Erlenmeyer de 500 cm^3 y se añaden 25 cm^3 de disolución de ácido sulfúrico al 9 %. Una vez que ha sido realizada la mezcla, se calienta en un mechero hasta ebullición. Al cabo de 3 minutos y manteniendo la ebullición se añaden 1,5 cm^3 de ácido nítrico concentrado y se mantiene en el mechero durante 1 o 2 minutos más.

Se retira el matraz del mechero y se añaden 125 cm^3 de agua destilada caliente. Se añade permanganato potásico (0,1 N) igual. La cantidad que se añade será igual al cociente entre 20 y el factor de normalidad de la disolución de permanganato empleada.

Después se vuelve a calentar en el mechero hasta su ebullición durante 4 o 5 minutos. Se retira de la fuente de calor, y se añaden con una bureta, el número de cm^3 de

disolución de ácido oxálico (0,1. N) igual al cociente entre 20 y el factor de normalidad de la disolución de ácido oxálico empleado. El líquido deberá perder la coloración del permanganato. Posteriormente, se refrigeran las paredes del matraz hasta llegar a 70º C. Se valora el exceso de ácido oxálico con la disolución de permanganato hasta coloración permanente. Se anotan los cm^3 de la disolución de permanganato denominándose C_1 a esta cantidad.

El contenido de materia orgánica de cada porción de muestra, expresado en %, se calcula por medio de la expresión [III-a]:

$$\% \text{ materia orgánica} = \frac{0{,}1032 \cdot C_1 \cdot f}{M} \qquad \text{[III-a]}$$

Donde:

C_1: cm^3 de permanganato potásico empleados en cada porción de muestra.

F: Factor de normalidad del permanganato.

M: Porción de muestra ensayada

III.1.2b. Contenido en sulfatos solubles

Según la normativa vigente UNE-EN 103-201 (1996), este ensayo consiste en obtener la proporción de sulfatos solubles en agua, pasándolos a disolución mediante agitación con agua y precipitando luego los sulfatos disueltos (procedentes de la muestra) con una disolución de cloruro bárico. El procedimiento seguido es habitual en cualquier gravimetría.

Su resultado se expresa habitualmente en % de sulfatos solubles, y se puede expresar en % de yeso aplicando un factor de corrección. Cuando la muestra contiene partículas gruesas, se puede referir el resultado a la muestra original siguiendo el mismo procedimiento descrito para el contenido en materia orgánica.

En caso de necesitar conocer rápidamente si la muestra tiene sulfatos o no se puede acudir al ensayo cualitativo que es el denominado "reconocimiento de sulfatos solubles en suelos", el cual es reconocer su presencia, pero no valorar su contenido.

III.1.2c. pH y conductividad eléctrica

Este ensayo permite clasificar las muestras en los grupos de ácido, básico o neutro. El procedimiento usado se rige por la norma UNE-EN 77305 (1999).

Se pesan 10 g de suelo seco al aire o a una temperatura no superior a 40 ºC, que pase por un tamiz de 2 mm de abertura. Se introduce esta porción en la botella de muestreo y se añade 5 veces su volumen de agua, disolución de cloruro potásico o disolución de cloruro cálcico. Posteriormente, se agita o mezcla enérgicamente la suspensión durante 5 minutos empleando el agitador mecánico o el mezclador y se espera al menos 2 horas pero no más de 24 horas. Se ajusta el pH-metro (Figura III-6) tal y como se indica en el manual del fabricante y mide la temperatura de la suspensión teniendo cuidado de que la diferencia entre la disolución tampón y la suspensión del suelo no sea mayor que 1º C. Se agita la suspensión y se lee el pH en la suspensión decantada anotándolo, a ser posible, con dos decimales.

Figura III-6. pHmetro y medidores

El ensayo de conductividad eléctrica permite conocer el nivel de salinidad de cada muestra teniendo en cuenta que el contenido de agua será muy importante a la hora de conocer dicha conductividad. Este ensayo se realizó acorde a la norma UNE-EN 77308 (2001). Para ello se utilizó un medidor de conductividad, una balanza analítica con precisión 0,01 g., un aparato de agitación y un vaso de vidrio (Figura III-7). Se extraen 20 g. de muestra de tamaño inferior a 2 mm. y se colocan en un recipiente de agitación. Se añaden 100 ml de agua a una temperatura de 20º C ± 1º C y se agita durante 30 segundos. Posteriormente, se introduce la varilla del conductivímetro y se anota el valor de la conductividad eléctrica de la muestra.

Figura III-7. Conductivímetro

III.1.2d. Contenido en sales solubles

La mayoría de los materiales procedentes de obras de excavación contienen un porcentaje determinado de sales solubles. La acumulación de este tipo de elementos se debe fundamentalmente a la influencia de las filtraciones, drenajes y aguas de irrigación.

Por ello, el artículo 330 del PG-3 exige en su normativa que el contenido de sales para un suelo tolerable utilizado en terraplenes debe ser inferior al 1 % y para ser utilizado en explanadas deberá de ser inferior al 0,2 %.

El ensayo ha sido realizado acorde a la norma NLT-114/99, según la cual se deben coger 50 g. de muestra (previamente secada en estufa) e introducirlos en un vaso con 500 cm^3 de agua destilada. Se agita la mezcla por volteo durante un tiempo mínimo de una hora (Figura III-8). Posteriormente, con ayuda de una pipeta se extraen unos 250 cm^3 de líquido claro y se filtran por papel de poro fino. Del líquido filtrado se extraen 100 cm^3 y se vierten en una cápsula de porcelana dejándola en un baño maría hasta que se vapore toda el agua. Se completa la desecación del residuo en estufa a 110º C ± 5º C hasta masa constante. Una vez completada la desecación se pesa el residuo en una balanza analítica y se realiza el siguiente cálculo [III-b]:

$$\text{Sales solubles de 100\% de muestra} = \frac{V \cdot r}{v \cdot p} \times 100 \qquad \text{[III-b]}$$

Donde:

V = Volumen inicial en cm^3 del agua destilada en el frasco (500 cm^3)

v = Volumen en cm^3 del extracto acuoso situado en la cápsula (100 cm^3)

r = Masa en gramos del residuo de la cápsula

p = Masa inicial del suelo seco, en gramos (50 g.)

Figura III-8. Ensayo sobre el contenido de sales en cada muestra

III.1.3. Caracterización mecánica

III.1.3a. Análisis granulométrico

El objetivo principal de un análisis granulométrico es obtener la distribución por tamaño de las partículas presente en una muestra. Este ensayo es importante ya que para poder ser aplicado en terraplenes o explanadas de carreteras, debe cumplir con una serie de requisitos granulométricos exigidos por el PG-3.

Para obtener la distribución de tamaños de cada muestra se utilizan una serie de tamices normalizados y numerados dispuestos en orden decreciente acorde a la norma UNE-EN 103-101 (1995).

Por supuesto, la propiedad que influye en el comportamiento de los suelos no es solo el tamaño de los granos. Su compacidad, forma y distribución granulométrica, por citar algunas, también son propiedades muy importantes.

Para las muestras con tamaño de partículas superior a 0,08 mm. se utiliza el método de análisis mecánico mediante tamices de abertura (Figura III-9), como se muestra en la

Tabla III-1. Sin embargo, para las muestras cuyas partículas son inferiores a 0,08 se utiliza el método de análisis granulométrico por sedimentación con densímetro acorde con la norma UNE-EN 103-102 (1995).

Tabla III-1. Distribución de tamaños por abertura de tamices

Tamiz (ASTM)	Tamiz (mm.)	Material
3″	80	GRAVA
2″	50	
½″	40	
1″	25	
¾″	20	
3/8″	10	
Nº 4	5	ARENA GRUESA
Nº 10	2	ARENA MEDIA
Nº 20	0,90	
Nº 40	0,50	
Nº 60	0,30	ARENA FINA
Nº 140	0,10	
Nº 200	0,08	

Figura III-9. Tamices y máquina del ensayo del análisis granulométrico

Sin embargo, el método granulométrico por sedimentación es completamente distinto al método de tamizado (Figura III-10). Fue diseñado por Goldschmidt en Noruega en el año 1926 y más tarde llevado a los Estados Unidos por Bouyoucos de forma independiente. Este método está basado en la Ley de Stokes [III-c] relacionando la velocidad máxima de caída de una partícula en un medio viscoso con el tamaño de su diámetro:

$$V = \frac{\gamma_S - \gamma_W}{18\eta} D^2 \qquad \text{[III-c]}$$

Figura III-10. Densímetro y probeta del ensayo

III.1.3b. Límites de Atterberg

Este ensayo define las humedades del suelo que diferencian su estado sólido, plástico o viscoso (Figura III-11).

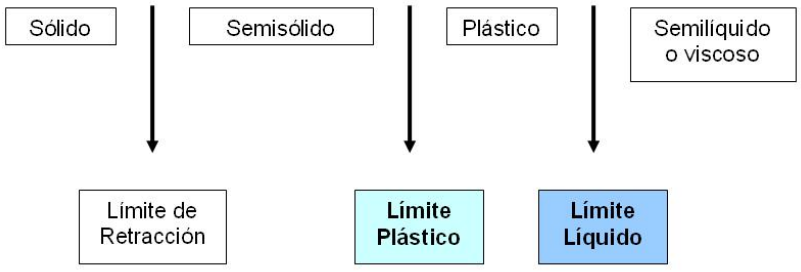


Figura III-11. Estados según los límites de Atterberg

Los límites de Atterberg, entre otros, nos indican la calidad del suelo (Figura III-12).

El ensayo para la determinación del límite líquido de un suelo se encuentra regulado por la Norma UNE-EN 103-103 (1994).

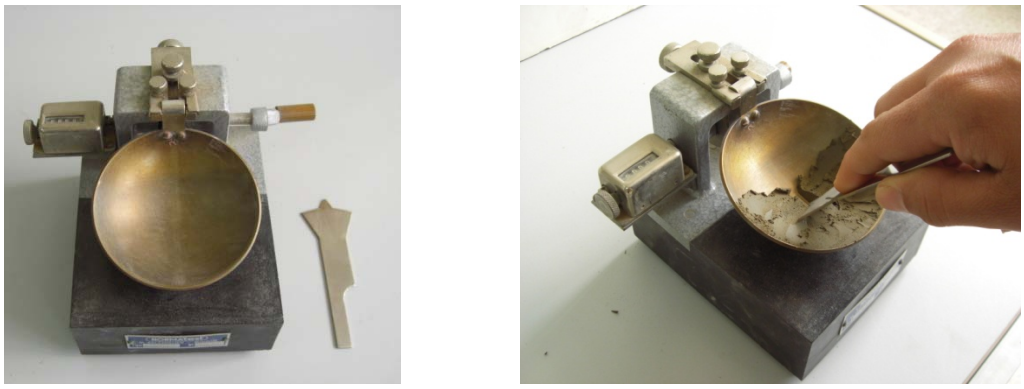


Figura III-12. Cuchara de Casagrande y acanalador

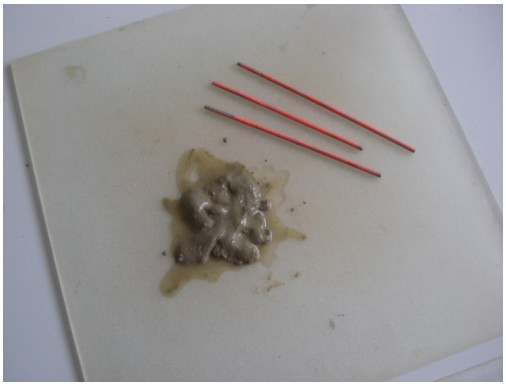


Figura III-13. Vidrio y barritas utilizadas en el ensayo de limite plástico

El ensayo de límite plástico se regula según la norma UNE-EN 103-104 (1993) (Figura III-13).

El índice de plasticidad "IP" se calcula a partir de límite plástico y del límite líquido a partir de la siguiente expresión [III-d]:

$$IP = LL - LP \qquad \text{[III-d]}$$

Donde:

IP: Índice de plasticidad

LL: Límite líquido

LP: Límite plástico

A igualdad de otros factores, cuanto mayor es el índice de plasticidad de un suelo menor es su permeabilidad.

III.1.3c. Humedad natural

Los suelos y las rocas pueden tener cualquier peso específico entre γ_d y $\gamma_{saturado}$ según su grado de saturación; es decir, según la fracción del volumen total de sus poros que esté ocupada por agua. Se llama "humedad" de un suelo al peso del agua dividido por el peso del suelo seco hasta peso constante a una temperatura comprendida entre 105 º y 110 ºC.

En el caso de la arcilla no debe pensarse que a la temperatura de 105º a 110 ºC ha perdido toda su agua. Realmente la partícula de arcilla se compone de un trozo de mineral arcilloso y una capa de agua adsorbida. Esta agua adsorbida es expulsada completamente a temperaturas superiores a 110ºC. Por este motivo es muy importante vigilar la regulación de la estufa. Este ensayo se ha realizado acorde a la Norma UNE-EN 103-300 (1993).

En el caso de las arenas y los limos, por lo general, siempre están húmedos o mojados. Los suelos orgánicos suelen contener gases producidos en reacciones de descomposición. Este gas puede encontrarse en el terreno y por ello una gran parte de él puede estar disuelto en el agua y el suelo estará casi saturado. Sin embargo, al extraer

una muestra y disminuir la presión del fluido, el gas puede segregarse de la disolución. Entonces la muestra aumenta de volumen a contenido de humedad constante y el grado de saturación disminuye.

En la Tabla II-2 se incluyen una lista de términos según el grado de saturación:

Tabla III-2. Grado de saturación de las arenas y limos

Descripción	**Sr (%)**
Seca	0
Ligeramente Húmeda	1-25
Húmeda	26-50
Muy Húmeda	51-75
Mojada	76-99
Saturada	100

En el caso de que el suelo contenga un excesivo porcentaje de materia orgánica contenido en yeso, al introducirlo en la estufa se podría producir un proceso de oxidación, por lo cual se propone bajar la temperatura de la estufa aproximadamente a 60 º C.

El tiempo necesario para llegar a peso constante depende del tipo de suelo y del tamaño de la muestra. Normalmente, 18 horas son suficientes para cualquier tipo de suelo. Cuando se trata de suelos poco plásticos, el tiempo requerido suele ser bastante menor.

III.1.3d. Ensayo Proctor Normal

En general, todo terraplén o explanada debe compactarse para que forme una masa resistente y poco deformable. En la compactación de un suelo la cantidad de agua que contiene es determinante. Si se compactan muestras del mismo suelo en condiciones absolutamente idénticas, pero variando la humedad, se obtiene una curva en la que se encuentran representadas en abscisas las humedades y en ordenadas las densidades secas obtenidas.

La curva presenta un máximo, que indica la densidad máxima que puede obtenerse con un procedimiento de compactación fijo, y que corresponde a una humedad óptima, que es la que hay que dar al suelo para llegar a dicho resultado.

El ensayo de compactación más extendido es el ensayo Proctor. Este ensayo se ha realizado acorde a la norma UNE-EN 103-500 (1994), en más de dos versiones, normal y modificado (Figura III-14).

Figura III-14. Vista en planta y perfil del molde del ensayo Proctor

III.1.3e. Ensayo CBR. Análisis de la capacidad portante

La capacidad portante indica una resistencia a la deformación en condiciones determinadas de compactación y humedad, y el CBR se expresa en porcentaje de la carga requerida, para producir la misma penetración, en una muestra estándar de piedra triturada.

Para este ensayo es necesario conocer la humedad óptima del ensayo Proctor de referencia y se determina en condiciones de saturación. El procedimiento analítico se rige por la Norma UNE-EN 103-502 (1995) (Figura III-15) relacionando la densidad seca y el CBR.

Figura III-15. Cilindro CBR desmontado y montado para el ensayo

Figura III-16. Máquina de ensayo CBR

III.1.3f. Hinchamiento libre en expansión

El ensayo de hinchamiento libre acorde con la norma vigente UNE-EN 103-601 (1996) consiste en la determinación del hinchamiento libre de un suelo cohesivo en edómetro, entendiendo éste como "el incremento de altura, expresado en % del valor inicial, que experimenta una probeta de suelo cuando se encuentra confinada lateralmente, sometida a una presión vertical de 10 kPa y se inunda en agua".

También se puede determinar el hinchamiento libre de una probeta de suelo sometida a la presión que interese ensayar (Figura III-17).

Figura III-17. Bancada edométrica para los ensayos de colapso e hinchamiento

En este ensayo, el resultado obtenido también se ve muy afectado mucho por las condiciones ambientales existentes en la preparación de la muestra.

III.1.3g. Ensayo de asiento de colapso

El ensayo de colapso acorde a la norma NLT-254/99 se realiza en una célula edométrica. Si sometemos a una sobrecarga a un suelo parcialmente saturado, esperamos a que cesen los asientos debidos a ésta y a continuación anidamos, se produce, "en el caso de un suelo colapsable" un asiento muy brusco, que se conoce con el nombre de "colapso".

En general, se puede decir que este fenómeno es importante en suelos de estructura floja, dependiendo la magnitud del mismo de la presión a que se encuentre sometido.

III.2. CARACTERIZACIÓN ESPECÍFICA DE MEZCLAS BITUMINOSAS CON CAL Y OTROS FÍLLERES COMO FILLER DE APORTACIÓN

Mediante la presente investigación se pretende elaborar una mezcla bituminosa de resistencias y propiedades mejoradas y de aplicación inmediata en capas de rodadura, analizando la adhesividad existente entre árido-betún para paliar este problema.

III.2.1. Caracterización del filler

Los fílleres utilizados han sido: un hidróxido cálcico C90-S, un carbonato cálcico de cantera y un cemento de tipo CEM II/A-L 32.5R especificados según la norma UNE-EN 197-1 (2011).

Se han obtenido las densidades aparentes y pesos específicos de los fílleres por medio del ensayo en tolueno acorde a la norma vigente NLT 176/92 (1992). La finura del filler

está relacionada con su mayor o menor actividad desde el punto de vista de la estabilización del ligante en el sistema filler-betún. Por ello, los valores de las densidades aparentes en tolueno de los tres tipos de filler deberán estar en un rango de valores entre 0,5-0,8 g/cm^3, ya que dichos valores corresponden a una actividad media adecuada para su utilización en mezclas bituminosas. En este caso, el hidróxido y el carbonato cálcico están fuera del rango ya que presentan un menor peso específico que el cemento y una mayor finura, lo que origina su carácter hidrofílico. No obstante, al tratarse de minerales de aportación artificiales, estos resultados no presentarán ningún tipo de problema para poder continuar con la caracterización de los mismos.

Para calcular el peso específico de cada filler, se utilizó el procedimiento acorde a la norma argentina IRAM 1542/92 (1992).

- *Porosidad del filler compactado en seco*

Para realizar el cálculo de la porosidad del filler compactado en seco (UNE-EN 1097-4 (2009)) se calcula previamente la densidad del filler acorde con la norma UNE EN 1097-3 (1999).

El procedimiento es repetitivo ya que hay que realizar un mínimo de 100 golpes. En primer lugar se coloca el papel de filtro en el interior del aparato ajustando a la altura cero el cilindro. Una vez pesado el émbolo con el papel de filtro se anota la masa inicial como M_0 y se retira el papel. Se colocan aproximadamente 10 ± 1 gr de filler dentro del cilindro del bloque de compactación y se extiende de manera uniforme. Se coloca el papel de filtro encima y se coloca el émbolo en el cilindro presionándolo suavemente para compactar el filler. Se eleva el émbolo hasta su tope máximo y se deja caer libremente hacia la base repitiendo este procedimiento hasta 100 veces a intervalos de 1 segundo (Figura III-18).

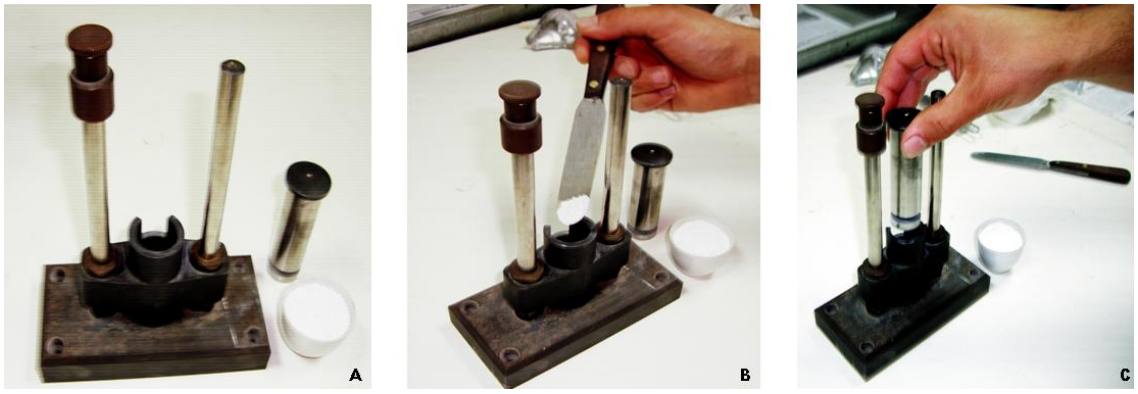


Figura III-18. a) Máquina para medir la porosidad del filler. b) Introducción del filler en la máquina. c) Medición por golpeo de la porosidad del filler

Los valores de la porosidad del filler se calculan a partir de la siguiente expresión [III-e]:

$$V = \left(1 - \frac{4 \cdot 10^3 \cdot m_2}{\pi \cdot \alpha^2 \cdot \rho_f \cdot h}\right) \cdot 100 \qquad \text{[III-e]}$$

Donde:

V: Porosidad, en %.

m_2 : Masa de la carga compactada, en gramos.

α: Diámetro interno del cilindro del bloque de compactación, en milímetros.

ρ_f: Densidad real del filler, en gramos por metro cúbico.

h: Altura del filler comprimido, en milímetros.

III.2.2. Mezclas bituminosas

Las mezclas bituminosas estudiadas son del tipo AC 16 S con árido ofítico y con un porcentaje de huecos que depende del filler utilizado. Según la normativa el volumen de huecos para capas de rodadura debe estar comprendido entre 4 y 6 % aunque ha de tenerse en cuenta que la fabricación de la probeta Marshall para el ensayo cántabro ha

sido mucho menos estricto ya que se ha compactado a 50 golpes por cara, lo cual implica un aumento de huecos. Se ha utilizado un 4,5 % de betún B 60/70 sobre mezcla y es caracterizado por las propiedades recogidas en la Tabla 1.

Al ser un proceso experimental comparativo entre el mismo tipo de probetas compactadas, se ha optado por el estudio en el peor caso de compactación en obra.

III.2.3. Densidad relativa en parafina

Este ensayo consiste en calcular la densidad relativa de los áridos gruesos, finos y del filler utilizando como medio de inmersión agua destilada a partir de un picnómetro con características especiales (NLT 167/74 (1974)).

Se secan 600 gramos de material en estufa a una temperatura aproximada a 110ºC. Posteriormente se rellena el picnómetro hasta su enrase sin dejar burbujas de aire ocluidas introduciéndolo en un baño a 25º C. Una vez haya cogido la temperatura correcta, se saca del baño y se pesa (D). Se vuelve a rellenar el picnómetro hasta una tercera parte y se pesa anotando el resultado (A).

Se vierte la muestra en el picnómetro con la ayuda de un embudo, procurando no dejar nada en las paredes y se pesa de nuevo (B).

Se rellena de nuevo el picnómetro hasta su enrase agitándolo para que todas las burbujas de aire ocluidas salgan al exterior. Esta agitación se repite cada 15 minutos las veces que sea necesario. Una vez que las burbujas hayan desaparecido se pesa de nuevo el picnómetro anotando el resultado (E).

A partir del procedimiento realizado se calcula la densidad relativa a partir de la siguiente expresión [III-f]:

$$\text{Densidad Relativa} = \frac{B-A}{\frac{(C+D)-E}{X}} = \frac{C}{\frac{V}{X}} = \frac{C}{V_R} \qquad \text{[III-f]}$$

Donde:

B: Masa del picnómetro y muestra sin llenar totalmente de agua destilada (gr.)

A: Masa del picnómetro sin llenar totalmente de agua destilada (gr.)

(B-A): Masa de muestra seca (gr.)

D: Masa del picnómetro lleno de agua destilada hasta el enrase (gr.)

E: Masa del picnómetro y muestra lleno de agua destilada hasta el enrase (gr.)

(C+D)-E = V: Volumen ocupado por la muestra a 25ºC

X: Densidad a 25ºC del agua destilada (gr/cm^3)

V_R: Volumen real de la muestra (cm^3)

III.2.4. Proceso de fabricación de mezclas bituminosas

El proceso de fabricación de las probetas se inicia con que los materiales que las componen cumplan con las especificaciones de la norma. Estos materiales se lavan y se secan previamente, ya que al proceder de diferentes canteras pueden contener impurezas o algún material que perjudique las propiedades de la mezcla (Figura III-19).

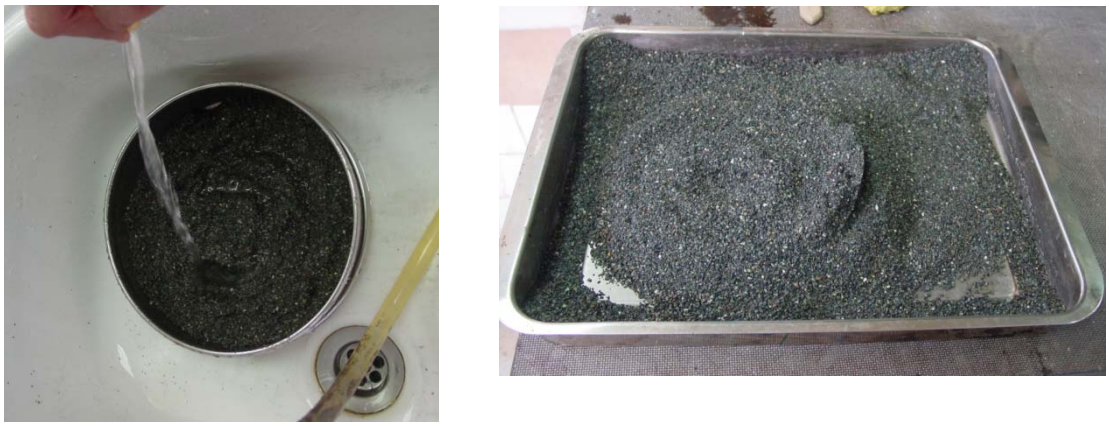


Figura III-19. Lavado y secado en estufa del árido

Una vez preparado el material se pesan los áridos y los fílleres según la granulometría calculada añadiendo el porcentaje de betún que le corresponde (Figura III-20).

Figura III-20. Bandeja pesada y aportación de betún a la mezcla

Se remueve la mezcla formada por áridos, filler y betún hasta alcanzar una temperatura aproximada de 150 ºC. Una vez que la mezcla esté preparada se coloca en un molde cilíndrico de 101,6 mm de diámetro y 63,5 mm de altura y se procede a compactar por el método Marshall (Figura III-21).

Figura III-21. Fotografía de una probeta Marshall fabricada en el laboratorio

III.2.5. Método de Fabricación Marshall

Los primeros objetivos de su diseño fueron dirigidos a determinar energías y densidades de mezclas en laboratorio para aplicarlo posteriormente en obra y así obtener mejores comportamientos.

Las probetas se elaboraron con un peso total de 1.200 g. por mezcla. El ensayo se realizó acorde con la norma UNE-EN 12697-34 (2006). Cada probeta cilíndrica fabricada fue colocada en la máquina de compactación Marshall aplicando 50 ó 75 golpes en cada una de las caras (Figura III-22 y III-23). El número de golpes depende de donde se aplique la mezcla en obra y del ensayo.

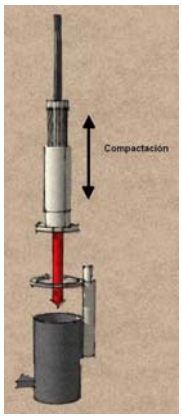


Figura III-22. Compactación por el método Marshall

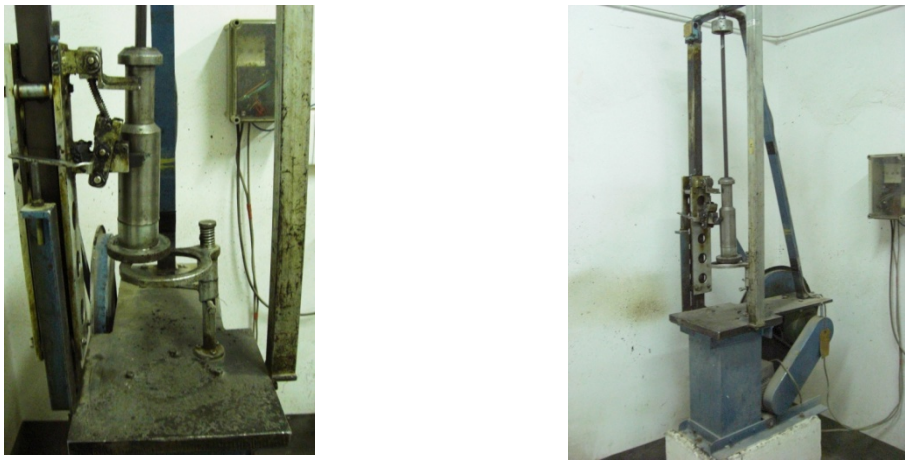


Figura III-23. Vista de frente y perfil de la máquina compactadora Marshall

Una vez enfriadas se desmoldan y se determina su densidad aparente, permitiendo el cálculo de los huecos en áridos y en mezcla.

El porcentaje de huecos sobre mezcla se calcula a partir de las densidades relativas de cada componente que conforman las mezclas acorde a la norma UNE-EN 12697-8 (2003).

En primer lugar se calcula la densidad aparente de la probeta compactada y el porcentaje de betún que contiene, conociendo de la misma forma los pesos específicos de los áridos y del betún. Para ello las probetas se sumergen en un baño de agua durante 30 minutos, con el fin de que las moléculas del agua rellenen cada uno de los huecos saturando al máximo las probetas. Una vez saturadas se extraen del baño y se pesan obteniendo el volumen que ocupan los huecos [III-g]:

$$\%V_{materiales} = \frac{D_{aparente}}{D_{\max ima}} \cdot 100 \qquad \text{[III-g]}$$

$$\%V_{hue\cos} = 100 - \%V_{materiales}$$

Donde:

$D_{aparente:}$ Densidad aparente (g/cm^3)

$D_{máxima}$: Densidad máxima (Cociente entre la masa total de la muestra y el peso de sus componentes) (g/cm^3)

III.2.6. Método UCL

El método UCL® o "Método Universal de Caracterización de Ligantes" está basado en el estudio del desgaste que se produce en una mezcla bituminosa cuando es sometida a variaciones de temperatura, presencia de agua y envejecimiento del betún. El método analiza el comportamiento del betún y del filler con la mezcla a partir del desgaste obtenido mediante el ensayo cántabro, evaluando de forma indirecta otras propiedades como adhesividad, susceptibilidad térmica y envejecimiento (Páez Dueñas, Pérez Jiménez & Miró Recasens 2009).

Este método fue desarrollado por el Departamento de Infraestructura del Transporte de la Universidad Politécnica de Cataluña. Sin embargo, este método se centró en el estudio del comportamiento del ligante sin tener en cuenta propiedades como viscosidad, composición y consistencia, y atendiendo a otras propiedades funcionales como cohesión, adhesividad, susceptibilidad térmica y durabilidad (Sabater 1996).

Para el estudio y análisis de estas propiedades funcionales del ligante, el método se basó en el ensayo cántabro. Este ensayo determina el grado de cohesión de la mezcla bituminosa a partir del efecto de la abrasión y además evalúa el efecto de la temperatura, la acción del agua y el envejecimiento (Miró, 1994).

A diferencia de los estudios realizados anteriormente por otros departamentos, el trabajo realizado en una de las publicaciones de esta tesis se centra en la utilización del método UCL® basado en el ensayo cántabro para el estudio del comportamiento del filler en el mástico bituminoso y no del ligante. Al realizar la mezcla betún/filler se produce un aumento del poder aglomerante y de la viscosidad, pero no siempre de la mejor forma posible. En estudios realizados hasta el día de hoy, solo se tienen en cuenta el tamaño y la plasticidad del filler utilizando relaciones ponderales filler/betún que han sido previamente determinadas sin tener en cuenta otras propiedades como su densidad, naturaleza o porosidad (Pérez-Jiménez, Miró Recasens 1997, Pérez-Jiménez et al. 1999, Bianchetto, Miró-Recasens & Pérez-Jiménez 2006).

III.2.6a. Ensayo cántabro de desgaste de las mezclas bituminosas

La cohesión que se produce entre el filler y el betún es fundamental para su resistencia ante las cargas del tráfico que se producen en los pavimentos. En estudios previos se reconoce que la capa de ligante continua utilizada en la mezcla es la única propiedad importante para la cohesión, sin darse cuenta que tanto la cantidad de filler utilizado como la naturaleza del mismo son propiedades que marcan de manera exhaustiva la cohesión producida en la mezcla bituminosa.

Se ha utilizado el ensayo cántabro mediante el cual se ha medido la resistencia a la disgregación de la mezcla ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tráfico. Este ensayo se ha realizado acorde a la norma vigente NLT-352/00 (2000) y consiste en introducir la probeta de tamaño Marshall en la máquina del ensayo de Los Ángeles (Figura III-24a) y someterla sin ningún tipo de carga abrasiva a un proceso de desgaste. Los áridos más superficiales se van desprendiendo por el efecto abrasivo y de

impacto, determinándose posteriormente la cantidad de material perdido en ese proceso, respecto del peso inicial de la probeta (Figura III-24b).

Figura III-24 a) Máquina de ensayo cántabro de desgaste. b) Dos probetas sometidas y sin someter al ensayo cántabro

Las pérdidas producidas para cada probeta se calculan mediante la expresión [III-h]:

$$P_c = \frac{P_i - P_f}{P_i} \cdot 100 \qquad \text{[III-h]}$$

Donde:

P_c: Pérdidas al cántabro (%)

P_i: Masa inicial (gramos)

P_f: Masa final (gramos)

III.2.6b. Adhesividad en seco y tras inmersión

El objetivo de este ensayo es estudiar la resistencia de la mezcla frente a la acción del agua. Este parámetro depende de la cohesión y la envuelta que produzca el betún sobre

los áridos, ya que el agua por sus propiedades es capaz de separar los compuestos y de disminuir la cohesión de la mezcla.

Para ello se realizó una serie de probetas en la Máquina de los ángeles por cada relación volumétrica, siendo sometidas sometiéndolas a 300 revoluciones y a una temperatura de 25ºC en seco. Posteriormente, al igual que en el ensayo en seco se fabrican el mismo numero de probetas y se sumergen en un baño de agua a una temperatura de 60ºC durante un periodo de 24 horas. Una vez transcurrido el periodo de inmersión se sacan las probetas del agua y se dejan reposar durante otras 24 horas a una temperatura ambiente de 25ºC. Después de ese tiempo, se someten las probetas al ensayo cántabro de desgaste.

Mediante este ensayo se pretende comparar las condiciones climáticas adversas de humedad a las que puede estar sometida la mezcla bituminosa y evaluar mediante el ensayo de desgaste la cohesión del mástico bituminoso.

III.2.6c. Envejecimiento al ensayo cántabro por efecto del tiempo y la temperatura

El envejecimiento mediante el ensayo cántabro permite analizar la resistencia al desgaste de las mezclas y su disgregación, a medida que el betún va perdiendo propiedades por efecto del tiempo y la temperatura, analizando a su vez el comportamiento del filler utilizado (Figura III-25).

En este ensayo las probetas han sido sometidas a una temperatura de 163 ºC durante intervalos de tiempo de 0; 5; 20; 40 y 72 horas y con distintas cantidades de filler antes del ensayo de pérdidas por desgaste.

Figura III-25. Probetas ensayadas al test cántabro con distintas cantidades de filler sometidas a una temperatura de 163ºC durante 72 horas

III.2.6d. Susceptibilidad térmica

En esta investigación se realiza el ensayo cántabro de pérdida por desgaste en función de la susceptibilidad térmica de la mezcla usando temperaturas que vayan desde valores por debajo del punto de fragilidad de betún, hasta valores superiores al punto de reblandecimiento de éste (-16 y 49,9 ºC respectivamente). Se han tomado las siguientes temperaturas de referencia para las relaciones ya usadas: -29; -3; 10; 20; 40 y 60 ºC.

Además, para este ensayo la temperatura de la sala donde se encuentra ubicada la máquina de Los Ángeles es de 25ºC, ya que es necesario que las variaciones de temperatura que se produzcan en las probetas sean similares para cada ensayo.

Mediante este ensayo, se analiza el comportamiento del filler utilizado en cada probeta Marshall ante el efecto de la temperatura, tanto en condiciones gélidas como calurosas, estudiando el desprendimiento que se produce para cada una de ellas.

III.2.7. Determinación de la cantidad de filler ideal para cada mezcla

III.2.7a. Concentración crítica del filler

En el año 1966 el Dr. Celestino Ruiz presentó una publicación en la cual definía un nuevo parámetro denominado concentración crítica del filler, el cual se caracterizaba por ser el *límite donde el sistema deja de ser viscoso,* designándolo con el símbolo "C_s" (Ruiz, 1966).

Posteriormente, los investigadores Craus, Ishai y Sides (1975) corroboraron mediante numerosos análisis los estudios realizados por Ruiz (1966), y llegaron a la conclusión de que cuanto más irregular era la forma de las partículas y mayor era su finura, menor era la concentración crítica (Ishai & Craus, 1977).

El procedimiento experimental en laboratorio es sencillo. Se seca una masa conocida de filler en estufa a una temperatura de 100 ± 5ºC, mezclándolo posteriormente con 20 cm^3 de queroseno secado con cloruro de calcio y todo ello contenido en una probeta graduada. La probeta es sumergida en un baño de agua en ebullición agitándose con un alambre para eliminar las burbujas de aire contenidas en el líquido. Posteriormente se retira del baño y se deja reposar un tiempo aproximado de 24 horas y se lee el volumen de sedimento que queda en el fondo de la probeta, siempre comprendido entre 8 y 12 cm^3.

Se determina entonces la concentración crítica mediante la expresión matemática [III-i] redactada en la norma argentina IRAM 1542/92 (1992):

$$C_S = \frac{P}{V \cdot \rho} \qquad \text{[III-i]}$$

Donde:

C_s: Concentración Crítica

P: Masa del filler (gramos)

V: Volumen de sedimento (cm^3)

ρ: Densidad del filler seco (gramos/cm^3)

La densidad del filler seco se calcula acorde a la norma NLT-155/ 95 (1995).

III.2.7b. Concentración volumétrica del filler

El autor Celestino Ruiz (1966) define concentración volumétrica como "*el volumen de filler por unidad de volumen en el sistema filler-betún designado éste parámetro como Cv"*. Por encima de cierta relación filler-betún la capacidad de deformación del sistema disminuye rápidamente (siendo sometido a carga y temperatura constantes) apareciendo una viscosidad entre las partículas del filler que hace que el sistema se comporte como un sólido rígido gracias a esta estructura interna.

La concentración volumétrica se ha calculado a partir de la siguiente expresión [III-j]:

$$C_V = \frac{V_f}{V_f + V_b} = \frac{\frac{P_f}{\gamma_f}}{P_f + \frac{P_b}{\gamma_b}} \qquad \text{[III-j]}$$

Donde:

Cv: Concentración volumétrica

Vf: Volumen del filler en la mezcla

Vb: Volumen del betún

Pf: Porcentaje en masa del filler en la mezcla

Pb: Porcentaje en masa del betún

γf: Peso específico del filler utilizado

γb: Peso específico del betún

III.2.8. Sensibilidad al agua

El ensayo de sensibilidad al agua se ha realizado acorde a la normativa UNE- EN 12697-12 (2009). Mediante este ensayo se determina la relación entre la resistencia a tracción indirecta de probetas de la "misma edad" sometidas a una inmersión en agua destilada (20±5ºC) y probetas mantenidas al aire con una temperatura ambiente comprendida entre 20±5ºC. Posteriormente, se aplica el vacío en las probetas húmedas durante 30 ± 5 minutos y una vez transcurrido ese tiempo se deja entrar lentamente la presión atmosférica en el vacío.

Una vez transcurridos otros 30 ± 5 minutos de reposo de las probetas en agua, se calcula el volumen de éstas acorde a la norma UNE- EN 12697-6 rechazando cualquier probeta que haya incrementado su volumen en más de un 2 %.

Se colocan las probetas en un baño a una temperatura de 40±1ºC durante un periodo comprendido entre 68 y 72 horas. Posteriormente se llevan las probetas a la cámara de ensayo y se someten a tracción indirecta (Figura III-26) acorde con la norma UNE-EN 12697-23 (2004) calculando su índice de resistencia mediante la expresión [III-k]:

$$ITSR = 100 \cdot \frac{ITS_w}{ITS_d} \qquad \text{[III-k]}$$

Donde:

ITSR: Relación de la resistencia a tracción indirecta, en porcentaje (%).

ITS_w: Resistencia media a la tracción indirecta del grupo húmedo, (kPa).

ITS_d: Resistencia media a la tracción indirecta del grupo seco, (kPa).

Figura III-26. Máquina de ensayo de sensibilidad al agua y probetas sometidas a tracción indirecta

III.2.9. Ensayo de inmersión-compresión

Según la norma NLT-166-00 (2000) el ensayo de inmersión-compresión determina la pérdida de cohesión producida por la acción del agua sobre las mezclas bituminosas compactadas utilizadas en construcción de carreteras.

Mediante este ensayo se realiza una comparativa entre una serie de probetas al aire sometidas a compresión simple (NLT-161/98) y una serie de probetas sometidas a la acción del agua (Figura III-27).

Figura III-27. Máquina de ensayo inmersión-compresión

A partir de este ensayo se determina un índice numérico denominado como índice de resistencia conservada [III-l], que indica la susceptibilidad al agua de las mezclas bituminosas.

$$IRC = \frac{R_2}{R_1} \cdot 100 \qquad \text{[III-l]}$$

Donde:

IRC: Índice de resistencia conservada, en porcentaje (%).

R_1: Resistencia a compresión de las probetas no sumergidas

R_2: Resistencia a compresión de las probetas sumergidas

CAPÍTULO IV. - ARTÍCULOS PUBLICADOS

IV.1. LIME STABILIZATION OF BENTONITE SLUDGE FROM TUNNEL BORING

Daniel Castro-Fresno, Diana Movilla-Quesada, Ángel Vega-Zamanillo, Miguel A. Calzada-Pérez.

Applied Clay Science Journal, 51 (3), 250-257.

Aceptado: 23 Noviembre 2010

DOI: 10.1016/j.clay.2010.11.028

IV.2. EXPERIMENTAL STUDY OF BITUMINOUS MASTIC BEHAVIOUR USING DIFFERENT FILLERS BASED ON THE UCL METHOD

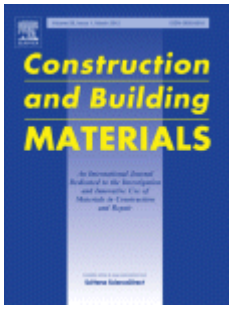
Diana Movilla-Quesada, Ángel Vega-Zamanillo, Miguel Ángel

Calzada-Pérez, Daniel Castro-Fresno.

Journal of Civil Engineering and Management, Vol.

Aceptado: 3 Mayo 2011

IV. 3. EVALUATION OF WATER EFFECT ON BITUMINOUS MASTICS WITH DIFFERENT CONTRIBUTION FILLERS AND BINDERS



Diana Movilla-Quesada, Ángel Vega-Zamanillo, Miguel Ángel

Calzada-Pérez, Daniel Castro-Fresno.

Construction and Building Materials, 29 (2012) 339-347

Aceptado:12 Agosto 2011

DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.093

IV.1. LIME STABILIZATION OF BENTONITE SLUDGE FROM TUNNEL BORING

Daniel Castro-Fresno, Diana Movilla-Quesada, Ángel Vega-Zamanillo, Miguel A. Calzada-Pérez.

Applied Clay Science Journal, 51 (3), 250-257, **2010**.

D.O.I: 10.1016/j.clay.2010.11.028

Journal of Applied Clay Science

An International Journal on the Application and Technology of Clays and Clay Minerals

Rank in Category: APPLIED CLAY SCIENCE 2011 JCR Science Edition

Journal Ranking

For 2011, the journal APPLIED CLAY SCIENCE has an Impact Factor of 2.474.

This table shows the ranking of this journal in its subject categories based on Impact Factor.

MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY	231	46	Q1
MINERALOGY	26	4	Q1

Rank	Abbreviated Journal Title (linked to journal information)	ISSN	JCR Data						Eigenfactor® Metrics	
			Total Cites	Impact Factor	5-Year Impact Factor	Immediacy Index	Articles	Cited Half-life	Eigenfactor® Score	Article Influence® Score
1	APPL CLAY SCI	0169-1317	5168	2.474	3.060	0.304	276	5.0	0.01151	0.675

Applied Clay Science 51 (2011) 250–257

Contents lists available at ScienceDirect

Applied Clay Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/clay

Lime Stabilization of bentonite sludge from tunnel boring

Daniel Castro-Fresno, Diana Movilla-Quesada *, Ángel Vega-Zamanillo, Miguel A. Calzada-Pérez

School of Engineering, University of Cantabria, Santander, 39005, Spain

ARTICLE INFO

Article history:
Received 2 August 2010
Received in revised form 19 November 2010
Accepted 23 November 2010
Available online 30 November 2010

Keywords:
Sludge
Lime
Stabilization
Sub-grade
Embankments

ABSTRACT

Stabilization of soils with conglomerate materials applied to the improvement of road embankments and sub-grades, is one of the best alternatives from a functional, environmental and economic point of view. One of the main advantages of using lime as a binder is the improvement of soil's mechanical properties.
This work shows the results obtained from lime treatment of four bentonite sludge samples obtained from the tunnel boring machine. The study is based on mineralogical, chemical, geotechnical and mechanical characterization tests of the bentonite sludge mixture with the optimal proportion of 3% lime, achieving improvements of 80% compared with the initial sludge mechanical properties.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The most important design and implementation parameters when building embankments and sub-grades depend on structural, economic and environmental aspects. The solutions tend to use new technologies and methods that are more efficient and environmentally friendly (Hossain et al., 2007).

Soil stabilization consists in adding a binder to the soil (lime, cement or another) to improve mechanical and chemical properties of the material by joining the particles, which are then applied to road works, as described by Ancade (2007). This lime treatment is carried out in soils considered inadequate for construction and the reuse of these materials will produce environmental and economic benefits by reducing the impact of the works on the environment and reducing costs (Kuzyakov and Stahr, 2005; Usman et al., 2005).

Depending on the properties of the original soil and those subsequently obtained using cement additives, the soils may be classified according to the European standards described by the Highways Agency (2007) as marginal, tolerable, adequate and/or selected; the latter having the best characteristics in terms of applicability.

The stabilization of different soils has been studied by many researchers such as Al-Amoudi et al. (2010) and Liu et al. (2009).

In countries, such as Nigeria, where work finance is often a problem, comparative studies were carried out of stabilization by lime and other binders due to the low cost. For the same content of binder, lime took less time to react with the material and also changed the chemical properties of soil in a more comprehensive way. This method was introduced by Osula (1996).

A further study was performed with cement and lime contents of 2%. The best results were obtained with lime, since it improved and increased the bearing capacity of the material (Konyeha and Ogbeide, 2006; Liu et al., 2009).

In 2007, the University of Oklahoma carried out a study on the reaction of lime and other binders with expansive soils (Buhler and Cerato, 2007). Using lime contents of 2 and 3%, the swelling decreased and so too did the soil expansiveness.

2. Materials and methods

The materials came from the construction work at Malaga Airport, which is located near the Guadalhorce River. The land is a highly heterogeneous clastic sequences of gravel, sand, silt and clay, where there are organic sludge and gray clay deposits, which are associated with the old estuary and the abandonment of active channels.

The materials from the tunnel were categorised according to their formation eras into three main groups, corresponding to quaternary silts, fine sands, quaternary greenish grey clay silts and slimy gravels.

The characterization tests and lime soil treatment were performed in the Roads and Airports Laboratory located in the University of Cantabria.

2.1. Lime characterization

DI.90-Q dolomite quicklime was used with 5% magnesium that was hydrated in the laboratory. This kind of material corresponds to standard EN 459 (2002).

* Corresponding author. Tel.: +34 942 203943; fax: +34 942 201703.
E-mail address: diana.movilla@unican.es (D. Movilla-Quesada).

0169-1317/$ – see front matter © 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.
doi:10.1016/j.clay.2010.11.028

Consistent with the standard EN 80502 (2003), this type of lime when mixed with soil, releases Ca^{++} ions which coagulate clay particles and increase the pH, until reaching values that trigger pozzolanic reactions, which cause increased resistance over time (Boardman et al., 2001; Shanmuganathan and Oades, 1983).

One of the most pronounced effects of the soil–lime mixture is the increased soil resistance, due to the attraction between soil particles as a consequence of the pozzolanic links (Godsey et al., 2007).

2.2. Sludge characterization

Firstly, the characterization of the three samples was done without the addition of lime. The tests performed were as follows: moisture content after 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 4, 6, 8 and 24 h; plasticity index; normal Proctor; CBR after 4 days; swelling; pH; granulometric analysis; organic matter content; salt content; collapse settling and EDX. To obtain more accurate data, three repetitions per test were performed.

2.3. Geotechnical tests

Silt and clay samples were analyzed by the densimeter method according to standard ASTM D 422-63, since their particle size was too small. Samples 3 and 4, having larger particles, were screened according to the standard ASTM D 6913-04.

However, it should be noted that not only the grain size influences the behaviour of soil, but also compactness, size distribution and mineralogical composition (Inci et al., 2003).

2.4. Mineralogical tests

The natural soil particles are composed of minerals formed from chemical erosion and their composition is different depending on the rocks from which they originate (Ninov and Donchev, 2008).

The study carried out by Meneses et al. (2007) showed that 10% of silica content effectively works in soil cementing, because the small particles of silica coat the clay grains, forming aggregates that provide a high resistance comparing to other mineral formations.

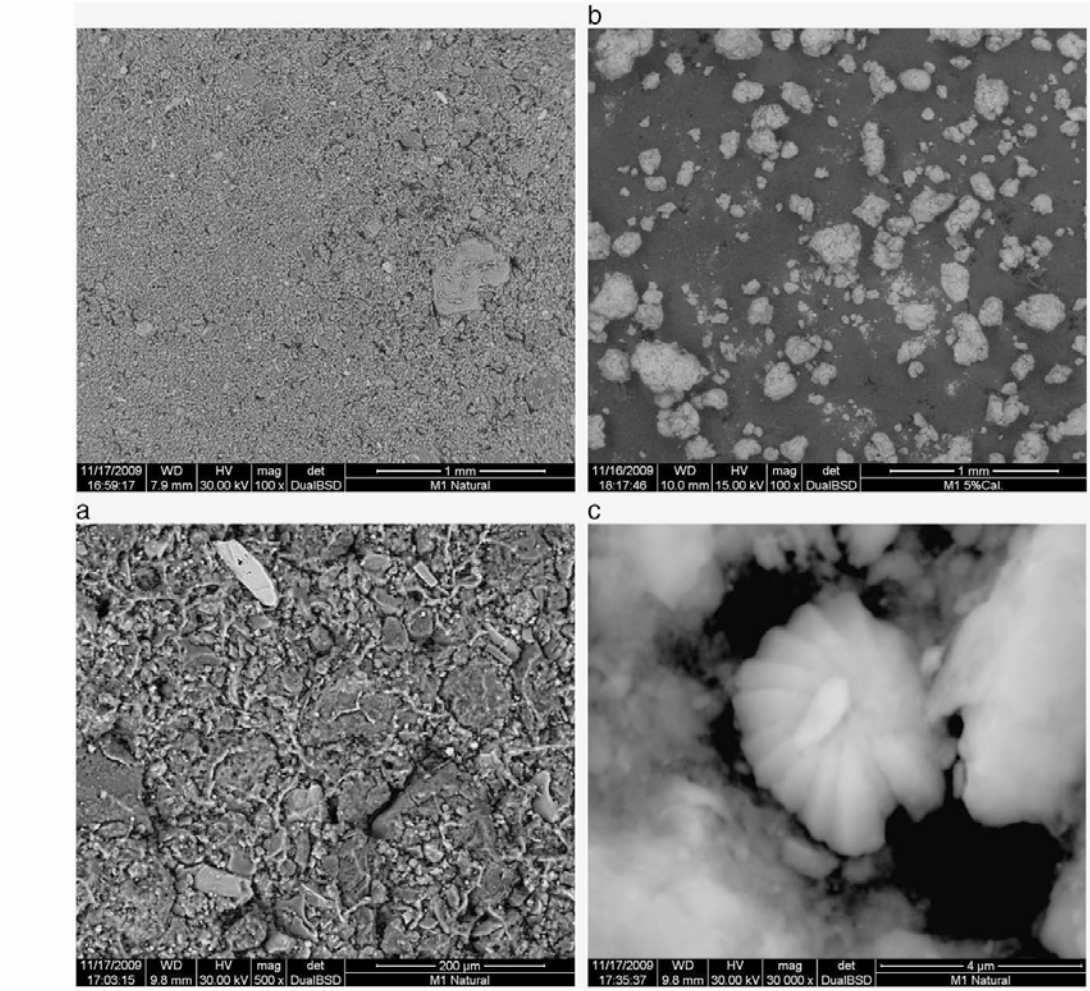


Fig. 1. Clayey silt ×100, without lime. a: Clayey silt ×100, 5% lime. b: Clayey silt ×500, 5% lime. c: Clayey silt ×30,000, 5% lime.

The EDX (Energy Dispersive X-ray spectroscopy) tests were performed with SEM equipment (Scanning Electron Microscope) which determines the morphological and structural characteristics of each material which helps in measuring the size of the soil grains (Nyakairu et al., 2002).

The tests in the two samples were carried out without lime and with 5% of lime. Figs. 1, a, b, c, 2, a, b and c show the results using microscopic magnitudes of 100×, 500× and 30,000×.

2.5. Mechanical tests

Kraemer and Mestre (2006) corroborated that the characteristics of the materials are produced after a specific period of stabilization. Little-Dallas (1998) showed in their manual "Lime Stabilization" that the effects produced by lime do not occur instantaneously but are produced after a given time.

Normal Proctor tests were carried out according to EN 103-500 (1994), using cylindrical moulds with a material capacity of 2.5 kg. Each sample was compacted in three layers using 25 strikes, dropping a mass from a height of 30.5 cm (Al-Rawas et al., 2006).

The CBR tests were carried out according to ASTM D 1883 (2007) using three compaction moulds of 15, 30 and 60 strokes and the swelling and collapse settling tests according to EN 103-601 (1996) and EN 103-406 (2006) were taken into account when treating the soils with lime for application in embankments.

3. Results and discussion

3.1. Natural state tests

3.1.1. Granulometric analysis

Table 1 shows the different particle sizes of each sample. Samples 1 and 2 were tested by the densimeter method as it ought to be studied sizes below 0.08 mm. However, for samples 3 and 4 being granular materials were realized by sieving as precise no smaller sizes of 0.08 mm.

3.1.2. Plasticity index, chemical and geotechnical tests

Table 2 shows the results of characterization tests for each sample in its natural state. Sample 1, being clayey silt, had higher water

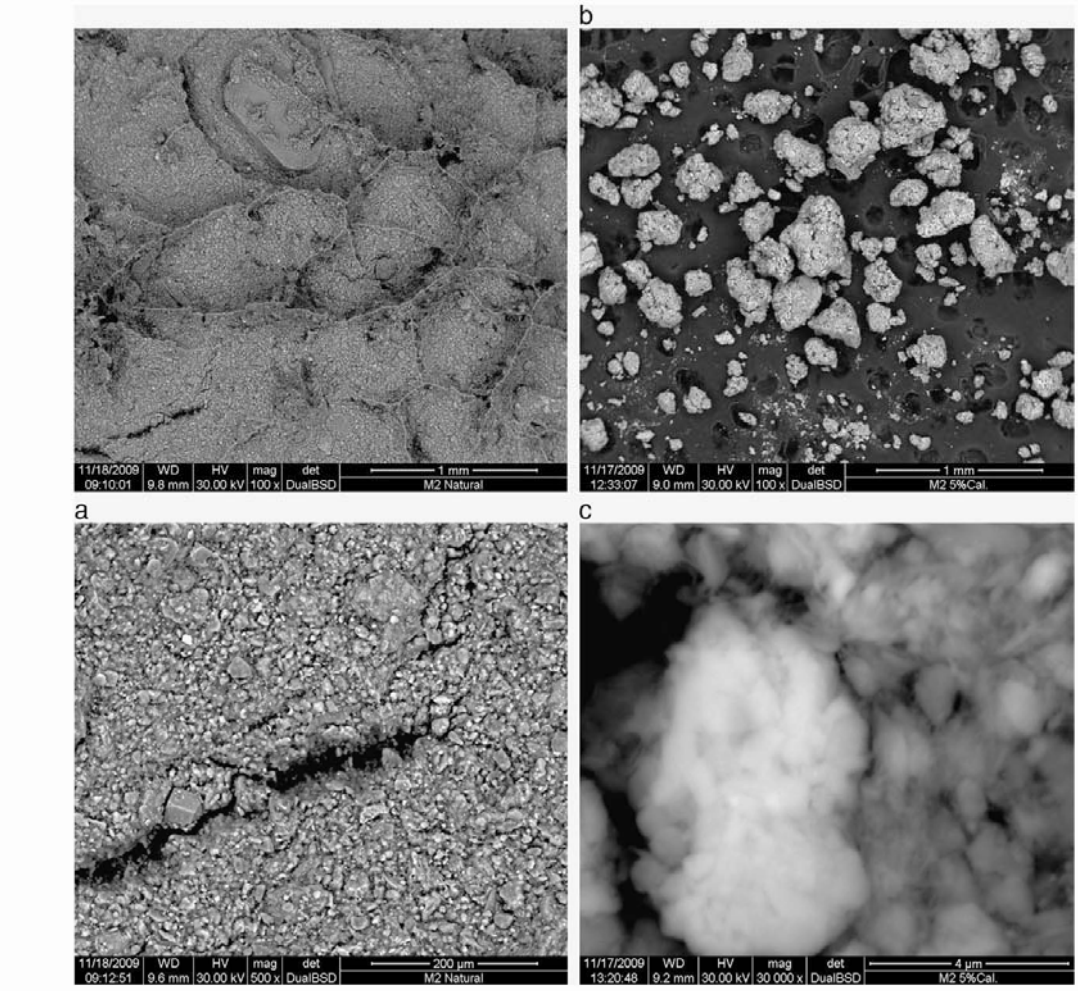


Fig. 2. Brown–green clay ×100, without lime. a: Brown–green clay ×500, without lime. b: Brown–green clay ×100, 5% lime. c: Brown–green clay ×30,000, 5% lime.

Table 1
Granulometric analysis of each sample.

Size (mm)	S_1	S_2	S_3	S_4
100	100.0	100.0	100.0	100.0
40	100.0	100.0	99.3	100.0
25	100.0	100.0	97.5	99.4
20	100.0	100.0	95.7	97.3
12.5	100.0	100.0	92.8	90.6
10	100.0	100.0	90.1	87.9
6.3	100.0	100.0	83.4	81.6
5	100.0	100.0	79.3	78.3
2	99.6	100.0	64.8	66.0
1.25	93.2	99.7	58.0	58.1
0.4	93.2	98.7	31.3	31.4
0.16	93.2	92.3	16.1	15.0
0.08	89.4	83.8	8.8	7.8
0.032	85.4	77.1	–	–
0.021	72.8	62.3	–	–
0.013	56.9	50.4	–	–
0.010	41.1	38.5	–	–
0.008	6.3	8.9	–	–
0.004	3.2	3.0	–	–

Table 2
Properties of natural soil of each sample.

	Standard	S_1	S_2	S_3	S_4
Nature tests					
Moisture content (%)	ASTM D2216-05	37.1	23.5	18.8	15.7
Liquid limit (%)		47.4	34.7	25.6	22.8
Plastic limit (%)	ASTM D4318-10	23.3	24.7	18.2	19.9
Plasticity index (%)		24.1	10.0	7.3	2.9
Chemical tests					
Organic matter content (%)	EN 103-204	0.5	0.6	0.5	0.3
pH	EN 77-305	8.0	9.3	9.6	10.3
Soluble salts (%)	EN 103-201	0.5	0.6	0.2	0.2
Conductivity (ms/cm)	EN 77308	4.2	3.3	1.3	1.3
Gypsum content (%)	EN 103-206	0.3	0.0	0.1	0.4
Sulphates content (%)	EN 103-201	0.3	0.6	0.1	0.0
Geotechnical tests					
Swelling	EN 103-601	3.8	1.9	1.9	0.2
Collapse settling	EN 103-406	−0.7	−0.1	−0.1	0.1

content and therefore a higher plasticity index, as its liquid limit is slightly higher than the other samples'.

The organic matter content was below the standard's limit, so that was not a problem. It was remarkable that the sulphate content for sample 4 was zero.

It was noted that the swelling for sample 1 was higher so the material was classified as marginal soil.

3.1.3. Energy Dispersive X-Ray spectroscopy

Table 3 shows the mass content of the compounds of each soil obtained through a mineralogical analysis of each sample. Chemical tests established that the material with the highest content of silicon oxide is the clay sample. The sample 2 contains 46% silica, which

Table 3
Chemical analysis of each sample.

Mass (%)	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	TiO_2	SO_3	P_2O_5	CO_2
S_1	41.0	15.0	16.0	5.9	2.0	3.4	0.8	0.2	0.1	15.3
S_2	46.0	12.0	16.0	5.7	2.2	3.1	0.8	0.2	0.2	13.0
S_3	40.9	14.9	10.5	4.0	1.4	7.5	0.4	0.2	0.1	19.9
S_4	38.6	17.5	9.3	3.3	1.2	7.5	0.4	0.1	0.1	21.9

Table 4
XRD test results of each sample.

	S_1	S_2	S_3	S_4
Calcite (%)	18.5	20.8	21.2	10.7
Quartz (%)	22.5	30.3	32.8	38.7
Dolomite (%)	23.8	4.3	4.1	50.6
Felspar (%)	3.2	4.9	5.1	–
Phylo-silicate (%)	32.0	39.7	–	–

caused the hardness of the material that appeared as the water content reduced at ambient temperature.

Each sample's mineral composition was studied by X-ray diffraction (Table 4). Once the diffraction results were obtained, it appeared that sample 3 did not contain phyllosilicates and sample 4 had neither feldspar nor phyllosilicates. All the samples had different contents of calcite, quartz and dolomite.

Microscopic tests were carried out from EDX analysis for samples 1 and 2 as they had the greatest water contents. Silica and aluminium were identified in these two samples. It was noted that when the two elements were treated with hydrated lime, structural changes appeared, producing certain pozzolanic reactions that lead to particle cementation and, therefore, to the appearance of elements such as alumina and hydrated silica.

3.1.4. Natural state classification

Table 5 shows the classification of each material according to the Spanish Highways Agency (2007) and explains whether the soil is suitable for application in embankments without additives.

The four samples were treated with lime, to fulfil the standard parameters for samples 1 and 2, and to improve the behaviour in samples 3 and 4.

3.2. Lime treatment tests

3.2.1. Moisture content

Soil changes produced after treatment with lime, depended on the previous state of the soil and the lime content used (Fig. 3, a, b, and c).

The natural moisture content of each soil was similar to the optimum compaction moisture content, so lime contents of 1%, 2.5%, 3%, 3.5% and 5% were used.

When the maximum optimum moisture content was reached in the soil–lime mixture, the extra contribution of lime acted as dry matter. It was found that the point at which the soil reaches its maximum water content is with an addition of 3% lime.

3.2.2. Plasticity index analysis

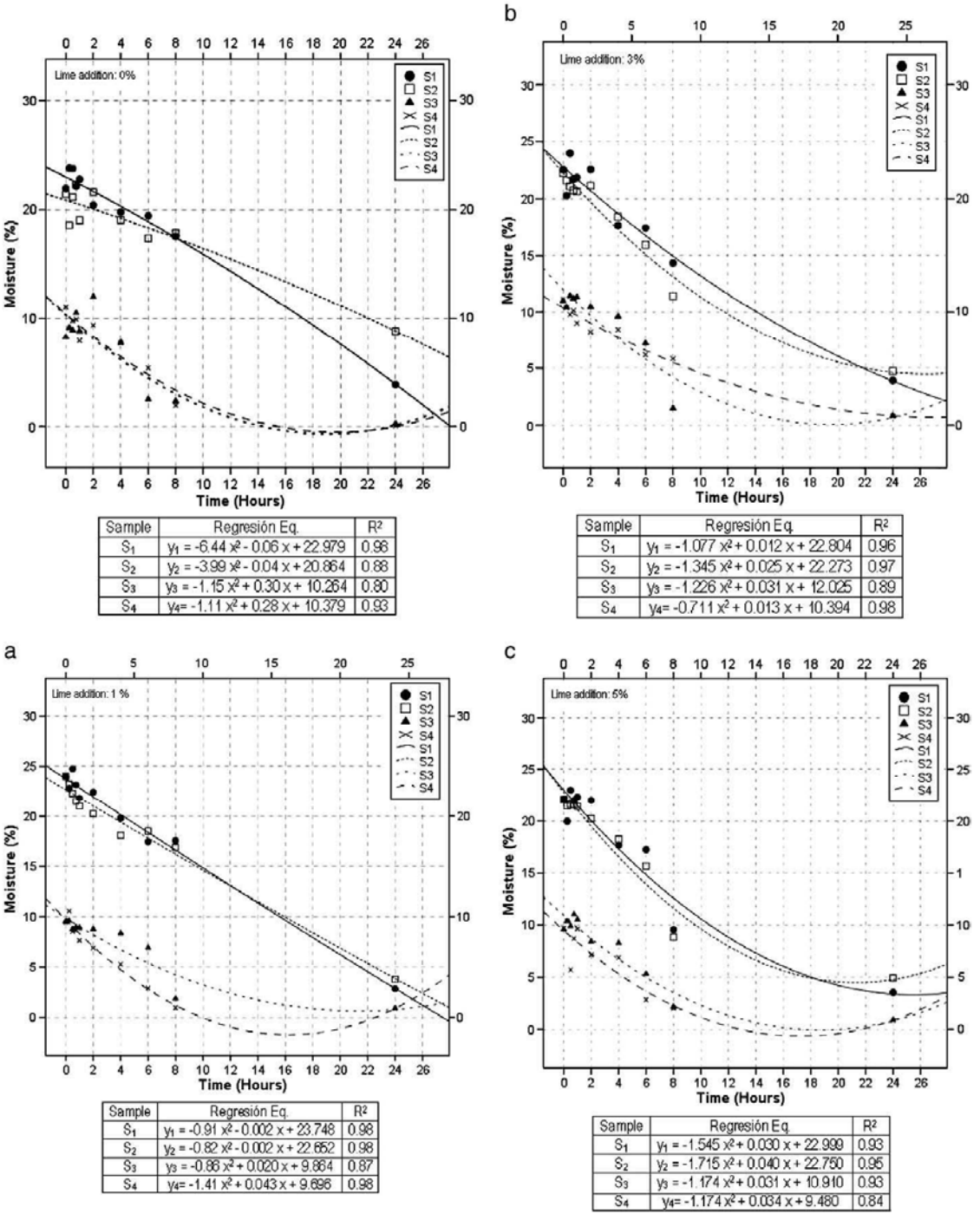
Table 6 shows that for less than 3% content of lime, the liquid and plastic limit of the mixture increased compared to the natural soil state, and therefore the mixes tolerated higher water contents. However, above 3% lime the limits were decreased; these values were better than those obtained for soil without lime, but were lower than 3% of lime. It was concluded that the optimum value was 3% lime.

Fig. 4 shows the plasticity chart for the study of samples in the natural state and with the addition of different contents of lime.

Table 5
Natural soil classification.

Sample	Material	Classification	Application
S_1	Clayey silts	Marginal soil	Not applicable
S_2	Greeny grey clays	Marginal soil	Not applicable
S_3	Slimy sands	Adequate soil	Applicable
S_4	Clayey sands	Adequate soil	Applicable

Sample 1 was included in the clayey silt group, but by adding 3% lime, the plasticity index increased by 35%. However, sample 2 contained a higher content of water which was classified in the slimy clay group. Samples 3 and 4 were granular materials which were considered to be clayey sands. By applying the optimum lime content to the latter three samples, their plasticity was increased.



Sample	Regresión Eq.	R²
S_1	$y_1 = -6.44\,x^2 - 0.06\,x + 22.979$	0.98
S_2	$y_2 = -3.99\,x^2 - 0.04\,x + 20.864$	0.88
S_3	$y_3 = -1.15\,x^2 + 0.30\,x + 10.264$	0.80
S_4	$y_4 = -1.11\,x^2 + 0.28\,x + 10.379$	0.93

Sample	Regresión Eq.	R²
S_1	$y_1 = -1.077\,x^2 + 0.012\,x + 22.804$	0.96
S_2	$y_2 = -1.345\,x^2 + 0.025\,x + 22.273$	0.97
S_3	$y_3 = -1.226\,x^2 + 0.031\,x + 12.025$	0.89
S_4	$y_4 = -0.711\,x^2 + 0.013\,x + 10.394$	0.98

Sample	Regresión Eq.	R²
S_1	$y_1 = -0.91\,x^2 - 0.002\,x + 23.748$	0.98
S_2	$y_2 = -0.82\,x^2 - 0.002\,x + 22.652$	0.98
S_3	$y_3 = -0.86\,x^2 + 0.020\,x + 9.864$	0.87
S_4	$y_4 = -1.41\,x^2 + 0.043\,x + 9.696$	0.98

Sample	Regresión Eq.	R²
S_1	$y_1 = -1.545\,x^2 + 0.030\,x + 22.999$	0.93
S_2	$y_2 = -1.715\,x^2 + 0.040\,x + 22.750$	0.95
S_3	$y_3 = -1.174\,x^2 + 0.031\,x + 10.910$	0.93
S_4	$y_4 = -1.174\,x^2 + 0.034\,x + 9.480$	0.84

Fig. 3. Moisture content variations for each sample. a: with 1% lime addition. b: with 3% lime addition. c: with 5% lime addition.

Table 6
Soil plasticity test results of each sample.

	0%	2.5%	3%	3.5%	5%
Liquid limit (%)					
S_1	38.4	40.4	46.4	45.1	42.3
S_2	34.7	38.5	42.5	40.9	38.7
S_3	25.6	27.6	30.7	29.6	28.7
S_4	22.8	25.6	28.3	27.1	26.7
Plastic limit (%)					
S_1	23.3	27.6	35.4	33.3	30.6
S_2	24.7	29.3	32.4	30.1	29.9
S_3	18.2	22.1	25.0	22.6	21.5
S_4	19.9	21.9	24.3	23.2	20.0
Plasticity index (%)					
S_1	15.1	12.8	11.0	11.8	11.7
S_2	10.0	9.2	10.1	10.8	8.8
S_3	7.4	5.5	5.7	7.0	7.2
S_4	2.9	3.7	4.0	3.9	6.7

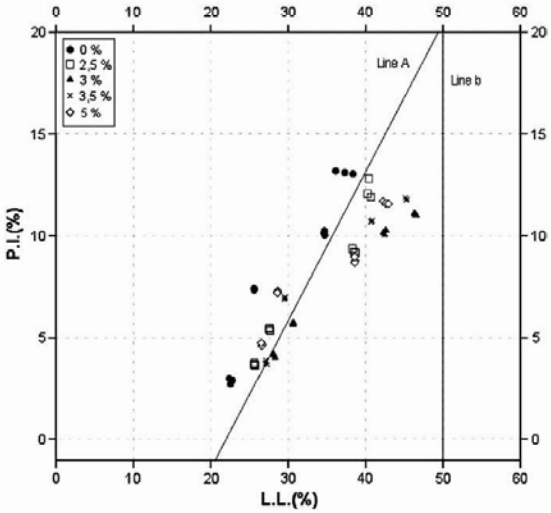


Fig. 4. Plasticity chart applied to different lime percentage tests.

3.2.3. Normal Proctor

Table 7 shows the different behaviour depending on the nature of the soil. The three samples showed different results depending on the content of lime added.

Samples 1 and 2 decreased their maximum dry density when the content of lime was increased. The optimum moisture content decreased on reaching the optimum addition point (3% lime), at which point both began to behave inversely. Before reaching the optimum lime content chemical reactions took place between unsaturated molar soil water and the lime.

In contrast, on adding more lime than the optimum content, the soil's dry density increased, because the soil was completely saturated by the action of the lime, and the particles formed part of the soil without mixing with it, so the mix acquired a higher density.

Samples 3 and 4 showed that the nature of the soil had an important role in addition to soil water content. By varying the amount of lime used in the mix, the density and the optimum moisture content were changed.

3.2.4. CBR

Table 8 shows the results for 95% of maximum dry density and 100% density for each sample with different contents in lime.

The CBR test showed that for the four samples containing above or below 3% lime didn't work satisfactorily in the soil. In sample 2, it was noted that for values above the optimum content of lime there was a decrease in the load-bearing capacity, although there was a recovery of the properties that occurred when adding 5% lime.

The results demonstrate that the coagulating power of lime with respect to fine particles and the density variation of the different soils depends on the content of fine material.

In contrast, samples 3 and 4 demonstrated a coagulating power less than slaked lime, which decreased the mix density.

3.2.5. Swelling and collapse settling

Table 9 shows the satisfactory difference in swelling of soils without lime in comparison with soils with optimum lime content. As the properties improve, the soil can be classified in a higher category.

Sample 1 showed a 3.81% swelling without addition of lime. According to the standard EN 103-601 (1996) this soil could not be used in any area of the embankment. However, when the sample was treated with 3% lime, the swelling decreased to a value of 0.78% which meant an improvement in volumetric properties and its classification as tolerable soil.

Sample 2 was classified as tolerable soil when it was not treated with lime (due to the low value of CBR, it was not possible to classify the sample as tolerable but only as marginal soil). However, by adding 3% lime the soil became tolerable as the lime improved its resistance properties and increased its swelling by approximately 88%, reaching a value of 0.2.

Samples 3 and 4 showed different behaviour because they have a sandy nature. Both samples showed reduced swelling becoming selected soil and permitting their use in other areas of embankments.

3.2.6. Classification of soil treated with lime

Table 10 shows the variations produced in the samples and its classification.

4. Conclusions

In this study bentonite sludges such as silts, green and gray clays and sands were used, which under certain conditions may be used in soils and road embankments.

For this study, slaked lime was used, later being hydrated at 1:3 ratio. This material is a chemical compound obtained by calcination of limestone at about 1000 °C in kilns adapted for this purpose.

Table 7
Normal Proctor results of each sample.

	0%		2.5%		3%		3.5%		5%	
	$\omega_{optimal}$ (%)	$\gamma_{Max.}$ (g/cm³)	$\omega_{optimal}$ (%)	$\gamma_{Max.}$ (g/cm³)	$\omega_{optimal}$ (%)	$\gamma_{Max.}$ (g/cm³)	$\omega_{optimal}$ (%)	$\gamma_{Max.}$ (g/cm³)	$\omega_{optimal}$ (%)	$\gamma_{Max.}$ (g/cm³)
S_1	19.8	1.67	20.8	1.51	18.9	1.61	18.2	1.63	19.6	1.62
S_2	19.1	1.70	24.6	1.58	20.1	1.62	18.8	1.68	20.2	1.64
S_3	9.2	2.07	10.8	1.98	10.7	2.00	10.3	1.98	9.7	1.95
S_4	9.4	2.06	9.4	1.91	10.7	1.94	10.0	1.88	9.8	1.88

Table 8
CBR index test results of each sample.

100% N.P.										
	0%		2.5%		3%		3.5%		5%	
	CBR	γ_{dry} (g/cm^3)	CBR	γ_{dry} (g/cm^3)	CBR	γ_{dry} (g/cm^3)	CBR	γ_{dry} (g/cm^3)	CBR	γ_{dry} (g/cm^3)
S_1	5	1.67	6	1.51	25	1.61	20	1.63	22	1.62
S_2	2	1.70	5	1.58	30	1.62	20	1.68	23	1.64
S_3	5	2.07	5	1.98	58	2.00	11	1.98	31	1.95
S_4	15	2.06	43	1.91	71	1.94	31	1.88	43	1.88

Lime added to bentonite sludges improves their properties to the point of changing their classification according to PG-3 (the Spanish Standard). The clayey and slimy samples, which were initially characterized as marginal, after lime treatment, became considered as adequate, improving their swelling and resistance. In addition, sandy samples 3 and 4, which were classified as adequate soils, after treatment became classified as select soils, it even being possible to use them in other higher areas of the embankment.

Lime addition in an optimum percentage (in this case 3%) produces changes in the plasticity of the three types of materials. The most significant change is produced in the liquid limit of sample 2 compared to its natural state, increasing to 40%.

Nevertheless, for sands the liquid limit increases in a 16–19% range. This LL increase implies an evolution of moisture content, which is determined by the water content of the slaked lime.

The study carried out on the samples without lime found lower CBR index values for samples 1 and 2, classified as marginal soils, and higher values for sand samples, even enabling the classification of soil sample 3 as adequate (CBR>5). Once the soils were treated with the optimal percentage of lime an increase was observed in the CBR rates that enabled each soil to achieve a higher classification in the PG-3. As a result, samples 1 and 2 were classified as suitable soils, and samples 3 and 4 as select soils, it being possible to use each material somewhere in embankments.

The values obtained in free swelling and collapse tests demonstrate the volumetric stability of each sample. Thus, sample 1 (silt) had a swelling of 3.81%, indicating the inability to use this material in any type of work and the hazard entailed by a movement in the formation of structured layers. However, on treating the material with 3% lime, the parameter volume decreased by 88%, obtaining a soil with appropriate properties. Regarding the swelling data obtained for the other samples, values were not significant, but when treated decreased by about 30% in natural soil.

Table 9
Swelling and collapse settling of each sample.

	Swelling (%)		Collapse settling (%)	
	0%	3%	0%	3%
S_1	3.8	0.8	−0.7	−0.2
S_2	1.8	0.2	−0.1	−0.0
S_3	1.9	0.2	−0.1	0.0
S_4	0.2	0.1	−0.1	0.0

Table 10
Classification of each treated sample.

Sample	Material	S_n + 0% lime	S_n + 3% lime
S_1	Clayey silt	Marginal soil	Adequate soil
S_2	Greeny grey clay	Marginal soil	Adequate soil
S_3	Slimy sand	Adequate soil	Selected soil
S_4	Clayey sand	Adequate soil	Selected soil

Therefore, treatment with lime in optimal amounts provides an improvement of 80%, which in addition to improving stability also improves volumetric properties such as chemical or mechanical behaviour, which later helps in their subsequent use in work.

Acknowledgments

This work was financed by the Spanish Ministry for the Environment. Research project BATUCA 070/PC08/3-03.2. The authors would like to express their gratitude to Acciona Infraestructuras Ltd., Calcinor Ltd. and the Construction Technology Research Group (GITECO) at the University of Cantabria.

References

Al-Amoudi, O.S.B., Khan, K., Al-Kahtani, N.S., 2010. Stabilization of a Saudi calcareous marl soil. Construction and Building Materials, Arabia Saudi.
Al-Rawas, A., Taha, A., Al-Aghbari, R., Mohamedzein, M., 2006. Evaluation of the bearing capacity of compacted desert sands. Soil and Rock Behaviour and Modelling 150, 98–104.
ANCADE, 2007. Manual de estabilización de suelos con cal. Madrid.
ASTM D 422-63, 2007. American society for testing and materials. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
ASTM D 6913-04, 2009. American society for testing and materials. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis.
ASTM D1883-07E2, 2007. American society for testing and materials. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils, Philadelphia. New York.
ASTM D2216-05, 2005. American society for testing and materials. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.
Boardman, D.I., Glendinning, S., Rogers, C.D.F., 2001. Development of stabilisation and solidification in lime–clay mixes. Geotechnique 51 (6), 533–543.
Buhler, R.L., Cerato, A.B., 2007. Stabilization of Oklahoma expansive soils using lime and Class C fly ash. 1 pp.
EN 103-201, 1996. Spanish Association for Standardization and Certification quantitative analysis of soluble sulphate content of a soil.
EN 103-206, 2006. Spanish Association for Standardization and Certification. Determination of Gypsum Content in Soils.
EN 103-406, 2006. Spanish Association for Standardization and Certification. Collapse Test in Soils.
EN 103-500, 1994. Spanish Association for Standardization and Certification compactation test. Proctor Standard.
EN 103-601, 1996. Spanish Association for Standardization and Certification. Test for Free Swelling of Soils in Oedometer Device.
EN 459, 2002. Spanish Association for Standardization and Certification. Building Lime.
EN 77308, 2006. Spanish Association for Standardization and Certification. Soil Quality. Determination of the Specific Electrical Conductivity.
EN 80502, 2003. Spanish Association for Standardization and Certification. Quicklime and Hydrated Limes for the Improvement and/or Stabilization of Soils.
Godsey, C.B., Pierzynsky, G.M., Page, P.W., Mengel, D.B., Lamond, R.E., 2007. Evaluation of common lime requirement methods. Soil Science Society of American Journal 71 (3), 843–849.
Highways Agency, 2007. General technical requirements specification for road and bridge works (PG-3). Article 542: hot mix asphalt concrete or bituminous. Ministry of Development. Spain. 2008.
Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Easa, S., 2007. Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua New Guinea. Resources, Conservation and Recycling 51 (4), 711–731.
Inci, G., Yesiller, N., Kagawa, T., 2003. Experimental investigation of dynamic response of compacted clayey soils. Geotechnical Testing Journal 26 (2), 125–141.
Koryeha, V.U., Ogbeide, F.N., 2006. Lime–cement stabilised chicoco as a road pavement material. International Conference on Engineering Research and Development: Impact on Industry.
Kraemer, C., Mestre, V., 2006. Evaluación y Optimización de las Explanadas. VII Congreso Nacional de Firmes.

Kuzyakov, Y., Stahr, K., 2005. Effect of clay minerals on extractability of heavy metals and sewage sludge mineralization in soil. Chemistry and Ecology 20 (2), 123–135.
Little-Dallas, N., 1998. Lime in soil stabilization.
Liu, S., Cao, W.D., Gao, X.C., Cui, X.Z., Shang, Q.S., 2009. Experimental study on soil stabilized with firming agent and lime. Road Pavement Material Characterization and Rehabilitation.
Meneses, M., Chaves, J.A.M., Mancilla, P., Rodríguez-Páez, J.E., 2007. Caracterización físico-química de arcillas del municipio de Guapi-Costa Pacífica Caucana. Revista Académica Colombiana de las Ciencias 31 (121), 537–544.
Nirov, J., Donchev, I., 2008. Lime stabilization of clay from the "Mirkovo" deposit. Part I: kinetics and mechanisms of the processes. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 91 (2), 487–490.
Nyakairu, G.W.A., Kurzweil, H., Koeberl, C., 2002. Mineralogical, geochemical and sedimentological characteristics of clay deposits from central Uganda and their applications. Journal of African Earth Sciences 35, 123–134.
Osula, D.O.A., 1996. A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. Engineering Geology 42 (1), 71–81.
Shanmuganathan, R.T., Oades, J.M., 1983. Modification of soil physical properties by addition of calcium compounds. Australian Journal of Soil Research 21 (3), 285–300.
Usman, A., Kuzyakov, Y., Stahr, K., 2005. Effect of clay minerals on immobilization of heavy metals and microbial activity in a sewage sludge-contaminated soil. Institute of Soil Science and Land Evaluation. Department of Soil and Water. Journal of Soil and Sediments 5 (4), 245–252.

IV.1A. EXTENDED PUBLICATION 1

ESTABILIZACIÓN DE LODOS BENTONÍTICOS PROCEDENTES DE TUNELADORA TRATADOS CON CAL

D. Movilla-Quesada[1*]; A. Vega-Zamanillo[2].; D. Castro-Fresno[3]; M. A. Calzada-Pérez[2]

Corresponding author: [1] Researcher Diana Movilla-Quesada, School of Engineering, University of Cantabria, Santander, 39005, Spain (Tel.: +34 942 203943; Fax: +34 942 201703; email: diana.movilla@unican.es)

[2] Prof. Dr. Angel Vega-Zamanillo, School of Engineering, University of Cantabria, Santander, 39005, Spain (Tel.: +34 942 203943; Fax: +34 942 201703; email: angel.vega@unican.es)

[3] Prof. Dr. Daniel Castro-Fresno, School of Engineering, University of Cantabria, Santander, 39005, Spain (Tel.: +34 942 203943; Fax: +34 942 201703; email: daniel.castro@unican.es)

[4] Prof. Dr. Miguel Ángel Calzada-Pérez, School of Engineering, University of Cantabria, Santander, 39005, Spain (Tel.: +34 942 203943; Fax: +34 942 201703; email: calzadam@unican.es)

ABSTRACT

La estabilización de suelos aplicada a la mejora de terraplenes y explanadas es una técnica que constituye una de las mejores alternativas desde el punto de vista funcional, ambiental y económico. El uso de la cal como aglomerante contempla ventajas como la mejora en el comportamiento de las propiedades mecánicas del suelo.

En la presente investigación se muestran los resultados obtenidos a partir del tratamiento con cal de cuatro muestras de lodos bentoníticos procedentes de tuneladora. El estudio realizado está basado en ensayos de tipo mineralógico, químico, geotécnico y mecánico de la mezcla del lodo bentonítico con el porcentaje óptimo del 3% de cal, llegándose a alcanzar mejoras del 80% en las propiedades resistentes del suelo.

Palabras clave: Lodos, cal, estabilización, explanada, terraplenes.

1. INTRODUCCIÓN

Los parámetros más importantes en el diseño y ejecución de terraplenes y explanadas se basan en aspectos estructurales, económicos y medioambientales. Las soluciones tienden al uso de nuevas tecnologías y métodos que sean más eficientes y menos agresivos con el medio ambiente (Hossain *et al*., 2007).

La estabilización de suelos consiste en adicionar un aglomerante al suelo (cal, cemento u otros) que permita mejorar las propiedades mecánicas y químicas de dicho material uniendo las partículas, para posteriormente poder aplicarlo en obras de carreteras, como se describe en el manual de ANCADE (2007). Este tipo de tratamiento con cal se realiza en suelos denominados inadecuados en obra, por lo que los efectos esperados son importantes, ya que con su reutilización se lograrían obtener grandes beneficios medioambientales y económicos reduciendo el impacto y costes, ya que dicho material sería tratado y reutilizado in-situ (Kuzyakov & Stahr, 2005; Usman *et al*. 2005).

Dependiendo de las características de cada suelo y del tratamiento posterior que se realice con el aditivo cementante, los suelos podrán clasificarse acorde con la normativa PG-3 (Highways Agency, 2007) en suelos marginales, tolerables, adecuados y seleccionados, siendo estos últimos los que mejores características presentan en cuanto a su aplicabilidad.

La estabilización de suelos es un método que ha sido estudiado en muchas partes del mundo por investigadores como Al- Amoudi *et al*. (2010) y Liu, *et al*. (2009) procedentes de Universidades de Europa del Este redactando diversos artículos basados en el estudio del suelo y sus diferentes aglomerantes.

En otros países como Nigeria donde la financiación de obras suele ser un problema, se han llevado a cabo estudios comparativos de la cal con otro tipo de aglomerantes por el bajo coste que supone su utilización. En este estudio se llegó a la conclusión que para un mismo porcentaje de aglomerante, la cal tarda menos tiempo en reaccionar con el material y además modifica las propiedades químicas del suelo de una forma más exhaustiva (Osula, 1996).

La investigación fue realizada con cemento y cal en un 2%, aunque los mejores resultados tanto de densidades como CBR fueron obtenidos con la cal, ya que esta mejoraba y aumentaba la capacidad portante del material (Konyeha & Ogbeide, 2006, Liu *et al*., 2009).

En el año 2007 la Universidad de Oklahoma realizó un estudio sobre la reacción que produce la cal y otro tipo de aglomerantes sobre suelos expansivos. Una vez realizados los ensayos oportunos, se llegó a la conclusión de que utilizando porcentajes del 2 y 3% de cal era posible disminuir el grado de hinchamiento y por lo tanto mejorar la expansividad del suelo (Buhler & Cerato, 2007).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales utilizados en esta investigación proceden de la obra de ampliación del campo de vuelo del Aeropuerto de Málaga que se encuentra ubicada en las cercanías del río Guadalhorce. Los terrenos corresponden con secuencias detríticas muy heterogéneas de gravas, arenas, limos y arcillas, donde aparecen bolsas de fangos orgánicos y arcillas grises, asociadas a la antigua desembocadura del estuario y al abandono de canales activos.

Según los puntos kilométricos, los materiales atravesados por el túnel se distinguen en tres categorías principales, que corresponden de menor a mayor antigüedad a limos del cuaternario, arenas finas, arcillas grises y verdosas cuaternarias y gravas limosas.

Los ensayos de caracterización y tratamiento de suelos con cal fueron realizados en el laboratorio de Caminos y Aeropuertos ubicado en la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

2.1. Caracterización de la cal

Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado cal viva Dl90-Q dolomítica que presenta un contenido en magnesio superior al 5% y que posteriormente ha sido hidratada en el laboratorio. Este tipo de material es utilizado según la norma EN-459 (2002).

Según la norma EN 80502 (2003) este tipo de cales, al mezclarse con el suelo liberan una cantidad de iones Ca^{++} que se encargan de flocular las partículas arcillosas y

aumentar el pH de la mezcla, hasta alcanzar valores que causan reacciones puzolánicas causantes del incremento de la resistencia en el tiempo (Boardman *et al.*, 2001; Shanmuganathan and Oades, 1983).

Uno de los efectos más pronunciados en la mezcla suelo-cal es el aumento en la resistencia del suelo debido a la atracción producida entre las partículas del suelo que provienen de los enlaces puzolánicos y los silicatos que contiene la cal (Godsey *et al*., 2007).

2.2. Caracterización del lodo

En primer lugar se realizó la caracterización de las distintas muestras sin aporte de cal, ya que era necesario saber si con el aporte las muestras incrementaban o no sus propiedades de una forma satisfactoria.

Mediante una serie de ensayos físicos, químicos y mineralógicos de cada material se comprobó y clasificó cada lodo para su posterior tratamiento: Contenido de humedad después de 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2; 4; 6; 8 y 24 horas; índice de plasticidad, Proctor Normal; CBR después de 4 días de inmersión en agua; hinchamiento; pH; análisis granulométrico; contenido en materia orgánica; contenido en sales; colapso y ensayo EDX. La comparación en cuanto a las características entre el material natural y el tratado con cal está basada para ambos en la realización de los ensayos que presenta la normativa vigente.

2.3. Ensayos Geotécnicos

Las muestras limosas y arcillosas han sido analizadas mediante el método del densímetro acorde con la norma ASTM D 422-63 ya que sus tamaños de partícula eran inferiores a los límites establecidos por otros ensayos como el tamizado. Por otro lado, las muestras arenosas 3 y 4 con tamaños de partícula mayores, fueron ensayadas acorde con la norma ASTM D 6913-04.

Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que no solo el tamaño de grano es influyente en el comportamiento del suelo, sino que también otras propiedades como la compacidad, distribución granulométrica y composición mineralógica (Inci *et al*., 2003).

2.4. Ensayos mineralógicos

Las partículas de los suelos naturales están formadas por minerales que se formaron a partir de una erosión química y su composición es distinta de las rocas de las que proceden cada uno de ellos (Ninov & Donchev, 2008).

El estudio llevado a cabo por Meneses *et al*. (2007) muestra que un 10% en contenido de sílice puede actuar de manera muy efectiva en la cementación de los suelos. Por ello, la cantidad de sílice encontrada en la muestra 2 del 46 % puede ser la causante de la dureza a la que llegaba el material cuando este reducía su contenido en agua a temperatura ambiente.

Los granos de la arcilla se rellenan o recubren con las pequeñas partículas de sílice y forman agregados, los cuales toman una resistencia bastante alta en comparación con otro tipo de formaciones minerales

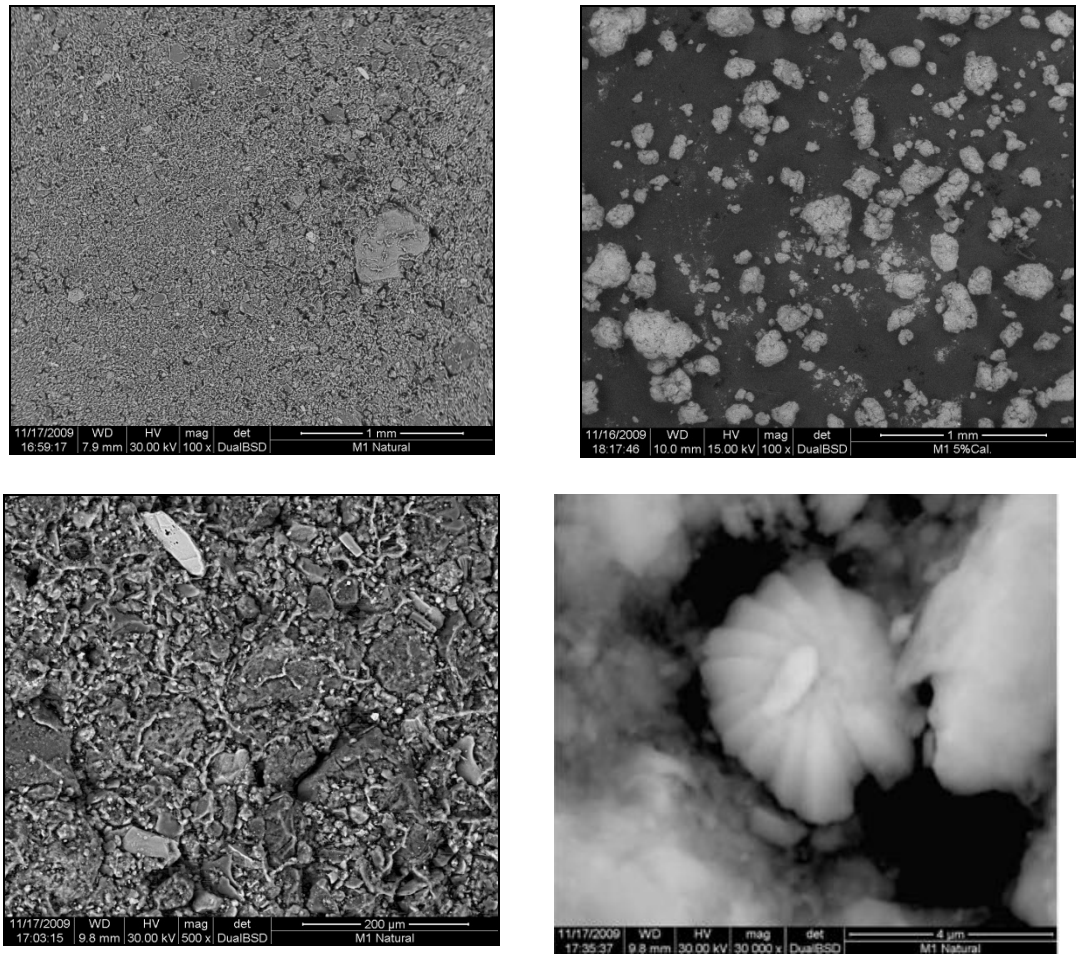


Fig. 1.Clayey silt x 100, without lime. A: Clayey silt x 100, 5% lime. B: Clayey silt x 500, 5% lime. C: Clayey silt x 30000, 5% lime

Los ensayos EDX (Energy Dispersive X-Ray spectroscopy) han sido realizados con un equipo SEM (Scanning Electron Microscope), mediante el cual se determinan las características morfológicas y estructurales de cada material, lo cual ayuda en la medida del tamaño del grano del suelo (Nyakairu *et al.,* 2002).

Los ensayos en las dos muestras fueron realizados en estado natural y con 5% de cal. Las figuras 1, a, b, c, 2, a, b y c muestran los resultados usando magnitudes microscópicas de 100x, 500x y 30000x.

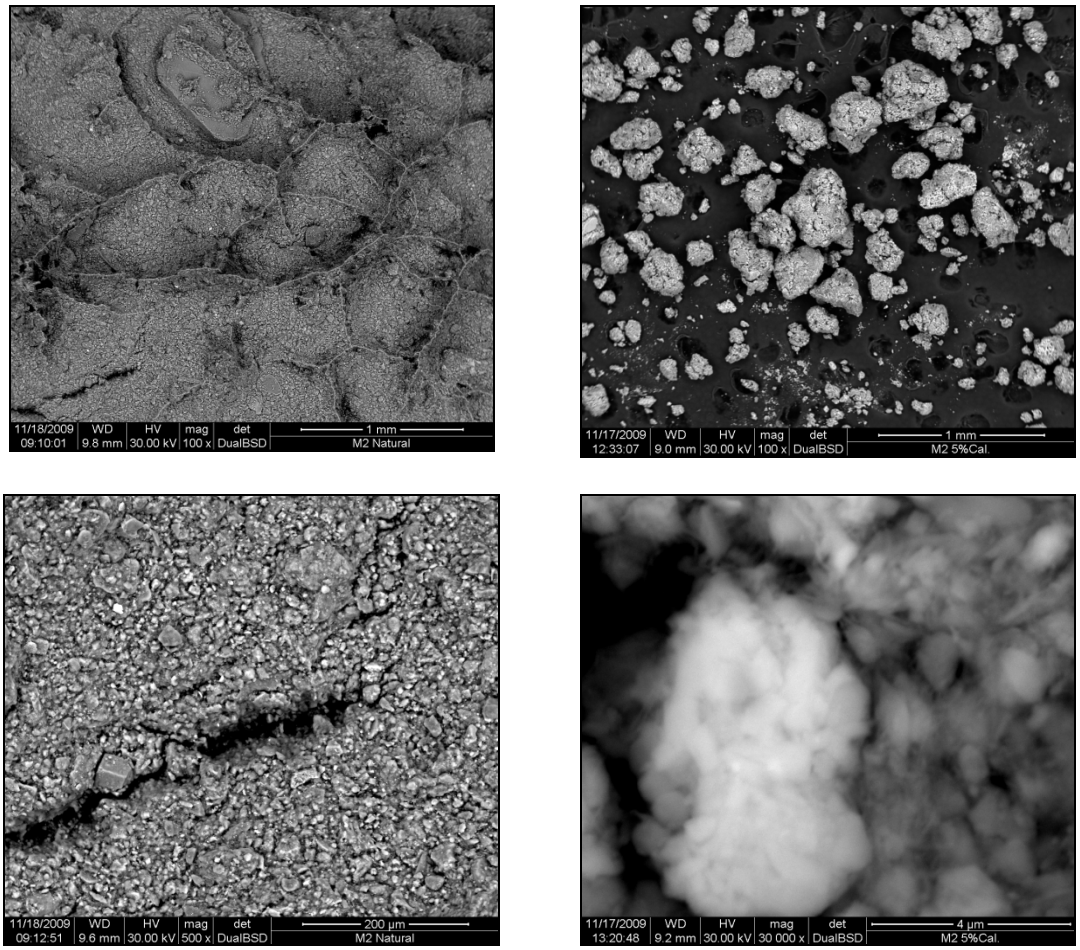


Fig. 2. Brown-green clay x 100, without lime. A: Brown-green clay x500, without lime. B: Brown-green clay x100, 5% lime. C: Brown-green clay x30000, 5% lime

2.5. Ensayos mecánicos

Kraemer and Mestre (2006) corroboraron que las características de los materiales son producidas después de un periodo específico de estabilización. Little-Dallas (1998) mostró en su manual "Lime stabilization" que los efectos producidos por la cal no ocurren instantáneamente sino que son producidos después de un tiempo determinado.

Los ensayos de Proctor normal han sido llevados a cabo acorde con la norma EN 103-500 (1994), usando moldes cilíndricos con una capacidad de 2,5 kg de material. Además, cada muestra fue compactada en tres capas de 25 golpes cada una, dejando caer libremente la pesa desde una altura de 30,5 cm (Al-Rawas *et al*., 2006).

Respecto al ensayo de CBR para cada combinación de lodo con un porcentaje de cal, se han realizado tres moldes con compactaciones distintas de 15; 30 y 60 golpes, acorde con la norma ASTM D 1883-07e2 (2007). Por su parte, los ensayos de hinchamiento libre y colapso han sido desarrollados acorde a las normas EN 103-601 (1996) y EN 103-406 (2006) respectivamente.

3. Resultados

3.1. Ensayos en estado natural

3.1.1. Análisis granulométrico

La Tabla 1 muestra los diferentes tamaños de partículas que presentan cada muestra. Para ello, las muestras 1 y 2, correspondientes a limos y arcillas respectivamente, fueron analizadas a partir del método del densímetro según la norma ASTM D 422-63 (2007), ya que su tamaño de partículas era inferior a 0.08 mm, mientras que para las muestras 3 y 4 al tener partículas de mayor tamaño fueron tamizadas según la normativa ASTM D 6913-04 (2009).

Tabla 1. Análisis granulométrico para cada muestra

Abertura (mm)	M_1	M_2	M_3	M_4
100	100	100	100	100
40	100	100	99,3	100
25	100	100	97,5	99,4
20	100	100	95,7	97,3
12.5	100	100	92,8	90,6
10	100	100	90,1	87,9
6.3	100	100	83,4	81,6
5	100	100	79,3	78,3
2	99,6	100	64,8	66
1,25	93,2	99,7	58	58,1
0,4	93,2	98,7	31,3	31,4
0,16	93,2	92,3	16,1	15
0,08	89,4	83,8	8,8	7,8
0,032	85,4	77,1	-	-
0,021	72,8	62,3	-	-
0,013	56,9	50,4	-	-
0,01	41,1	38,5	-	-
0,008	6,3	8,9	-	-
0,004	3,2	3,0	-	-

3.1.2. Ensayos de plasticidad, químicos y geotécnicos

La Tabla 2 muestra los resultados de los ensayos de caracterización de cada muestra en su estado natural. La muestra 1 (limos arcillosos) presentaban un alto contenido en agua y por lo tanto un alto índice de plasticidad, ya que su límite líquido es considerablemente más alto que otras muestras.

El contenido en materia orgánica se encuentra por debajo del límite que marca la normativa (PG-3), por lo que no supone un problema. Hay que remarcar que el contenido en sulfatos de la muestra 4 resultó ser cero.

Tabla 2. Análisis comparativo de los resultados obtenidos para cada muestra de suelo.

Ensayos de Naturaleza					
Ensayo	**Normativa**	**M1**	**M2**	**M3**	**M4**
Humedad Higroscópica (%)	ASTM D2216-05	37.1	23.5	18.8	15.7
Límite Líquido		47.4	34.7	25.6	22.8
Límite Plástico	ASTM D4318-10	23.3	24.7	18.2	19.9
Índice Plasticidad		24.1	10.0	7.34	2.9
Ensayos Químicos					
Contenido Materia Orgánica	UNE 103204	0.5	0.6	0.5	0.3
Determinación PH	UNE 77305	8.0	9.3	9.6	10.3
Contenido en Sales Solubles	NLT 114	0.5	0.6	0.2	0.2
Conductividad (ms/cm)	NLT 254	4.2	3.3	1.3	1.30
Contenido en yeso	NLT 115	0.3	0.0	0.1	0.4
Contenido en Sulfatos	UNE 103201	0.3	0.6	0.1	0.0
Ensayos Geotécnicos					
Asiento en ensayo de Colapso	ASTM D5333-03	3.8	1.9	1.9	0.2
Hinchamiento Libre	ASTM D4546-08	-0.7	-0.1	-0.1	0.06

3.1.3. Espectroscopia por Rayos X

La Tabla 3 muestra el contenido en masa de los compuestos de cada material, obtenidos a partir de análisis mineralógicos realizados a cada muestra. Los ensayos químicos establecidos determinaron que el material con un alto contenido en óxido de silicio era

la muestra arcillosa. La muestra 2 contiene un 46% de silica, la cual es causante de la dureza del material.

Cada composición mineral de las muestras fue analizada mediante un estudio por difracción de rayos X (Tabla 4). Los resultados obtenidos muestran que el material 3 no contiene ningún filosilicato y que la muestra 4 no contiene ni feldespato ni tampoco filosilicatos. Por lo general, todas las muestran presentan contenidos de calcita, cuarzo y dolomita.

Los ensayos microscópicos fueron realizados mediante un equipo de análisis EDX ya que las muestras 1 y 2 presentaban un alto contenido en agua. Los elementos identificados en estas dos muestras fueron aluminio y sílica, anotándose que cuando dichos elementos fueron tratados con cal aparecieron cambios estructurales, produciéndose reacciones puzolánicas que llevaron a la cementación de las muestras y, por lo tanto, a la aparición de elementos como alúmina y sílica hidratada.

Tabla 3. Resultados del ensayo de Difracción de RX sobre cada muestra.

% Peso	SiO_2	CaO	$Al2O_3$	$Fe2O_3$	K2O	MgO	TiO_2	SO_3	P_2O_5	CO_2
M_1	41,0	15,0	16,0	5,9	2,0	3,4	0,8	0,2	0,1	15,3
M_2	46,0	12,0	16,0	5,7	2,2	3,1	0,8	0,2	0,2	13,0
M_3	40,9	14,9	10,5	4,0	1,4	7,5	0,4	0,2	0,1	19,9
M_4	38,6	17,5	9,3	3,3	1,2	7,5	0,4	0,1	0,1	21,9

Tabla 4. Resultados del ensayo de Difracción de Rayos X

	M_1	**M_2**	**M_3**	**M_4**
Calcita (%)	18,5	20,8	21,2	10,7
Cuarzo (%)	22,5	30,3	32,8	38,7
Dolomita (%)	23,8	4,3	4,09	50,6
Feldespato (%)	3,2	4,9	5,1	-
Filosilicatos (%)	32	39,7	-	-

3.1.4. Clasificación en estado natural

La Tabla 5 muestra la clasificación de cada material acorde con el PG-3 (2007) y determina cuando el material es adecuado para ser utilizado en terraplenes y/o explanadas sin ningún tipo de tratamiento con aditivos.

Las cuatro muestras han sido tratadas con cal, siempre acorde con los parámetros establecidos en la normativa vigente, modificando por completo las propiedades de las muestras 1 y 2 y mejorando el comportamiento de las muestras 3 y 4.

Tabla 5. Clasificación de suelos en estado natural según PG-3.

Muestra	Material	Clasificación	Aplicación
$\mathbf{M_1}$	Limo Arcilloso	Suelo Marginal	No aplicable
$\mathbf{M_2}$	Arcilla verde y gris	Suelo Marginal	No aplicable
$\mathbf{M_3}$	Arena limosa	Suelo Adecuado	Aplicable
$\mathbf{M_4}$	Arena Arcillosa	Suelo Adecuado	Aplicable

3.2. Tratamiento con cal

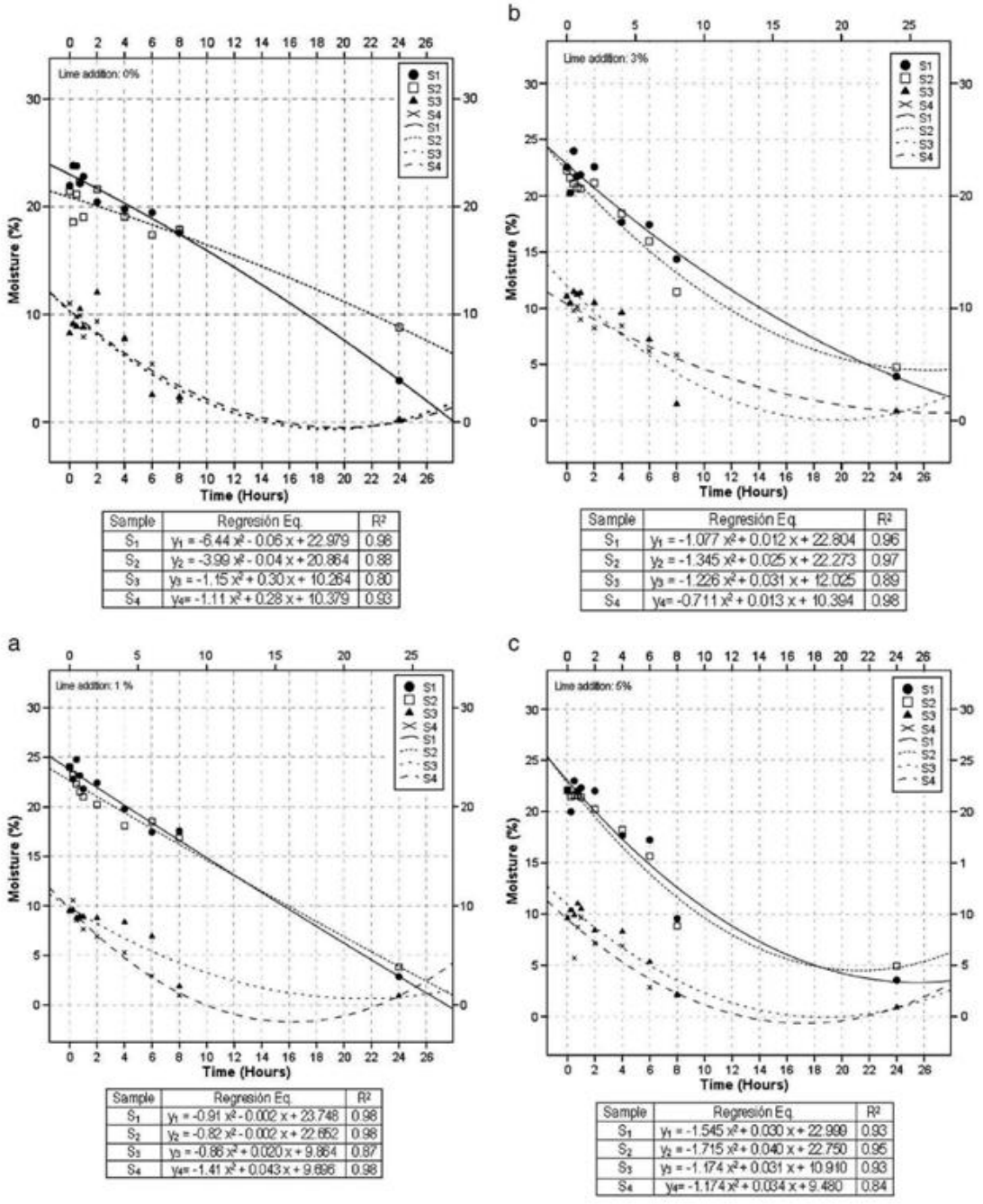
3.2.1. Contenido de humedad

Los cambios que presenta el suelo una vez que se ha tratado con cal dependen del estado en el que se encuentra la cal y el porcentaje que se aplica (Figura 3, a, b, c).

La humedad natural que presenta cada suelo es próxima a la humedad óptima de compactación, lo que explica el haber utilizado porcentajes de cal del 1 %; 2,5 %; 3 %; 3,5 % y 5 % para cada ensayo.

Una vez que la cal es mezclada con el suelo llega un momento en que éste llega a su capacidad máxima de humedad por lo que la cal comienza a actuar solamente como

aporte de materia seca. En este caso se ha comprobado que el punto en el que los suelos llegan a su contenido en agua máximo es para una adición del 3 % de cal.



Sample	Regresión Eq.	R^2
S_1	$y_1 = -6.44 x^2 - 0.06 x + 22.979$	0.98
S_2	$y_2 = -3.99 x^2 - 0.04 x + 20.864$	0.88
S_3	$y_3 = -1.15 x^2 + 0.30 x + 10.264$	0.80
S_4	$y_4 = -1.11 x^2 + 0.28 x + 10.379$	0.93

Sample	Regresión Eq.	R^2
S_1	$y_1 = -1.077 x^2 + 0.012 x + 22.804$	0.96
S_2	$y_2 = -1.345 x^2 + 0.025 x + 22.273$	0.97
S_3	$y_3 = -1.226 x^2 + 0.031 x + 12.025$	0.89
S_4	$y_4 = -0.711 x^2 + 0.013 x + 10.394$	0.98

Sample	Regresión Eq.	R^2
S_1	$y_1 = -0.91 x^2 - 0.002 x + 23.748$	0.98
S_2	$y_2 = -0.82 x^2 - 0.002 x + 22.652$	0.98
S_3	$y_3 = -0.86 x^2 + 0.020 x + 9.864$	0.87
S_4	$y_4 = -1.41 x^2 + 0.043 x + 9.696$	0.98

Sample	Regresión Eq.	R^2
S_1	$y_1 = -1.545 x^2 + 0.030 x + 22.999$	0.93
S_2	$y_2 = -1.715 x^2 + 0.040 x + 22.750$	0.95
S_3	$y_3 = -1.174 x^2 + 0.031 x + 10.910$	0.93
S_4	$y_4 = -1.174 x^2 + 0.034 x + 9.480$	0.84

Figura. 3. Contenido de humedad para cada muestra. a) con 1 % de cal; b) con 3% de cal; c) con 5% de cal

3.2.2. Análisis del índice de plasticidad

La Tabla 6 muestra una variación del límite líquido creciente para las muestras arcillosas, arenosas (M_2, M_3, y M_4) mientras que para los limos (M_1) se produce una disminución del límite líquido al añadirle un 3% de cal. Si se aplica la carta de plasticidad, como se muestra en la Figura 2 aplicando los resultados obtenidos de límite líquido e índice de plasticidad se puede observar la variación que produce la adición de cal apagada en cada uno de los suelos.

Tabla 6. Resultados de los ensayos de plasticidad en suelos.

	Límite Líquido				
	0%	**2,5%**	**3%**	**3,5%**	**5%**
M_1	38,36	40,42	46,40	45,12	42,26
M_2	34,71	38,51	42,48	40,89	38,65
M_3	25,59	27,61	30,67	29,56	28,70
M_4	22,80	25,64	28,29	27,10	26,69
	Límite Plástico				
M_1	23,32	27,62	35,36	33,25	30,57
M_2	24,68	29,28	32,44	30,14	29,88
M_3	18,24	22,13	24,96	22,59	21,47
M_4	19,90	21,87	24,28	23,22	20,01
	Índice de Plasticidad				
M_1	24,08	12,80	11,28	11,87	11,69
M_2	10,00	9,23	10,04	10,75	8,77
M_3	7,34	5,48	5,71	6,97	7,23
M_4	2,90	3,77	4,01	3,88	6,68

La Figura 4 muestra la carta de plasticidad de las muestras en estado natural y con adición de distintos porcentajes de cal. La M_1 se encuentra dentro del grupo de limos arcillosos, aunque al añadirle el porcentaje óptimo de cal aumenta su plasticidad en un 35%. La muestra 2, a simple vista, contiene un mayor contenido de agua en estado natural y según la carta de plasticidad y por los resultados obtenidos pertenece al grupo de las arcillas limosas.

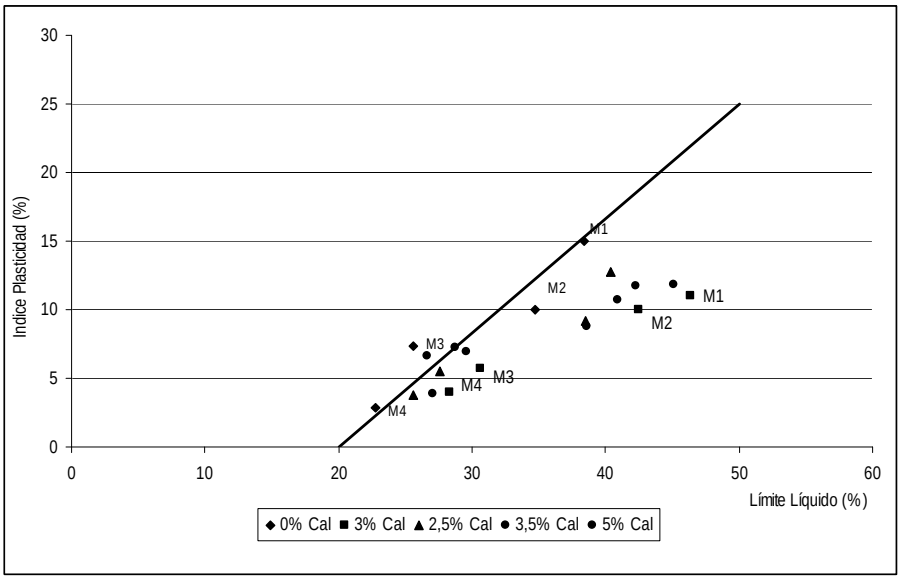


Figura 4. Carta de plasticidad aplicada a los ensayos realizados con los distintos porcentajes de cal.

En cuanto al grupo de M_3 y M_4 son materiales más granulares y atendiendo a la plasticidad de dichos suelos, podrían clasificarse como arenas arcillosas cuya plasticidad aumenta cuando se le aplica el contenido óptimo de cal.

3.2.3. Proctor Normal

La Tabla 7 muestra los datos obtenidos en los ensayos Proctor observándose diferentes comportamientos dependiendo de la naturaleza del suelo. Esto lleva a decir que los limos, las arcillas y las arenas presentan resultados diferentes frente a los porcentajes de cal adicionados.

Las muestras de limos y arcillas (M_1 y M_2), siempre en comparación con la muestra natural, a medida que se va adicionando cal, la densidad máxima seca disminuye al contrario de la humedad óptima, hasta llegar al punto de adición óptimo (3% cal) en el que ambos comienzan a comportarse de forma inversa. Esto es debido a que antes de

llegar al porcentaje óptimo de cal, en el suelo se van desarrollando una serie de reacciones químicas entre las moléculas no saturadas de agua del suelo y la cal. Una vez pasado el porcentaje óptimo, si se adiciona más cantidad de cal lo que ocurre es que la densidad seca del suelo aumentará, ya que al haberse saturado completamente el suelo por la acción de la cal, las partículas de ésta se quedarán formando parte del suelo sin mezclarse con él lo que hará que éste adquiera una mayor densidad.

Sin embargo, para las arenas (M_3 y M_4), al analizar los resultados obtenidos se demuestra que el parámetro de naturaleza del suelo asume un papel importante además del contenido en agua del suelo, ya que a medida que se varía la cantidad de cal a utilizar, varían de forma completamente distinta la densidad y la humedad óptima de dicho material. En estas muestras al adicionar porcentajes de cal menores al óptimo, la densidad seca máxima decrece mientras que la humedad óptima va en aumento. Esto se debe a que la cal saturada no actúa completamente en las partículas del suelo; es decir, no equilibra del todo las reacciones químicas producidas por el efecto de la cal.

A partir de este porcentaje, toda la cal adicionada actuará de forma que la densidad y la humedad disminuirán claramente, con lo que la cal no producirá ningún efecto de resistencia en el material.

Tabla 7. Resultados obtenidos en el Ensayo Proctor

	0% Cal		**2,5% Cal**		**3% Cal**		**3,5% Cal**		**5% Cal**	
	ω_{optima} (%)	$\gamma_{máxima}$ (g/cm^3)	ω_{optima} (%)	$\gamma_{máxima}$ (g/cm^3)	ω_{optima} (%)	$\gamma_{máxima}$ (g/cm^3)	ω_{optima} (%)	$\gamma_{máxima}$ (g/cm^3)	ω_{optima} (%)	$\gamma_{máxima}$ (g/cm^3)
M_1	19,8	1,67	20,8	1,51	18,9	1,61	18,2	1,63	19,6	1,62
M_2	19,1	1,70	24,6	1,57	20,1	1,62	18,8	1,68	20,2	1,64
M_3	9,2	2,07	10,8	1,98	10,7	2,00	10,3	1,98	9,7	1,95
M_4	9,4	2,06	9,4	1,91	10,7	1,94	10	1,88	9,8	1,87

3.2.4. C.B.R.

La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos en el ensayo CBR observándose que para los cuatro tipos de muestras un contenido mayor o menor al óptimo de cal puede no actuar de forma satisfactoria en la capacidad portante del mismo. Al relacionar los parámetros "Proctor" con los obtenidos en el CBR, las capacidades resultantes en el óptimo son las máximas, pudiendo incluso cambiar la clasificación del PG-3.

A la hora de comparar el fenómeno mecánico que se produce cuando se mezcla el lodo con la cal, se pueden apreciar curiosos resultados. Para valores por encima del porcentaje óptimo de cal en la muestra arcillosa se observa una disminución notable de la capacidad portante hasta una recuperación que se produce al añadir un 5% de cal, siempre sin llegar a los valores de CBR óptimos.

A la vista de los resultados obtenidos, queda de manifiesto el poder floculante de la cal con respecto a las partículas finas y la variación de la densidad de los diferentes lodos. Dado que estos materiales poseen en mayor o menor magnitud una cantidad determinada de finos se puede decir que la cal actuará siempre en función de ellos.

Los ejemplos más aislados se encuentran en las arenas, donde el poder de floculación es menor y la aparición de cal suelta disminuye la densidad conjunta.

Tabla 8. Resultados del ensayo CBR

	100 % P.N.											
	0%		1%		2,5%		3%		3,5%		5%	
	CBR	γ seca (g/cm3)	CBR	γ seca (g/cm3)	CBR	γ seca (g/cm3)	CBR	γ seca (g/cm3)	CBR	γ seca (g/cm3)	CBR	γ seca (g/cm3)
M_1	5	1,672	8	1,632	6	1,695	25	1,616	20	1,625	22	1,640
M_2	2	1,705	7	1,655	5	1,575	30	1,620	20	1,630	23	1,643
M_3	5	2,070	39	2,062	5	4,980	58	2,002	11	1,630	31	1,949
M_4	15	2,075	56	1,941	43	1,912	71	2,002	31	1,879	43	1,875
	95 % P. N.											
M_1	4	1,535	6	1,555	5	1,510	21	1,535	15	1,540	16	1,570
M_2	2	1,539	5	1,572	4	1,496	22	1,539	16	1,549	18	1,561
M_3	5	1,902	26	1,959	4	1,881	53	1,902	9	1,550	18	1,852
M_4	10	1,900	36	1,844	28	1,816	46	1,904	20	1,785	26	1,781

3.2.5. Hinchamiento libre y asiento de colapso

La Tabla 9 muestra los resultados para los ensayos de hinchamiento y colapso para muestras sin adición con cal y con el porcentaje óptimo (3 %). Los resultados obtenidos son altamente satisfactorios, ya que además de mejorar las propiedades, el hinchamiento libre es capaz de clasificar el propio suelo en una categoría más alta.

El hinchamiento libre obtenido habiendo utilizado la norma para la muestra 1 con un 0 % de cal ha sido de 3,81 %. Si nos rigiésemos por este valor no podríamos utilizar este tipo de material en ninguna zona. Sin embargo si el suelo es tratado con la cantidad óptima (3 % cal) el hinchamiento libre disminuye hasta un valor de 0,78% lo que

implica una mejora de las propiedades volumétricas y su clasificación como suelo tolerable.

Para la muestra 2 (muestra arcillosa) sucede lo mismo que para la muestra 1, el hinchamiento libre se reduce en un 88% aproximadamente. La diferencia con la primera muestra es que para este tipo de suelo sin adición de cal, el suelo es clasificable como suelo tolerable y al añadirle el 3% queda clasificado igualmente como tolerable pero habiendo mejorado sus propiedades resistentes.

Sin embargo, para las arenas el caso es diferente para este tipo de ensayos. Al tener una naturaleza diferente al de las arcillas la cal se comporta en cuanto al volumen de forma distinta.

Este tipo de suelos sin adición de cal están clasificados como suelos tolerables, así que aunque los resultados muestren un ligero aumento en los resultados no afectarán negativamente en el material para su uso posterior en terraplenes.

Tabla 9. Resultados obtenidos de los ensayos de hinchamiento libre en expansión y asiento de colapso.

	Hinchamiento Libre		Asiento de Colapso	
	0 % Cal	**3 % Cal**	**0 % Cal**	**3 % Cal**
M_1	3,8	0,8	-0,70	-0,2
M_2	1,8	0,2	-0,12	-0,03
M_3	1,9	0,2	-0,1	0,0
M_4	0,2	0,1	-0,1	0,0

3.2.6. Clasificación del material tratado con cal

La Tabla 10 muestra las variaciones producidas en las muestras y su clasificación después del tratamiento con cal.

Tabla 10. Clasificación de suelos en estado natural según PG-3

Muestra	Material	M_n + 0 % Cal	M_n + 3 % Cal
M_1	Limo Arcilloso	Suelo Marginal	Suelo Adecuado
M_2	Arcilla verde y gris	Suelo Marginal	Suelo Adecuado
M_3	Arena limosa	Suelo Adecuado	Suelo Seleccionado
M_4	Arena Arcillosa	Suelo Adecuado	Suelo Seleccionado

IV.2. - EXPERIMENTAL STUDY OF BITUMINOUS MASTIC BEHAVIOUR USING DIFFERENT FILLERS BASED ON THE UCL METHOD

Journal of Civil Engineering and Management

Journal of Civil Engineering and Management has been awarded the distinction of CIB Encouraged Journal by the International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB)

Rank in Category: Journal of Civil Engineering and Management 2011 JCR Science Edition

Journal Ranking

For **2011**, the journal **Journal of Civil Engineering and Management** has an Impact Factor of **2.171**.

This table shows the ranking of this journal in its subject categories based on Impact Factor.

Category Name	Total Journals in Category	Journal Rank in Category	Quartile in Category
ENGINEERING, CIVIL	118	8	Q1

Rank	Abbreviated Journal Title (linked to journal information)	ISSN	JCR Data						Eigenfactor® Metrics	
			Total Cites	Impact Factor	5-Year Impact Factor	Immediacy Index	Articles	Cited Half-life	Eigenfactor® Score	Article Influence® Score
1	J CIV ENG MANAG	1392-3730	429	2.171		0.088	57	2.8	0.00097	

IV.3. - EVALUATION OF WATER EFFECT ON BITUMINOUS MASTICS WITH DIFFERENT CONTRIBUTION FILLERS AND BINDERS

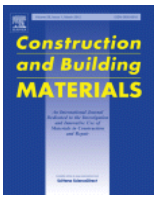
Diana Movilla-Quesada, Ángel Vega-Zamanillo, Miguel Ángel

Calzada-Pérez, Daniel Castro-Fresno.

Journal of Construction and Building Materials, 29, 339-347, **2012**.

DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.093

Journal of Construction and Building Materials



An international journal dedicated to the investigation and innovative use of materials in construction and repair

Journal: CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS 2011 JCR Science Edition

Journal Ranking

For **2011**, the journal **CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS** has an Impact Factor of **1.834**.

This table shows the ranking of this journal in its subject categories based on Impact Factor.

Category Name	Total Journals in Category	Journal Rank in Category	Quartile in Category
CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY	56	8	Q1

Journal Title	ISSN	Total Cites	Impact Factor	5-Year Impact Factor	Immediacy Index	Citable Items	Cited Half-life	Citing Half-life
CONSTR BUILD MATER	0950-0618	4396	1.834	2.134	0.269	532	4.0	9.2

Construction and Building Materials 29 (2012) 339–347

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Evaluation of water effect on bituminous mastics with different contribution fillers and binders

Diana Movilla-Quesada *, Ángel Vega-Zamanillo [1], Miguel Ángel Calzada-Pérez [1], Daniel Castro-Fresno [1]

School of Engineering, University of Cantabria, Santander 39005, Spain

ARTICLE INFO

Article history:
Received 20 April 2011
Received in revised form 15 July 2011
Accepted 12 August 2011

Keywords:
Bituminous mixture
Cantabrian test under wet conditions
Water sensitivity
Immersion–compression test
Water
Filler

ABSTRACT

The study demonstrates that the use of hydroxide and calcium carbonate as a filler in adequate amounts can improve the behavior of bituminous mixtures under the action of water. For this, a study has been carried out based on the Cantabrian abrasion loss test under wet conditions, water sensitivity to indirect strength and an immersion–compression test. The bituminous mixtures were made with two different types of aggregate, four percentages of hydroxide and calcium carbonate as filler, and two bitumens with 60/70 and BM-3c of penetration in amounts of 4.8% and 5.2% respectively of the mix.

The results shows that the contribution of hydroxide and calcium carbonate as a filler in the mixture increases its preserved resistance up to 40%, fulfilling the specifications for its application in construction work. Furthermore, the filler contribution is demonstrated to improve the adherence between aggregate–bitumen under the effect of water by 45%. Moreover, a statistic linear model was developed for each test based on aggregate type, bitumen and filler of the mixture.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The elements such as temperature or water can produce negative effects on the durability of bituminous mixtures. A wet climate accompanied by inadequate materials can be the principal cause of pavement deterioration. Water produces three important reactions in the deterioration of the bituminous pavement: the resistance loss caused by wear, the minimization of the bitumen rigidity and the adhesion loss between aggregate and bitumen [1].

The development of the test to determine the indirect tensile strength by water sensitivity began in the mid 1930s with limestone fillers. Since then, numerous studies have been done about the effect produced by water on the behavior of bituminous mixtures [2].

In 1990 the Roads and Airports Department at the University of Cantabria conducted a series of studies based on the Cantabrian test under wet conditions that examined the resistance to disintegration of bituminous mixtures. This test enabled other parameters to be studied such as adhesion, texture or road surface noise comparing to other materials used in road surfaces [3].

Later, the University of Canterbury carried out an investigation based on a water sensitivity test with a granular material from New Zealand which contained cement as a filler. The results showed an increase in resistance when the optimum level of bitumen and filler was reached [4].

The first experimental test of the use of recycled tire rubber as filler in urban paving was in 2002. The section was manufactured by CEAMSE and urban expressway in Buenos Aires and it used the immersion–compression test as a means of estimating the curing time and strength of the rubber used in the mixture [5].

In 2008, Anadolu University in Turkey presented a study about the behavior of the mixture of fly ash, Portland cement and lime used as filler under the action of water. The bituminous mixtures made with these materials had higher resistances than those made with other types of filler [6].

In 2010 the Department of Civil Engineering of Malaysia University used the Cantabrian test to study the behavior of two mixtures with different types of bitumen and lime as filler. The results showed that the use of modified bitumen and lime significantly increased the resistance achieving a minimum wear of the bituminous mixture [7].

This study analyzes the behavior of a hydroxide and calcium carbonate mixture as filler with different types and quantities of bitumen under the action of water, checking whether the total replacement of the filler by these materials improves adhesion and wrapping [8].

2. Materials and methods

Different tests were carried out in the Roads and Airports Laboratory at the University of Cantabria to study the behavior of bituminous mixtures made with ophitic and siliceous aggregates, namely, B60/70 and BM3c bitumens and four mixtures with different percentages of calcium hydroxide and calcium carbonate.

* Corresponding author. Tel.: +34 942 203943; fax: +34 942 201703.
E-mail addresses: diana.movilla@unican.es (D. Movilla-Quesada), angel.vega@unican.es (Á. Vega-Zamanillo), calzadam@unican.es (M.Á.Calzada-Pérez), daniel.castro@unican.es (D. Castro-Fresno).
[1] Tel.: +34 942 203943; fax: +34 942 201703.

0950-0618/$ - see front matter © 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.
doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.093

The percentages of filler combining $Ca(OH)_2$ and $CaCO_3$ were 20–80, 25–75, 40–60, 50–50 respectively.

Before performing the water sensitivity, immersion–compression and loss by wear tests, a series of tests were done to characterize the filler, because it was important to know its properties separately in order to perform a good study of the final mixture. A test of void ratio of dry compacted filler was done conforming to the standard and real densities.

2.1. Characterization of the filler

2.1.1. Density and voids of dry compacted filler

The filler was compressed using a standard compaction device according to the standard [9]. The compacted filler volume is determined from the height of the compacted layer of filler and the real density of the filler.

The apparent density of filler in toluene is determined according to [10] and must be within a range between 0.5 and 0.8 g/cm^3.

2.1.2. Critical concentration of the filler

The critical filler concentration is determined from a known mass of filler according to the Argentinean standard IRAM 1542. The critical concentration (C_v) is calculated using the following expression:

$$C_v = \frac{P}{V \cdot \rho}$$

where P is the mass of the filler (g); V the sediment volume (cm^3) and ρ is the density of dry filler (g/cm^3).

2.2. Bituminous mixtures

The aggregate used for this study came from crushed natural gravel used in the Basque Country and Castilla y León (Spain). An aggregate known as aggregate 1, of ophitic nature, and another, aggregate 2, of siliceous nature were used.

The bitumen used was B60/70, and a polymer modified bitumen type BM-3c. The provision of both ligands was 4.8% for 60/70 of bitumen penetration and 5.2% for BM-3c modified bitumen on bituminous mixture (Table 1).

2.2.1. Granulometric analysis

The granulometric analysis was done, combining the different fractions of aggregates including filler. The particle size must be between the coarser zones established by [11].

Several series of bituminous mixtures were manufactured with the materials listed above using compositions consistent with semi-dense mixing zones of type AC16S according to [12], and discontinuous type BBTM 11B according to [13].

2.2.2. Void percentage

The determination of void content [14] in mixture AC16S was done with Marshall samples compacted according to the standard [15], applying 75 strokes per side, while BBTM 11B samples were made, applying 50 strokes per side. The two types of mixtures must fulfill the minimum of voids to be used in subsequent tests.

The AC16S bituminous mixture had between 4% and 6% of voids and the BBTM mixture a void ratio higher than 12%.

2.3. Wear resistance by the wet Cantabrian test

The wet Cantabrian test (Fig. 1) measured the resistance to sliding that exists between the aggregate and bitumen under the effect of water. The procedure consists of immersing the samples in a bath at 60 °C for 24 h and subsequently testing in the Cantabrian machine [16].

Table 1
Properties of the bitumen.

Tests	Units	Standard	Results	
			B60/70	BM-3c
Penetration (25 °C)	mm/10	EN 104281–5[a]	65	60
Softening point	°C	EN 104281–3[b]	49.9	69
Relative density	g/cm^3	EX 104281–2	1.033	1.035
Fraas point of fragility	°C	NLT 182[c]	−16	−8

[a] EN 104281-5. Spanish association for standardization and certification. Bituminous and bituminous modified materials. Bituminous raw materials and mastics. Testing methods. Penetration index; 1986.

[b] EN 104281-3. Spanish association for standardization and certification. Pure and modified bituminous materials. Bituminous raw materials and mastics. Testing methods. Softening point; 1986.

[c] NLT 182. Transport laboratory standard. Breaking point of bitumen. Fraas method; 1999.

Fig. 1. Cantabrian test machine.

Fig. 2. Immersion–compression test machine.

2.4. Water sensitivity test

The water sensitivity test was carried out according to [17]. The loss of cohesion was determined by this test, which was produced by the effect of water on the saturation of the bituminous mixtures.

Table 2
Characteristic of the filler.

Filler (%)	Density (g/cm^2)	Critical concentration	Porosity (%)
20–80	2.80	0.24	45.43
25–75	2.85	0.20	48.90
40–60	2.87	0.19	55.23
50–50	2.89	0.18	57.10

The compaction process was performed by the Marshall method, using 75 strokes and using tensile strength as breakage [18].

2.5. Immersion–compression test

The immersion–compression test (Fig. 2) is similar to the water sensitivity procedure, but differs in some respects. The cylindrical samples were made with a height of 101.6 mm × 101.6 mm in diameter and the compaction method used was a double-piston press. Once they were compacted, allowed to stand for 24 h, they were then immersed in a bath at 60 °C for 24 h. It was broken under simple compression [8].

3. Results

3.1. Filler characterization

3.1.1. Density, critical concentration and filler porosity

The amount and distribution of the voids directly influence apparent density or permeability of the filler itself. Table 2 shows the apparent density, critical concentration and porosity of each percentage of filler used.

The specific weight of calcium hydroxide is greater as more quantity is added to the mixture, which implies that the greater the percentage amount of hydroxide is increased enough mass together, despite also increase the porosity and hence its apparent volume.

Table 3
Granulometric analysis of the AC16S and BBTM 11B mixtures.

Sieve (mm)		22.4	16	11.2	8	4	2	0.5	0.25	0.063
% Pass	AC16S	100	98	–	64	43	30	12	9	5.5
	BBTM		100	96	69	27	18	9	–	7

Table 4
Voids content in bituminous mixtures.

	AC16S (B60/70)		BBTM (BM-3c)	
Filler (%)	Aggregate 1 (%)	Aggregate 2 (%)	Aggregate 1 (%)	Aggregate 2 (%)
20–80	5.90	5.95	13.38	22.39
25–75	5.66	4.91	13.53	20.95
40–60	5.60	4.83	13.10	19.62
50–50	4.68	4.77	12.67	17.30

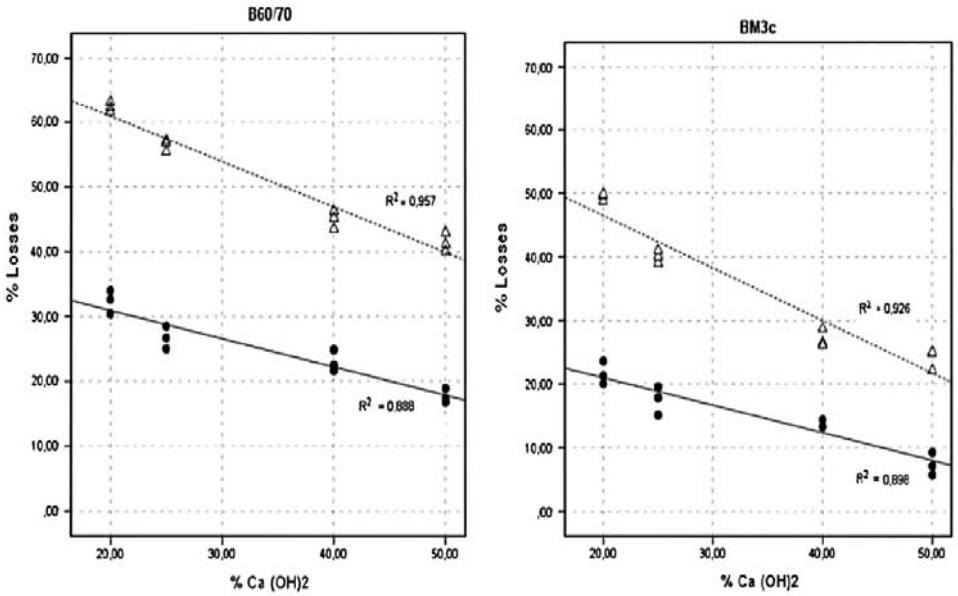


Fig. 3. Wear loss by Cantabrian test under wet conditions.

Fig. 4. Comparison between the Cantabrian sample tested and some not.

Similarly, found that the critical concentration is lower the higher the fineness and the irregularity of the filler particles.

3.2. Bituminous mixture

3.2.1. Granulometric analysis

The granulometry used for each bituminous mixture is fixed and differs only in the filler percentage. Table 3 shows the granularity measurement carried out according to the standard.

3.2.2. Void content

Table 4 shows the void content of each bituminous mixture.

3.3. Wear resistance by Cantabrian test under wet conditions

Fig. 3 shows the detachment between the aggregates and bitumen, comparing the wear losses by Cantabrian test under

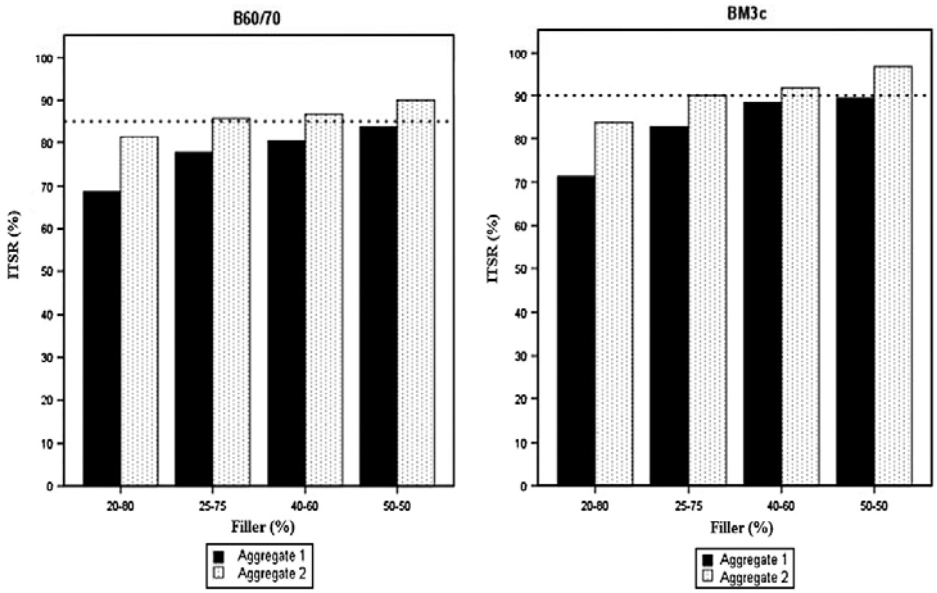


Fig. 5. Results of water sensitivity test for each bitumen.

Fig. 6. Samples subjected to water sensitivity test.

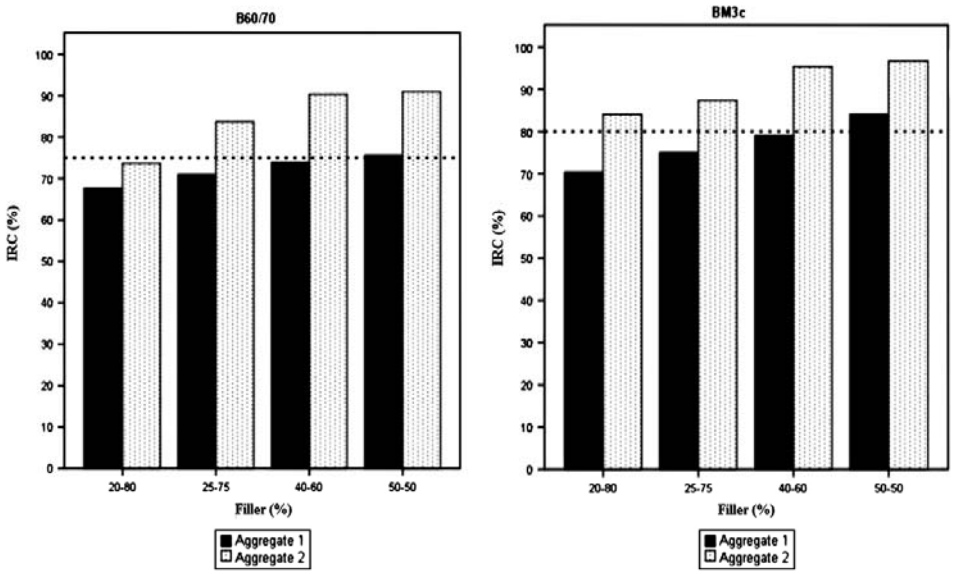


Fig. 7. Results of immersion–compression test for each bitumen.

Table 5
Correlation coefficient for each test.

Model	R	R^2	R^2 corrected
Losses	0.968	0.936	0.932
ITSR	0.913	0.833	0.821
IRC	0.963	0.928	0.923

wet conditions. The greatest losses were in the 60/70 penetration bitumen for aggregate 1, with losses between 40% and 70%, while for aggregate 2, if the amount of hydroxide exceeds 25% and calcium carbonate is less than 75%, the mixture fulfilled the minimum value of loss required by the standard.

Fig. 3 shows that treatment the bituminous mixture with modified bitumen, the losses produced with the aggregate 1, fulfilling the standard, provided the hydroxide percentage was greater than 35%. For aggregate 2 the minimum quantity of filler could be used, as the standard is complied with for the all the samples (Fig. 4).

Table 6
Relations among the distinct variables and their level of significance.

Model	Sum of squares[a]	F^b	Sig.[c]
Losses			
Regression	10552.98	215.26	0.0
Residual	719.03		
Total	11272.01		
ITSR			
Regression	2074.75	73.06	0.0
Residual	416.50		
Total	2491.25		
IRC			
Regression	3574.60	188.54	0.00
Residual	278.07		
Total	3852.67		

[a] It is the result of the sum of squared deviations between each measurement of the sample and the average of its group.
[b] This factor allows to compare the degree of similarity between the measures that are being compared.
[c] Significance level.

Table 7
Coefficients of the regression lines for each test.

Model	Coefficients				
	Non standardized coefficients		Standardized coefficients		Sig.[d]
	B^a	Typical error	Beta[b]	t^c	
Losses					
(Constant)	−682.56	32.67		−20.89	0.00
Density (g/cm^3)	203.31	10.60	0.73	19.16	0.00
% $Ca(OH)_2$	−0.57	0.04	−0.44	−11.69	0.00
Penetration (mm/10)	2.78	0.23	0.45	11.91	0.00
ITSR					
(Constant)	298.34	24.86		11.99	0.00
Density (g/cm^3)	−47.72	8.07	−036	−5.9	0.00
% $Ca(OH)_2$	0.39	0.03	0.64	10.47	0.00
Penetration (mm/10)	−1.53	0.17	−0.53	−8.63	0.00
IRC					
(Constant)	466.57	20.31		22.96	0.00
Density (g/cm^3)	−119.69	6.59	−0.73	−18.14	0.00
% $Ca(OH)_2$	0.40	0.03	0.53	13.31	0.00
Penetration (mm/10)	−1.11	0.14	−031	−7.69	0.00

[a] Coefficient of the model.
[b] Factor indicating the power of the independent variable.
[c] t-Student factor.
[d] Significance level.

3.4. Water sensitivity test

Fig. 5 shows that for the AC16S mixture, the minimum values required by the standards were not reached, corresponding to 85% of retained strength, with the exception of the mixture made with a percentage close to 50% $Ca(OH)_2$. However, when a siliceous nature aggregate was used, the TSR index rate increased fulfilled the condition required by the standard for values close to 25% $Ca(OH)_2$ of the total filler.

For the discontinuous BBTM mixture as modified bitumen has been used, the TSR index increased significantly. In this case, using an ophitic aggregate with modified bitumen, it was possi-

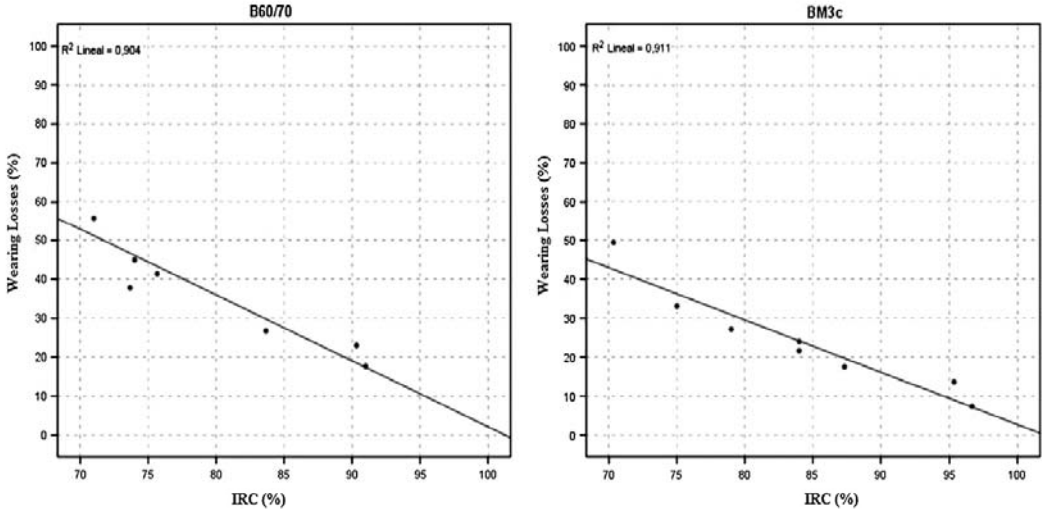


Fig. 8. Correlation between water sensitivity and immersion–compression test for each bitumen.

Table 8
Correlations between water sensitivity and immersion–compression test.

	% ITSR	% IRC
% ITSR[a]		
Pearson correlation	1	.861
Sig. (bilateral)		.000
Sum of squares	784.939	858.163
Covariance	52.329	57.211
N	16	16
% IRC[b]		
Pearson correlation	.861	1
Sig. (bilateral)	.000	
Sum of squares	858.163	1265.540
Covariance	57.211	84.369
N	16	16

[a] Index tensile strength resistance.
[b] Immersion–compression resistance.

ble to make the mixture with the minimum quantity of 25% $Ca(OH)_2$ as according to the standard it would fulfill the required values.

Moreover, using siliceous aggregate, it is enough to use 20% of filler $Ca(OH)_2$, as the tensile strength increased up to the limits required by the standard (Fig. 6).

3.5. Immersion–compression test

Fig. 7 shows that for mixtures made with B60/70 bitumen and ophitic aggregate, the specifications of the standards were only fulfilled using a percentage of $Ca(OH)_2$ between 40% and 50%. In contrast, using aggregate with high silica content, it would be sufficient to use a percentage of filler over to 20% of $Ca(OH)_2$.

The retained strength was increased by using modified bitumen, as is shown in Fig. 3. When making this bitumen mixture with aggregate 1, strength of 75% was reached only in the case of a mixture with 50% of calcium hydroxide. In contrast, using a different nature aggregate, it was enough to use 20% of calcium hydroxide to reach 80% of strength, as it was a discontinuous mixture.

4. Comparison of results

4.1. General linear model

Before studying the general models of the losses by the wet Cantabrian, the necessary water sensitivity and immersion–compression tests were performed to measure the normal distribution and homoscedasticity of the samples.

The normality test, "Shapiro–Wilk" test was taken as a reference, in which the significance of all samples was greater than 0.05.

On the other hand, to check the homogeneity of variance a Levene test was performed, which confirms that all the samples fulfilled the standard, its significance being greater than 0.05.

Table 5 shows the summary of each model in which the correlation coefficients 0.936, 0.833 and 0.928 are noted.

Table 6 shows the relationship between the independent variable (aggregate, bitumen and filler) and the dependent variable (% losses, % ITSR and % IRC). In this case the critical level of significance is less than 0.05 which implies that both variables (independent–dependent) are linearly related.

Table 7 shows the coefficients of the regression line for each test and their significance level.

As explained above, the regression models for each test were:

$$\text{Forecast \% Losses} = 203.311d - 0.572f + 2.780b - 682.562$$

$$\text{Forecast \% ITSR} = -47.727d + 0.390f - 1.533b + 298.340$$

$$\text{Forecast \% IRC} = -119.697d + 0.405f - 1.117b + 466.572$$

where d is the aggregate density (g/cm^3); b the Bitumen penetration (mm/10) and f is the % $Ca(OH)_2$.

From the calculated forecast some ranges are established that enabled the mixture behavior to be known depending on the quantities of bitumen, filler and aggregate used. The wet Cantabrian test established that the minimum proportion of calcium hydroxide (20%) and the maximum of calcium carbonate (80%) produced the greatest losses, reaching 70% for samples with 60/70 bitumen. However, using the maximum of hydroxide and calcium carbonate (50–50%) with siliceous aggregate and modified bitumen, these

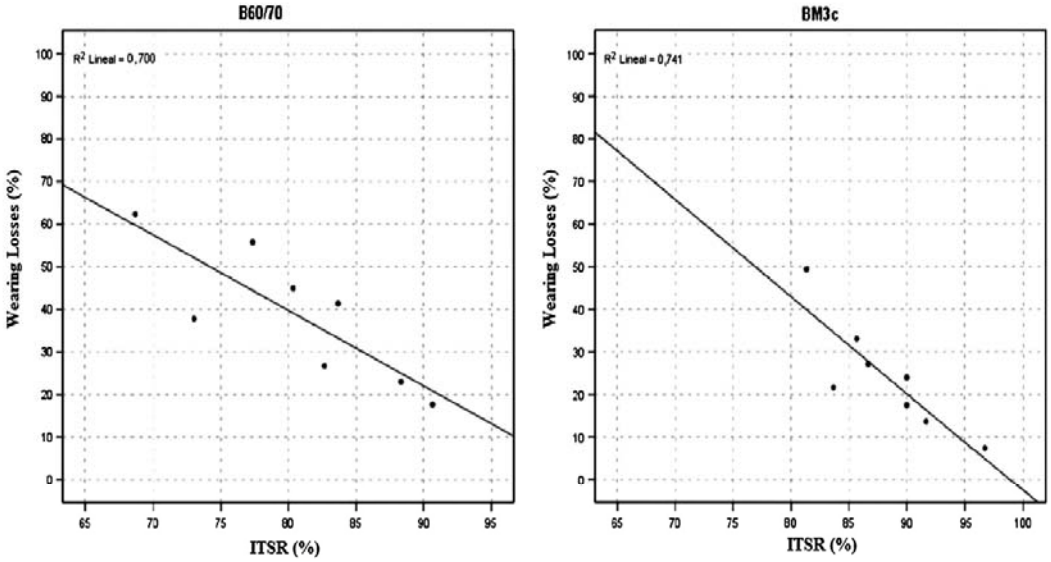


Fig. 9. Correlation between water sensitivity and wear losses by wet Cantabrian test.

losses decreased to values of 4%, so successfully fulfilling the standard specifications. In the water sensitivity test with indirect tensile breakage, using 20% Ca(OH)2 and 80% of $CaCO_3$, the required values were not reached in any of the cases. However, analyzing the retained strength for the same percentage of hydroxide and calcium carbonate (50–50), it was noted that only B60/70 bitumen and ophitic aggregate did not reach 85% of ITSR.

When analyzing the retained strength in the immersion–compression test, only the BM-3c bitumen mixture and siliceous aggregate fulfill the 75% specified in the standard when using 20% Ca(OH)2 and 80% $CaCO_3$. However, using the maximum percentage of calcium carbonate hydroxide and studied (50–50%), all samples gave results over the limit of 75% of IRC, reaching an average of 95% of retained strength.

4.2. Relation between tests

The procedure of correlation among the results obtained in laboratory is studied in order to quantify the degree of similarity among the tests.

Table 9
Correlations between water sensitivity and wet Cantabrian test.

	% ITSR	% IRC
% ITSR[a]		
Pearson correlation	1	−.878
Sig. (bilateral)		.000
Sum of squares	784.939	−1504.916
Covariance	52.329	−100.328
N	16	16
% IRC		
Pearson correlation	−.878	1
Sig. (bilateral)	.000	
Sum of squares	−1504.916	3741.566
Covariance	−100.328	249.438
N	16	16

[a] Index tensile strength resistance.

4.2.1. Water sensitivity – Immersion compression

Fig. 8 shows the correlation between the results of water sensitivity and immersion–compression tests for the AC16S and BBTM 11B mixtures.

The correlation coefficients obtained were 0.799 and 0.890 respectively, which means that the similarity of the two variables is relatively high. Also, according to the regression lines, for a minimum of 75% of retained strength of the immersion–compression test, the retained indirect tensile strength corresponds to about 80%.

Table 8 shows the critical levels for each test and it can be said that the variables, IRC and ITSR, have a significant correlation as the critical level was lower than 0.05.

Nowadays, the water sensitivity test is replacing the immersion–compression test, establishing mandatory limits specified in the standards for bituminous mixtures.

4.2.2. Water sensitivity – Cantabrian wear test after immersion

Fig. 9 shows the correlation between the results for water sensitivity and wear losses by the wet Cantabrian test, for mixtures made with B60/70 and BM3c bitumen. (See Table 9).

The existing correlation is relatively high, the coefficient being 0.700 and 0.741 respectively, although in comparison with the immersion–compression test, the losses vary over a wider range.

According to the standards, it was known that the maximum values for these mixtures in the Cantabrian test were 25% and 35%, so the limits of tensile strength correspond to approximate values of 88% and 85%.

Table 9 shows the critical levels of correlation between the two variables and it can be said that there is significant correlation, as the critical level was less than 0.05.

The Pearson correlation is an index that measures the linear relationship between two random variables is quantitative and independent of the scale of measurement of variables. The correlation between variables and sensitivity to water immersion–compression is positive since the 0.861 index is close to 1, which there is a direct relationship between the two tests.

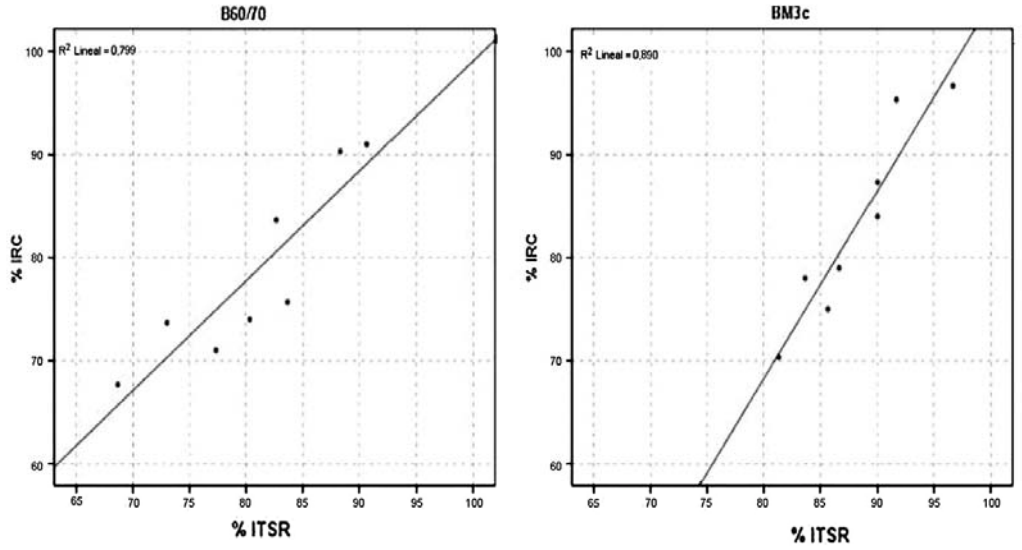


Fig. 10. Correlation between immersion–compression and wet Cantabrian test.

Table 10
Correlations between immersion–compression and wet Cantabrian test.

	% Losses	% IRC
% ITSR		
Pearson correlation	1	−.940
Sig. (bilateral)		.000
Sum of squares	3741.566	−2044.664
Covariance	249.438	−136.311
N	16	16
% IRC[a]		
Pearson correlation	−.940	1
Sig. (bilateral)	.000	
Sum of squares	−2044.664	1265.540
Covariance	−136.311	84.369
N	16	16

[a] Immersion–compression resistance.

4.2.3. Immersion–compression – Wear by wet Cantabrian test

Fig. 10 shows the correlation between losses produced in the wet Cantabrian test and in the immersion–compression test. The correlation coefficients between the two variables were high, reaching values of 0.904 and 0.911 for mixtures, BBTM AC16S and B11, respectively.

Following the guidelines set by the standards, the value of loss should be between 25% and 35% depending on the mixture, corresponding to values of about 85% and 80% of retained strength respectively.

Table 10 shows the significance levels between the two variables and the correlation is significant, as the critical level is less than 0.05.

However, in this case the Pearson correlation coefficient is −0.940, which indicates that it is next to −1, indicating that the relationship between the losses and immersion compression test is completely reversed.

5. Conclusions

The experimental results show that the losses produced in the wet Cantabrian test are slightly higher when using low contents of calcium hydroxide and penetration bitumen B60/70. However, using the modified bitumen and a proportion of $Ca(OH)_2$ to $CaCO_3$ close to 50–50%, losses produced in the bituminous mixtures were less than 10%.

Based on the regression curves and the characteristics of the mixture, it was shown that for mixture AC16S the retained strength complied for a minimum of 75%, the ideal mix being made with a high percentage of calcium hydroxide (between 40% and 50%), an ophitic aggregate and B60/70 bitumen.

However, for the BBTM mixture, using modified bitumen increased the resistance of the mixture, so that, using an ophitic or siliceous aggregate with a percentage of calcium hydroxide greater than 25%, it would fulfill the minimum values required by the standard. For the tensile strength calculated for the water sensitivity test, the minimum value of the semi-dense mixture is at 85%, so bitumen 60/70 could be used, with a siliceous aggregate and a percentage of calcium hydroxide of 25%. In the case of the BBTM mixture, the minimum required by the standard would increase to 90% because it is a discontinuous mixture, and it would be desirable to use a higher percentage than 25% of calcium hydroxide.

There is evidence of a significant relationship between the resistance obtained by the immersion compression test and water sensitivity and the loss values obtained using the wet Cantabrian test, even with samples compacted differently in the two tests.

References

[1] Airey GD, Collop AC, Zoorob SE, Elliott RC. The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. Constr Build Mater 2008;22(9):2015–24.
[2] Terrel RL, Shute JW. Summary report on water sensitivity. SHRP/A/IR-89-003. Strategic highway research program. National Research Council; 1989.
[3] Jimenez FEP, Perez MAC. Analysis and evaluation of the performance of porous asphalt. The Spanish experience. ASTM Spec Tech Publ 1990:512.
[4] Gonzalez A, Cubrinovski M, Pidwerbesky B, Alabaster D. Strength and deformational characteristics of foamed bitumen mixes under suboptimal conditions. J Trans Eng 2011;137:1–10.
[5] Bianchetto H, Lisandro D, López M. Primera experiencia sobre utilización del caucho de neumáticos por vía seca en pavimentación urbana. Asociación argentina de carreteras 2002;168:1–15.
[6] Tapkin S. Mechanical evaluation of asphalt–aggregate mixtures prepared with fly ash as a filler replacement. Can J Civ Eng 2008;35(1):27–40.

[7] Hamzah MO, Hasan MRM, Che Wan CN, Abdullah NH. A comparative study on performance of Malaysian porous asphalt mixes incorporating conventional and modified binders. J Appl Sci 2010;10(20):2403–10.
[8] Aragão FTS, Lee J, Kim Y, Karki P. Material-specific effects of hydrated lime on the properties and performance behaviour of asphalt mixtures and asphaltic pavements. Constr Build Mater 2010;24(4):538–44.
[9] EN 933-1. Spanish association for standardization and certification. Test for geometrical properties of aggregates. Part 1: determination of particle size distribution. Sieving method; 1998.
[10] EN 104281-2. Spanish association for standardization and certification. Bituminous and bituminous modified materials. Bituminous raw materials and mastics. Testing methods. Determination of relative density; 1986.
[11] Highways agency. General technical requirements specification for road and bridge works (PG-3). Article 542: hot mix asphalt concrete or bituminous. Ministry of development. Spain; 2008.
[12] EN 13108-1. Spanish association for standardization and certification. Bituminous mixtures – material specifications – Part 1: asphalt concrete; 2008.
[13] EN 13108-2. Spanish association for standardization and certification. Bituminous mixtures – material specifications – Part 2: asphalt concrete for very thin layers; 2007.
[14] EN 1097-4. Spanish association for standardization and certification. Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 4: determination of the voids of dry compacted filler; 1999.
[15] EN 12697-30. Spanish association for standardization and certification. Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – Part 30: specimen preparation by impact compactor; 2006.
[16] Çolak A. Effects of chrome oxide and limestone filler on the wear characteristics of paste and concretes made with white Portland cement. Constr Build Mater 2008;22(11):2276–80.
[17] EN 12697-12. Spanish Association for standardization and certification. Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – Part 12: determination of the water sensitivity of bituminous specimens; 2009.
[18] Partl MN, Pasquini E, Canestrari F, Virgili A. Analysis of water and thermal sensitivity of open graded asphalt rubber mixtures. Constr Build Mater 2010;24(3):283–91.

IV.3A EXTENDED PUBLICATION

EFECTO DEL AGUA EN MEZCLAS BITUMINOSAS CON HIDRÓXIDO Y CARBONATO CÁLCICO COMO FILLER DE APORTACIÓN

D. Movilla-Quesada[1*]; Á.Vega-Zamanillo[2]; D. Castro-Fresno[3]; M.A. Calzada-Pérez[4]

Corresponding author: [1] Researcher Diana Movilla-Quesada, School of Engineering, University of Cantabria, Santander, 39005, Spain (Tel.: +34 942 203943; Fax: +34 942 201703; email: diana.movilla@unican.es)

[2] Prof. Dr. Angel Vega-Zamanillo, School of Engineering, University of Cantabria, Santander, 39005, Spain (Tel.: +34 942 203943; Fax: +34 942 201703; email: angel.vega@unican.es)

[3] Prof. Dr. Daniel Castro-Fresno, School of Engineering, University of Cantabria, Santander, 39005, Spain (Tel.: +34 942 203943; Fax: +34 942 201703; email: daniel.castro@unican.es)

[4] Prof. Dr. Miguel Ángel Calzada-Pérez, School of Engineering, University of Cantabria, Santander, 39005, Spain (Tel.: +34 942 203943; Fax: +34 942 201703; email: calzadam@unican.es)

ABSTRACT

La presente investigación demuestra que la utilización de hidróxido y carbonato cálcico como filler de aportación en cantidades adecuadas puede mejorar el comportamiento de las mezclas frente a la acción del agua. Para ello se ha realizado un estudio basado en el ensayo cántabro de pérdida por desgaste en vía húmeda, sensibilidad al agua con rotura a tracción indirecta e inmersión- compresión. Las mezclas bituminosas se han fabricado con dos tipos de árido de naturaleza distinta, cuatro porcentajes de hidróxido y carbonato cálcico como filler, y dos betunes de penetración B60/70 y BM-3c en cantidades de 4,8 y 5,2 % sobre mezcla respectivamente.

Los resultados demuestran que la aportación del hidróxido y carbonato cálcico como filler en la mezcla aumenta su resistencia conservada hasta en un 40 % llegando a cumplir las especificaciones para su puesta en obra. Además, se demuestra que esta aportación de filler mejora la adherencia del betún y el árido frente a la acción del agua en un 45 %.

Por otro lado, se ha realizado un modelo lineal para cada ensayo basado en el tipo de árido, betún y filler de la mezcla.

Palabras clave*:* Mezcla bituminosa, desgaste al cántabro húmedo, sensibilidad al agua, ensayo de inmersión-compresión, agua, filler.

INTRODUCCIÓN

Los elementos como el agua o la temperatura pueden producir efectos negativos en la durabilidad de las mezclas bituminosas. Un clima húmedo acompañado de la utilización de materiales inadecuados puede ser la causa principal del deterioro íntegro de un pavimento. El agua produce tres reacciones importantes en el deterioro del pavimento bituminoso: la pérdida de resistencia al desgaste, la minimización en la rigidez del ligante y la pérdida de adhesión entre el árido y el betún (Airey *et al*., 2008).

El desarrollo de las pruebas para determinar la resistencia a tracción indirecta por sensibilidad al agua comenzó en la década de los años 30 con fílleres de naturaleza caliza. Desde entonces los estudios realizados sobre el efecto producido por el agua en el comportamiento de las mezclas han sido numerosos (Terrel & Shutte, 1989).

En 1990 el Grupo de Caminos de la Universidad de Cantabria realizó una serie de estudios basados en el ensayo cántabro húmedo que analizaban la resistencia a la desintegración de la mezcla bituminosa. Este ensayo permitió estudiar otro tipo de parámetros como adhesión, textura o ruido de la capa de rodadura en comparación con otros materiales utilizados en el revestimiento de carreteras (Jiménez & Pérez, 1990).

Más tarde, la Universidad de Canterbury realizó una serie de análisis basándose en el ensayo de sensibilidad al agua con un material granular procedente de Nueva Zelanda que contenía cemento como filler. Los resultados demostraron un incremento en la resistencia a medida que se llegaba al porcentaje óptimo de betún y de filler (González *et al*., 2011).

En el año 2002 se realizó la primera prueba experimental del uso del caucho de neumáticos reciclados como filler en pavimentación urbana. El tramo fue realizado por CEAMSE y Autopistas Urbanas en Buenos Aires y para ello se utilizó el ensayo de

inmersión-compresión como medio para la estimación del tiempo de curado y dotación del caucho a utilizar en la mezcla (Bianchetto *et al*., 2002).

En 2008 la Universidad turca de Anadolu presentó un estudio sobre el comportamiento de la mezcla de cenizas volantes, cemento portland y cal utilizada como filler frente a la acción del agua. Las mezclas bituminosas fabricadas con estos materiales de aportación presentaban mayores resistencias que las fabricadas con otros tipos de filler (Tapkin, 2008).

En el año 2010 el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Malasia utilizó el ensayo cántabro para estudiar el comportamiento de dos mezclas con distintos tipos de betún y cal como filler. Los resultados mostraron que el uso de betún modificado y la cal incrementa la resistencia de forma significativa llegando a un desgaste mínimo de la mezcla bituminosa (Hamzah *et al*., 2010).

Mediante este estudio se pretende analizar el comportamiento de la mezcla hidróxido y carbonato cálcico como filler con diferentes tipos y cantidades de betún frente a la acción del agua con el fin de comprobar si la sustitución total del filler por estos materiales mejora su adhesividad y envuelta (Aragão *et al.* 2010).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se han realizado diferentes ensayos en el Laboratorio de Caminos y Aeropuertos de la Universidad de Cantabria para el estudio del comportamiento de mezclas fabricadas con árido ofítico y calizo, betunes B60/70 y BM3c y cuatro mezclas con distintos porcentajes de hidróxido cálcico y carbonato cálcico.

Los porcentajes de filler utilizados combinando Ca $(OH)_2$ y $CaCO_3$ han sido: 20- 80; 25-75; 40-60; 50-50 respectivamente.

Antes de realizar los ensayos de sensibilidad, inmersión y desgaste se hicieron una serie de pruebas de caracterización del filler, ya que era importante conocer sus características por separado para poder realizar un buen estudio de la mezcla final. Para ello se llevaron a cabo los ensayos de porcentaje de huecos del filler compactado en seco según la norma vigente y las densidades reales mediante las cuales pudo calcularse la concentración crítica de cada porcentaje.

2.1. Caracterización del filler

2.1.1. Densidad, concentración crítica y huecos del filler

El filler se compacta utilizando un aparato de compactación normalizado correspondiente a la norma [9]. El volumen del filler compactado se determina a partir de la altura de la capa de filler compactada y de la densidad real del filler.

La densidad aparente del filler en tolueno viene determinada según la norma UNE-EN 10428-2 (1986) y debe estar comprendida en un rango entre 0.5 y 0.8 g/cm^3.

2.1.2. Concentración crítica del filler

La concentración crítica de filler (C_c) se determina acorde a la norma argentina IRAM 1542. La expresión utilizada es la siguiente:

$$Cv = \frac{P}{V \cdot \rho}$$

Donde:

P: Masa del filler (gramos)

V: Volumen del sedimento (cm^3)

P: Densidad del filler compactado en seco (g/cm^3)

2.2. Mezclas bituminosas

Los áridos empleados en este estudio proceden del machaqueo de grava natural utilizados en las comunidades del País Vasco y Castilla y León (España). Se han utilizado cómo árido el denominado como árido 1 de naturaleza ofítica y otro denominado árido 2 de naturaleza silícea.

Los betunes que han sido utilizados son B60/70 y un betún asfáltico modificado con polímeros de tipo BM-3c. La dotación de ambos ligantes son de 4,8 % para el betún de penetración 60/70 y 5,2 % para el betún modificado BM-3c sobre mezcla (Tabla 1).

Tabla 1. Características de los betunes

Características	Unidad	Método	Resultado	
			B 60/70	BM-3c
Penetración (25 ºC)	mm/10	EN 104281-5	65	60
P. Reblandecimiento	º C	EN 104281-3	49.9	69
Densidad Relativa	g/cm^3	EN 104281-2	1,033	1,035
P. Fragilidad Fraas	º C	NLT 182	-16	-8

2.2.1. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico es realizado combinando las distintas fracciones de los áridos incluyendo el filler. La granulometría debe estar comprendida dentro de los husos fijados por el PG-3 (2007).

Se han fabricado distintas series de mezclas bituminosas con los materiales citados anteriormente utilizando composiciones que se ajustan a los husos de mezclas de tipo semidenso AC16S acorde a la norma UNE-EN 13108 (2008), y tipo discontinuo BBTM 11B acorde a la norma UNE-EN 13108-2 (2007).

2.2.2. Contenido de huecos

La determinación del contenido de huecos UNE-EN 1097-4 (1999) en mezclas AC16S se hará sobre probetas compactadas por Marshall según la norma UNE-EN 12697-30 (2006) aplicando 75 golpes por cara, mientras que las probetas de tipo BBTM 11B se realizarán aplicando 50 golpes por cara. Los dos tipos de mezclas deben cumplir con un mínimo de huecos para poder ser utilizadas en los ensayos posteriores.

La mezcla bituminosa AC16S tendrá entre un 4 - 6 % de huecos y la mezcla BBTM un porcentaje de huecos mayor al 12 %.

2.3. Ensayo de resistencia al desgaste cántabro tras inmersión

El ensayo al desgaste cántabro en estado húmedo (Figura 1) mide la resistencia al desprendimiento que se produce entre el árido y el ligante por efecto del agua. El procedimiento consiste en sumergir las probetas en un baño a 60 ºC durante 24 horas para posteriormente someterlas al ensayo cántabro (Çolac, 2008).

Figura 1. Máquina del ensayo cántabro

2.4. Ensayo de sensibilidad al agua

El ensayo de sensibilidad al agua se lleva a cabo acorde con la norma UNE-EN 12697-2 (2009). Mediante este ensayo se determina la pérdida de cohesión que se produce por el efecto del agua en la saturación de las mezclas bituminosas.

El procedimiento de compactación se realiza mediante el método Marshall a 75 golpes y utilizando tracción indirecta como tipo de rotura (Partl *et al*., 2010).

2.5. Ensayo de inmersión-compresión

El ensayo de inmersión - compresión (Figura 2) coincide con el procedimiento de sensibilidad al agua, aunque difiere en algunos aspectos. Las probetas fabricadas son cilíndricas de 101,6 de altura x 101,6 mm. de diámetro y el método de compactación utilizado es por prensa de doble émbolo. Una vez que son compactadas se dejan reposar durante 24 horas para posteriormente ser sumergidas en un baño a 60 ºC durante un periodo de 24 horas. Posteriormente se procede a su rotura por compresión simple (Aragão *et al*., 2010).

Figura 2. Máquina de ensayo inmersión-compresión

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización del filler

3.2.1. Densidad, concentración crítica y porosidad del filler

La cantidad y distribución de los poros son factores que influyen directamente sobre parámetros como la densidad aparente o la permeabilidad del propio filler. La Tabla 2 muestra la densidad aparente, concentración crítica y porosidad de cada porcentaje de filler utilizado.

El peso específico de hidróxido cálcico es mayor cuanta más cantidad es añadida a la mezcla, lo cual implica un incremento de la porosidad y por ello de su volumen aparente.

Tabla 2. Características del filler utilizado

% Filler	Densidad (g/cm^3)	C. Crítica	Porosidad
20-80	2,80	0,24	45,43
25-75	2,85	0,20	48,90
40-60	2,87	0,19	55,23
50-50	2,89	0,18	57,10

3.2. Mezclas bituminosas

3.2.1. Análisis granulométrico

La granulometría utilizada para cada tipo de mezcla es fija, diferenciándose tan solo en el porcentaje de filler. La tabla 3 muestra la granulometría realizada para los dos tipos de mezclas según normativa española.

Tabla 3. Análisis granulométrico de las mezclas AC16S y BBTM 11B

Tamiz		22,4	16	11,2	8	4	2	0,5	0,25	0,063
% Pasa	AC16S	100	98	---	64	43	30	12	9	5,5
	BBTM		100	96	69	27	18	9	---	7

3.2.2. Contenido en huecos

La Tabla 4 muestra el contenido de huecos que presentan las mezclas bituminosas utilizadas en este estudio.

Tabla 4. Contenido de huecos de las mezclas bituminosas

	AC16S (B60/70)		BBTM (BM-3c)	
% Filler	**Árido 1**	**Árido 2**	**Árido 1**	**Árido 2**
20-80	5,90	5,95	13,38	22,39
25-75	5,66	4,91	13,53	20,95
40-60	5,60	4,83	13,10	19,62
50-50	4,68	4,77	12,67	17,30

3.3. Ensayo de pérdidas por desgaste tras inmersión

La Figura 3 muestra el desprendimiento que presenta el árido y el ligante comparando las pérdidas por desgaste cántabro tras inmersión en agua. Las mayores pérdidas se presentan para el betún de penetración 60/70 y el árido 1 con unas pérdidas entre el 40 % y el 70 %, mientras que para el árido 2, si la cantidad de hidróxido supera el 25 % y el carbonato cálcico es inferior al 75 %, la mezcla cumplirá el valor mínimo de pérdidas exigidas por la normativa española.

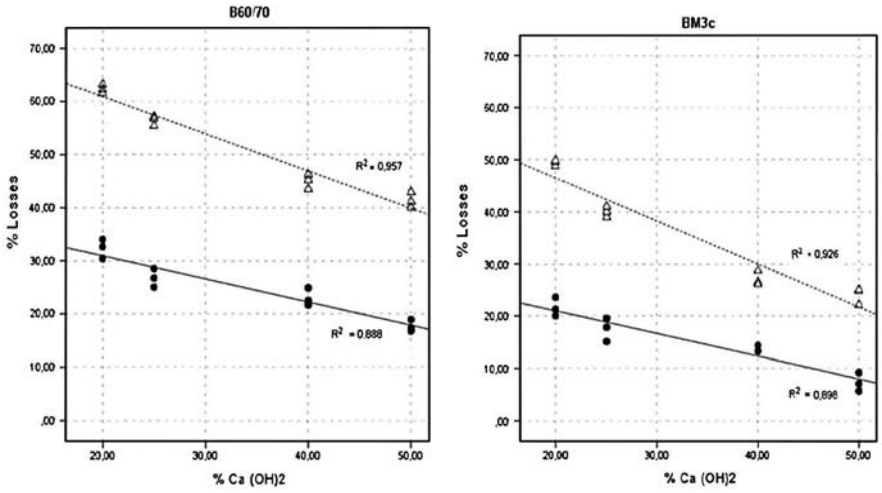


Figura 3. Pérdidas por desgaste al cántabro tras inmersión

La gráfica muestra que al tratar la mezcla con betún modificado, las pérdidas que se producen con el árido 1 cumplen la normativa, siempre y cuando el porcentaje de hidróxido sea mayor del 35 %.

Por otro lado, podría utilizarse la mínima cantidad de filler con el árido 2 ya que cumple los requisitos exigidos por la normativa vigente (Figura 4).

Figura 4. Comparación entre muestra ensayada al cántabro y muestra original

3.4. Ensayo de sensibilidad al agua

La Figura 5 muestra que para la mezcla AC16S no se alcanzan los valores mínimos exigidos por la normativa, correspondientes al 85 % de resistencia conservada, a excepción de la mezcla realizada con un porcentaje próximo al 50 % de Ca $(OH)_2$. Sin embargo, cuando se utiliza un árido de naturaleza silícea el índice TSR aumenta cumpliéndose la condición exigida por la norma para valores próximos al 25 % de Ca $(OH)_2$ del filler total.

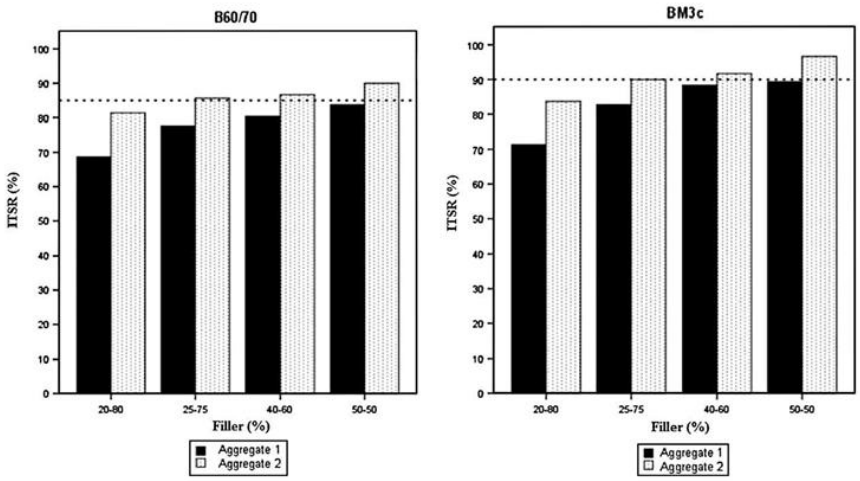


Figura 5. Resultados de los ensayos de sensibilidad al agua

Para la mezcla discontinua BBTM al haber utilizado un betún modificado, los índices TSR aumentan significativamente. En este caso al utilizar un árido de naturaleza ofítica con el betún modificado sería posible fabricar la mezcla con un mínimo del 25 % de Ca $(OH)_2$, ya que según la norma cumpliría los valores exigidos.

Por otro lado, al utilizar árido de naturaleza silícea bastaría con usar un 20 % de filler Ca $(OH)_2$, ya que la resistencia a tracción indirecta aumenta hasta los límites exigidos en la normativa (Figura 6).

Figura 6. Muestras sometidas al ensayo de sensibilidad al agua

3.5. Ensayo de inmersión compresión

La Figura 7 muestra que para mezclas fabricadas con betún de penetración 60/70 y árido ofítico, tan sólo se cumplirían las especificaciones utilizando un porcentaje de Ca $(OH)_2$ entre 40 y 50 %. En cambio, utilizando árido de alto contenido en sílice bastaría con utilizar un % de filler superior al 20 % de Ca $(OH)_2$.

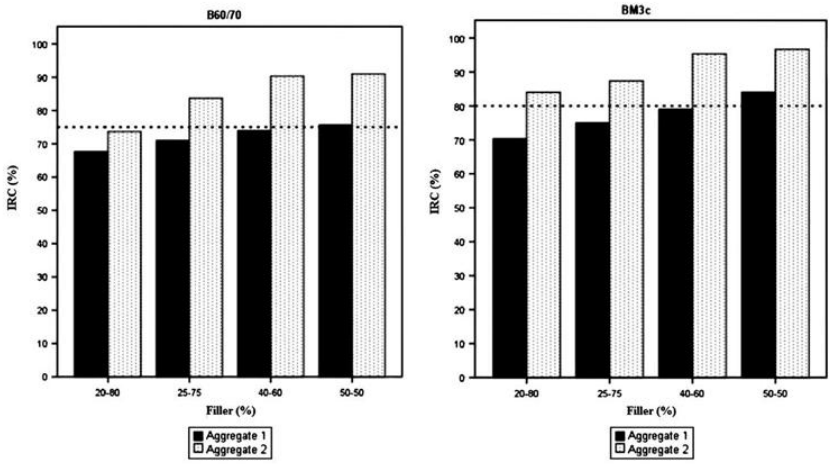


Figura 7. Resultados del ensayo inmersión-compresión.

La resistencia conservada aumenta si se utiliza betún modificado, como puede observarse en la gráfica anterior. Al realizar la mezcla de este betún con el árido 1 se alcanza una resistencia del 75 % tan sólo para la mezcla que tiene un 50 % de hidróxido. En cambio, al utilizar un árido de naturaleza diferente bastaría con utilizar un 20 % de hidróxido cálcico para cumplir con un 80 % de resistencia, ya que se trata de una mezcla discontinua.

4. CONTRASTE DE RESULTADOS

4.1. Modelo lineal general

Antes de estudiar los modelos generales de las pérdidas por vía húmeda, sensibilidad e inmersión - compresión se han realizado los análisis necesarios para el cumplimiento de la distribución normal y homocedasticidad de las muestras.

Para la prueba de normalidad se ha tomado como referencia la prueba de "Shapiro-Wilk" en la que la significancia de todas las muestras ha sido mayor de 0,05.

Por otro lado, para verificar la homogeneidad de varianzas se ha realizado la prueba de "Levene" mediante la cual se confirma el cumplimiento de todas las muestras siendo su significancia mayor de 0,05.

La Tabla 5 muestra el resumen de cada modelo en la cual se observan los coeficientes de correlación 0,936; 0,833 y 0,928.

Tabla 5. Coeficientes de correlación de los distintos ensayos

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
Pérdidas	0,968	0,936	0,932	4,040
ITSR	0,913	0,833	0,821	3,081
IRC	0,963	0,928	0,923	2,514

La Tabla 6 muestra la relación existente entre la variable independiente (árido, betún y filler) con la variable dependiente (pérdidas, ITSR e IRC). En este caso el nivel crítico de significación es menor a 0.05 lo cual implica, que ambas variables (independiente-dependiente) están linealmente relacionadas.

Tabla 6. Relaciones existentes entre las distintas variables y su nivel de significación

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Pérdidas	Regresión	10552,98	3	3517,66	215,26	,000
	Residual	719,03	44	16,34		
	Total	11272,01	47			
ITSR	Regresión	2074,75	3	691,584	73,06	,000
	Residual	416,50	44	9,466		
	Total	2491,25	47			
IRC	Regresión	3574,60	3	1191,532	188,54	,000
	Residual	278,07	44	6,320		
	Total	3852,67	47			

La Tabla 7 muestra los coeficientes de la recta de regresión en la parte de coeficientes no estandarizados.

Tabla 7. Coeficientes de las rectas de regresión para cada ensayo.

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados		
		B	Error típ.	Beta	t	Sig.
Pérdidas	(Constante)	-682,562	32,674		-20,890	,000
	Densidad (g/cm^3)	203,311	10,609	0,730	19,164	,000
	% $Ca(OH)_2$	-0,572	0,049	-0,445	-11,690	,000
	Penetración (mm/10)	2,780	0,233	0,453	11,910	,000
ITSR	(Constante)	298,340	24,868		11,997	,000
	Densidad (g/cm^3)	-47,727	8,074	-0,364	-5,911	,000
	% $Ca(OH)_2$	0,390	0,037	0,646	10,475	,000
	Penetración (mm/10)	-1,533	0,178	-0,532	-8,632	,000
IRC	(Constante)	466,572	20,319		22,962	,000
	Densidad (g/cm^3)	-119,697	6,597	-0,735	-18,143	,000
	% $Ca(OH)_2$	0,405	0,030	0,539	13,314	,000
	Penetración (mm/10)	-1,117	0,145	-0,312	-7,694	,000

Según todo lo anterior, el modelo de regresión será:

Pronóstico % Pérdidas = 203.311 d – 0,572 f +2,780 b – 682.562

Pronóstico % ITSR = -47.727 d +0,390 f -1,533 b + 298.340

Pronóstico % IRC = -119.697 d +0,405 f – 1,117 b + 466.572

Donde:

d = densidad del árido (g/cm^3)

b = penetración del betún (mm/10)

f = % hidróxido cálcico ($Ca(OH)_2$)

A partir de los pronósticos calculados se establecen unos rangos que permiten conocer el comportamiento de la mezcla según las cantidades de betún, filler y árido utilizados. En el ensayo cántabro por vía húmeda se establece que utilizando el mínimo estudiado de hidróxido cálcico (20 %) y un máximo de carbonato (80 %) las mayores pérdidas producidas alcanzan un 70 % para probetas fabricadas con betún 60/70. Sin embargo, si se utiliza el máximo de hidróxido y carbonato cálcico (50 % - 50 %) con el árido silíceo y el betún modificado, estas perdidas disminuyen hasta valores del 4 %, por lo que cumplirían satisfactoriamente las especificaciones de la norma.

Para el ensayo de sensibilidad al agua con rotura a tracción indirecta, al utilizar un 20 % de Ca $(OH)_2$ y un 80 % de $CaCO_3$, no se alcanzan los valores exigidos en ninguno de los casos. Sin embargo, analizando la resistencia conservada para un mismo porcentaje de hidróxido y carbonato cálcico (50 - 50) se observa que solamente para el betún B60/70 y árido ofítico no cumple con el 85 % de ITSR.

Al analizar la resistencia conservada del ensayo inmersión-compresión, tan solo la mezcla fabricada con betún BM-3c y árido silíceo cumple con la especificación del 75 % especificado en la norma si se utiliza un 20 % de Ca $(OH)_2$ y un 80% de $CaCO_3$. Sin embargo, al utilizar el máximo porcentaje de hidróxido y carbonato cálcico estudiado (50% - 50%), todas las muestras fabricadas sobrepasan el límite del 75 % de IRC, alcanzando una media de 95% de resistencia conservada.

4.2. Relación entre ensayos

El procedimiento de correlación entre los resultados obtenidos en el laboratorio se estudia con el objetivo de cuantificar el grado de relación existente entre los ensayos realizados.

4.2.1. Sensibilidad al agua-inmersión compresión

La Figura 8 muestra la correlación existente entre los resultados obtenidos en el ensayo de sensibilidad al agua e inmersión-compresión para las mezclas AC16S y BBTM 11B.

El coeficiente de correlación obtenido ha sido de 0,799 y 0,890 respectivamente, lo que significa que la relación entre las dos variables es relativamente alta. Además, según las rectas de regresión, para un valor mínimo de 75% de resistencia conservada del ensayo de inmersión-compresión, la resistencia conservada a tracción indirecta corresponde aproximadamente a un 80%.

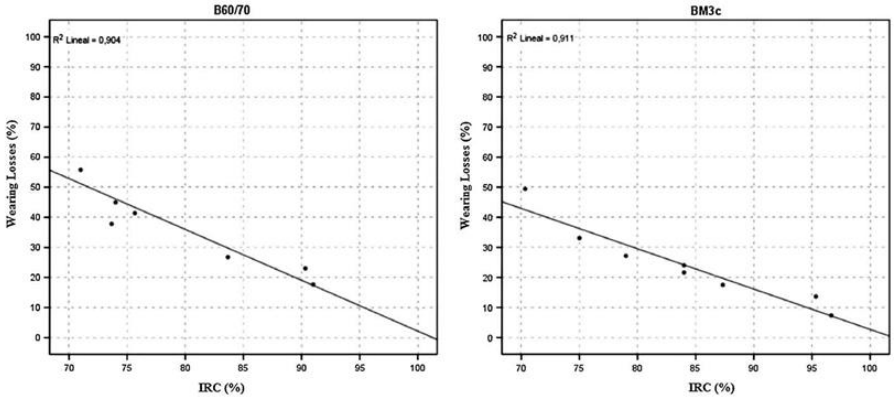


Figura 8. Correlación existente entre sensibilidad al agua e inmersión-compresión para cada tipo de betún.

Observando los niveles críticos de la Tabla 8 de correlaciones puede afirmarse que la variable IRC y ITSR son correlacionan significativamente, ya que su nivel de crítico es inferior a 0,05.

Tabla 8. Correlaciones entre el ensayo de sensibilidad e inmersión.

	% ITSR	**% IRC**
% ITSR[a]		
Correlación de Pearson	1	,861
Sig. (bilateral)		,000
Suma de cuadrados y productos cruzados	784,939	858,163
Covarianza	52,329	57,211
N	16	16
% IRC[b]		
Correlación de Pearson	,861	1
Sig. (bilateral)	,000	
Suma de cuadrados y productos cruzados	858,163	1265,540
Covarianza	57,211	84,369
N	16	16

[a] Index Tensile Strength Resistance
[b] Immersion-compression Resistance

En la actualidad el ensayo de sensibilidad al agua sustituye al ensayo de inmersión-compresión, estableciendo los límites obligatorios especificados en la normativa vigente que deben cumplir las mezclas bituminosas.

4.2.2. Sensibilidad al agua - desgaste al cántabro tras inmersión

La Figura 9 muestra la correlación existente entre los resultados del ensayo de sensibilidad al agua y desgaste al cántabro en húmedo para las mezclas fabricadas con betún B60/70 y BM3c.

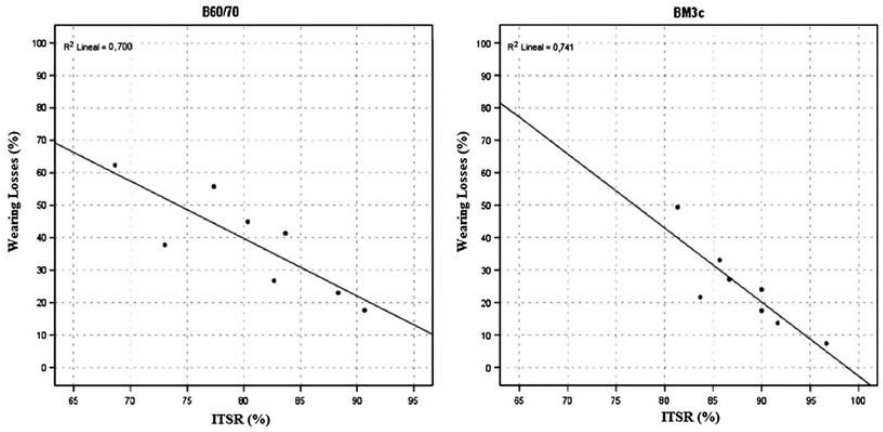


Figura 9. Correlación entre sensibilidad al agua y desgaste al cántabro húmedo.

La correlación existente es relativamente alta presentando un coeficiente de 0,700 y 0,741 respectivamente, aunque en comparación con el ensayo de inmersión, las pérdidas varían en un rango mayor.

Acorde a la normativa vigente, se conoce que los valores máximos para este tipo de mezclas en el ensayo cántabro son de 25 % y 35 %, con lo que los límites de resistencia a tracción indirecta corresponden valores aproximados de 88 % y 85 %.

La Tabla 9 muestra los niveles críticos de correlación entre las dos variables y puede afirmarse que correlacionan significativamente, ya que su nivel de crítico es inferior a 0,05.

Tabla 9. Correlaciones entre el ensayo de sensibilidad y el cántabro húmedo

	% ITSR	**% IRC**
% ITSR[a]	1	-,878
Correlación de Pearson		,000
Sig. (bilateral)	784,939	-1504,916
Suma de cuadrados y productos cruzados	52,329	-100,328
Covarianza	16	16
N		
% IRC		
Correlación de Pearson	-,878	1
Sig. (bilateral)	,000	
Suma de cuadrados y productos cruzados	-1504,916	3741,566
Covarianza	-100,328	249,438
N	16	16

[a] Index Tensile Strength Resistance

4.2.3. Inmersión-compresión – Desgaste al cántabro tras inmersión

La Figura 10 muestra la correlación existente entre las pérdidas producidas en el ensayo cántabro húmedo y en el ensayo de inmersión - compresión. Los coeficientes de correlación entre ambas variables son altos alcanzando valores de 0,904 y 0,911 para las mezclas AC16S y BBTM B11, respectivamente.

Atendiendo a las pautas marcadas en la normativa, el valor de las pérdidas debe estar entre un 25 % y un 35 % dependiendo de la mezcla, lo que corresponde a valores de aproximadamente el 85 % y un 80 % de resistencia conservada respectivamente.

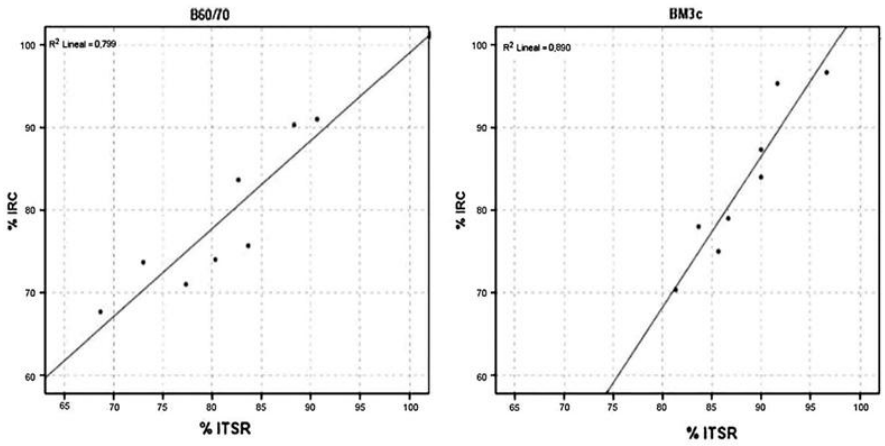


Figura 10. Correlación entre inmersión-compresión y desgaste al cántabro húmedo

La Tabla 10 muestra los niveles de significación entre las dos variables y puede observarse que correlacionan significativamente, ya que su nivel crítico es inferior a 0,05.

Tabla 10. Correlaciones de resultados entre el ensayo de inmersión y el cántabro por vía húmeda

	% Perdidas	**% IRC**
% ITSR	1	-,940
Correlación de Pearson		,000
Sig. (bilateral)	3741,566	-2044,664
Suma de cuadrados y productos cruzados	249,438	-136,311
Covarianza	16	16
N		
% IRC[a]		
Correlación de Pearson	-,940	1
Sig. (bilateral)	,000	
Suma de cuadrados y productos cruzados	-2044,664	1265,540
Covarianza	-136,311	84,369
N	16	16

[a] Inmersion-compresion Resistance

CAPÍTULO V.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

V.1. CONCLUSIONES

La presente tesis por compendio de publicaciones científicas concluye destacando la mejora de la cal y el filler en diferentes características de los suelos, de terraplenes y en el comportamiento cohesivo de las mezclas bituminosas.

Publicación 1: Lime stabilization of bentonite sludge from tunnel boring

El efecto de la cal sobre los lodos bentoníticos es inminente, hasta el punto de cambiar las propiedades de cada material mejorando sus características según el PG-3. Las muestras de naturaleza limosa y arcillosa, que en principio fueron caracterizadas como suelos marginales, pasaron a ser consideradas materiales adecuados mejorando su hinchamiento y resistencia, después de ser tratadas con cal. Por otro lado, las muestras de carácter arenoso que eran clasificadas como materiales adecuados, después del tratamiento se clasificaron como suelos seleccionados, pudiendo incluso ser utilizados en otras zonas superiores del terraplén.

La adición de cal en un porcentaje óptimo (para este caso el 3 %) produce cambios en la plasticidad de los materiales. En cuanto al límite líquido, la variación más significativa es la producida en las arcillas, ya que en comparación con el suelo natural, dicho parámetro llega a aumentar hasta un 40 %. Sin embargo, para las arenas el límite líquido aumenta en un rango de 16 – 19 %. Este aumento en el límite líquido supone a su vez un crecimiento del contenido de humedad, el cual viene determinado por la saturación de agua que contiene la cal apagada; es decir, las moléculas del suelo se mezclan con las moléculas saturadas en agua de la cal apagada lo cual indica que el contenido de agua en el material puede aumentar. En cuanto a la plasticidad, cuando los iones de la cal se mezclan con el material se producen cambios físico-químicos, como la formación de

silicatos de calcio en las muestras limosas y arcillosas, lo que conlleva a una mejora en la plasticidad, produciéndose un fenómeno cementante.

El estudio realizado sobre las muestras sin cal reflejó valores de CBR bajos para las muestras limosas y arcillosas, clasificándolas como suelos marginales y más elevados para las muestras arenosas, llegando incluso a clasificar una muestra como suelo adecuado (CBR>5). Una vez que los suelos fueron tratados con el porcentaje de cal óptimo se observó un aumento en los índices CBR, que permitió clasificar cada suelo en una categoría superior según el PG-3.

Los valores obtenidos en los ensayos de hinchamiento libre y colapso reflejan la estabilidad volumétrica para cada muestra. Así, para las muestras limosas se obtuvo un hinchamiento del 3,81 %, lo cual indica la imposibilidad de utilizar este material en cualquier tipo de obra, ya que suponía una peligrosidad por la formación de movimientos en las capas estructuradas. No obstante, al tratar dicho material con el 3 % de cal, el hinchamiento disminuyó en un 88 %, obteniendo un suelo con características propias de un suelo adecuado. Los datos de hinchamiento obtenidos para las demás muestras no eran valores significativos, aunque al ser tratados disminuyeron en un 30 % aproximadamente respecto del suelo natural.

Publicación 2: Experimental study of bituminous mastic behavior using different fillers based on the UCL Method

El estudio realizado sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas con diferente contenido de filler ha sido realizado a partir del método Universal de Caracterización de

Ligantes (UCL). Mediante este estudio se han realizado distintos ensayos que han permitido analizar la adhesividad, desgaste y envejecimiento bajo diferentes factores.

El comportamiento del hidróxido cálcico como filler para mezclas de tipo AC16S se ve afectado por la temperatura y el paso del tiempo. Los mejores valores de susceptibilidad térmica y envejecimiento se dan para C_v/C_c próximas a 1 y 1,5, ya que las pérdidas son menores al 50 %. Para concentraciones C_v/C_c mayores las pérdidas aumentan, lo que indica que se produce una sobrefillerización del mástico, lo cual puede resultar peligroso ya que comienza a producirse la rigidización del mástico bituminoso.

Sin embargo, si se analiza la adhesividad, para carreteras ubicadas en lugares secos, el hidróxido puede ser aplicable, pero en otros lugares con cierto nivel de humedad y precipitaciones sería necesario realizar otro tipo de ensayos como sensibilidad al agua, ya que aportaría mayor seguridad en su aplicación.

De otra forma, analizando los distintos fílleres frente al tiempo y las diferentes temperaturas, con una concentración muy próxima de cada uno de ellos, el hidróxido cálcico tiene más durabilidad a mayores temperaturas, lo cual indica que si es utilizado en una proporción idónea podría resultar muy rentable a la hora de ser utilizado en obra.

Publicación 3: Evaluation of water effect on bituminous mastics with different contribution fillers and binders

Los resultados experimentales obtenidos demuestran que las pérdidas producidas en el ensayo cántabro tras inmersión son ligeramente superiores si se usan bajos contenidos de hidróxido cálcico y betún de penetración B60/70. Sin embargo, si se utiliza el betún modificado y un porcentaje de Ca $(OH)_2$ próximo al 50 % y 50 % de $CaCO_3$ las pérdidas que se producen en las mezclas bituminosas son inferiores al 10 %.

En base a las rectas de regresión y las características de cada mezcla, se ha comprobado que para la mezcla de tipo AC16S la resistencia conservada se cumple para un valor mínimo del 75 %, resultando como mezcla idónea la fabricada con porcentajes de hidróxido altos (entre 40 y 50 % del total del filler), un árido de naturaleza ofítico y un betún B60/70.

Sin embargo, para la mezcla BBTM, el uso de un betún modificado aumenta la resistencia de la mezcla, por lo que usando un árido ofítico o silíceo con un porcentaje de hidróxido superior al 25 %, superaría los valores mínimos exigidos por la norma.

Para la resistencia a tracción indirecta calculada en el ensayo de sensibilidad al agua, el valor mínimo de la mezcla semidensa estará ubicado en un 85 %, por lo que podría llegar a utilizarse un betún B60-70, con un árido silíceo y un porcentaje de hidróxido del 25 %. Para el caso de la mezcla BBTM, el límite mínimo exigido por la norma de sensibilidad al agua aumentaría hasta un 90 %, ya que se trata de una mezcla discontinua, por lo que sería conveniente utilizar un porcentaje de hidróxido superior al 25 %.

Se ha comprobado que existe una relación significativa entre las resistencias obtenidas por el ensayo de inmersión compresión y sensibilidad al agua con los valores de pérdidas del ensayo cántabro húmedo, incluso habiendo realizado ambos ensayos sobre mezclas compactadas de forma distinta.

V.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las líneas de investigación sobre el estudio de suelos, materiales y mezclas bituminosas en general, y el efecto del filler y cal sobre los mismos ofrecen múltiples posibilidades de desarrollo. De esa manera, las futuras líneas de investigación relacionadas con suelos, materiales y mezclas bituminosas son muy variadas, pudiéndose agrupar en diferentes campos de la ingeniería civil.

- Se pueden mezclar y ensayar los lodos de perforación con otro tipo de materiales o subproductos industriales, que puedan llegar a mejorar la puesta en obra del material en terraplén.
- Maximizar el uso de materiales que a día de hoy son considerados residuos, para respetar el medioambiente y a la vez intentar no malgastar los recursos naturales que ofrece el entorno, ya que son recursos limitados. Ensayar bajo diferentes agentes externos (lluvia, viento…) el comportamiento del terraplén y/o explanada con el paso del tiempo.
- Estudios de durabilidad de los suelos y fílleres con ensayos de fatiga y comparar con los resultados obtenidos de CBR.
- Con respecto a las mezclas bituminosas, se pueden utilizar otros subproductos industriales, así como obtener leyes de fatiga y módulos con diferentes fílleres.

El campo de suelos, materiales y mezclas bituminosas en el campo de la ingeniería civil es muy amplio y con este trabajo se han querido presentar unas bases que pueden ser aprovechadas para el desarrollo y continuidad de estas técnicas. Mediante la investigación y el trabajo constante será posible el perfeccionamiento de estos ensayos y métodos que con el tiempo servirán sobre todo para mejorar y respetar el medioambiente de las generaciones venideras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS GENERALES

1. Al-Amoudi, O.S.B., Khan, K. & Al-Kahtani, N.S. (2010). "Stabilization of a Saudi calcareous marl soil", *Construction and Building Materials*, April.
2. Al-Rawas, A., Taha, A., Al-Aghbari, R. & Mohamedzein, M. (2006). "Evaluation of the Bearing Capacity of Compacted Desert Sands",*Proceedings of sessions of GeoShanghai,* Shanghai.
3. Al-Yami, A.S., Nasr-El-Din, H.A., Al-Shafei, M. & Bataweel, M.A. (2008). "Impact of water-based drill-in fluids on solids invasion and damage characteristics", *SPE Eastern Regional/AAPG Eastern Section Joint Meeting*, 11-15 October, 2008, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
4. ANCADE 2007, *Manual de estabilización de suelos con cal*, Madrid.
5. Anter 2008, "La estabilizacion de suelos con cal en carreteras y líneas de alta velocidad" , ed. Asociación Nacional Técnica de Estabilización de Suelos y Reciclado de Firmes, , 24 de Abril.
6. Asociación Nacional de Fabricantes de Cal (ANFAC). www.anfac.org.
7. El sector de la cal, 2011. *Asociación Nacional de Fabricantes de cales y derivados de España*: http://www.ancade.com/index.php?s=CONTENIDOS&m=10&e=0&t=&p=1.
8. ASTM D 1883-07e2 (2007). *Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils*. ASTM International. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08. March 2007. Soil and Rock I.
9. ASTM D 422-63 (2007), *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM International. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08. March 2007. Soil and Rock I.

10. ASTM D 6913-04 (2009). *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. ASTM International. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.09. April 2009. Soil and Rock II.

11. ASTM D 2216-05 (2005). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM International. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08. March 2005. Soil and Rock I.

12. Baba-Hamed, S. & Belhadri, M. (2009). "Rheological properties of biopolymers drilling fluids". *Journal of Petroleum Science and Engineering,* Vol. 67 No. 3-4 pp. 84-90.

13. Bell, F. (1996). "Lime stabilization of clay minerals and soils". *Engineering Geology,* Vol. 42 No. 4 pp. 223-237.

14. Bianchetto, H., Lisandro, D. & López, M. (2002). "Primera experiencia sobre utilización del caucho de neumáticos por vía seca en pavimentación urbana", *Asociación argentina de carreteras,* Vol. 168.

15. Bianchetto, H., Miró-Recasens, R. & Pérez-Jiménez, F. 2006, "Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de filleres comerciales. Primera parte: estudios en base al método UCL". *Asociación Española de la Carretera,* Vol. 147 pp. 27.

16. Bianchetto, H.D., Recasens, M., Rodrigo, J., Jiménez, P. & Edmundo, F. (2006). "Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de fílleres comerciales. Primera parte: estudios en base al método UCL". *Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio,* Vol. 147 pp. 27-39.

17. Bleier, R. (1980). "Selecting a drilling fluid". *Journal of Petroleum Technology,* Vol. 42 No. 7 pp. 832-834.

18. Boardman, D.I., Glendinning, S. & Rogers, C.D.F. (2001). "Development of stabilization and solidification in lime-clay mixes". *Geotechnique,* Vol. 51 No. 6 pp. 533-543.

19. Bongers, U. & Stradtmann, J. (1995). "Avances y progresos conseguidos en el uso de refractarios básicos en hornos de cemento y de cal". *Fabricación, investigación y aplicaciones del cemento y del hormigón,* Vol. 66 No. 750 pp. 1215-1222.

20. Botella Gómez, A. (1981). "La industria papelera". *Cuadernos de geografía*, No. 29 pp. 177-194.

21. Briguz y Bru, A. (1738). "Arquitectura, la distribución de los planos de templo y casas y el conocimiento de los materiales". *Escuela de Arquitectura Civil de Valencia*.

22. Buhler, R.L. & Cerato, A.B. (2007). "Stabilization of Oklahoma expansive soils using lime and Class C Fly ash". *ASCE Proceedings of Sessions of Geo-Denver, Problematic Soils and Rocks and In Situ Characterization (GSP 162)*; ISBN: 0-7844-0906-4, ISBN: 0-7844-0897-1 (CD).

23. Burke, C.J. & Veil, J.A. (1995). "Potential Environmental Benefits from Regulatory Consideration of Synthetic Drilling Muds". *Environmental Assessment Division,* Argonne National Laboratory , Illinois, February 1995, ANL/EAD/TM-43.

24. Bustillo-Revuelta, M. (2008). "Los recursos minerales y los materiales de construcción". *Enseñanza de las ciencias de la tierra,* Vol. 16 No. 3 pp. 248-255.

25. Cadenas-Armentia, J.M., Romero-Robles, B. & Ainchil-Lavin, J. (2007). "Innovaciones en los modernos tratamientos in situ o en capas de granulares de firme con empleo de residuos y subproductos como herramientas de gestión

eficiente y sostenible de las infraestructuras viarias". *FCC Construcción*, 26-28 Noviembre 2007.

26. Casagrande, L. & Hirschfeld, R.C. (1960). "First progress report on investigation of stress deformation and strength characteristics of compacted clays". *Harvard Soil Mechanic.,* No. 61, Mayo 1960.
27. Castells, X.E. (2000). "Reciclaje de residuos industriales", *Díaz de Santos S.A.*.
28. Christidis, G.E. & Huff, W.D. (2009). "Geological Aspects and Genesis of Bentonites". *Elements. Mineralogical Society of America,* Vol. 5 No. 2 pp. 93-98.
29. Coloma-Álvarez, G. (2008). La cal: ¡es un reactivo químico!. *Inacal*, Chile.
30. Consoli, N.C., Lopes, L.S. & Heineck, K.S. (2009). "Key Parameters for the Strength Control of Lime Stabilized Soils". *Journal of Materials in Civil Engineering,* Vol. 21 No.210.
31. Cornejo-Álvarez, L. (2000). "La excavación mecánica de túneles en terrenos blandos". *GeoConsult*.
32. Cross, R. (1929). "Method of Improving Oil-Well Drilling Muds", *U.S. Patent Nº 2094036*.
33. Daguerre, L., Miró Recasens, R. & Pérez-Jiménez, F. (2001). "Análisis mediante el método BTD y UCL del efecto del tipo y porcentaje de filler en el comportamiento del mástico asfáltico", *11º Congreso Cila*.
34. Devecseri, G. (2010). "Effect of heating on the physical properties of asphalt aggregates". *Periódica Polytechnica: Civil Engineering,* Vol. 54 No. 1 pp. 53-60.
35. Dirección General de Carreteras (2007). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG-3).*
36. Domingo, A., Olías, I., Torroja, J., Castanedo, F.J. & Oteo, C. (2000). "Metodología y estudio de la reutilización, con tratamiento de cal, de materiales

arcillosos clasificables como marginales e inadecuados en la M-45 de Madrid". *Simposium sobre Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte,* pp. 483-496.

37. Dorfman, B. & Rivara, Y. (1985). "Sobre la utilización de filler en las mezclas asfálticas en caliente". *X Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito,* pp. 467-484.
38. Elías, X. (2006). "Criterios de Valorización y tratamientos de residuos industriales en el diseño del producto (Valorización de fangos de EDAR)". *Postgrado de Ingeniería Química*.
39. Esrig, M.I., Mac Kenna, P.E. & Forte, E.P. (2003). "Ground stabilization in the United States by the Scandinavian lime cement dry mix process". *Geotechnical Special Publication*, pp. 501.
40. Fauvelle, M. (1846). "A New Method of Boring for Artesian Springs". *J. Franklin Institute,* Vol. 12 No. 3 pp. 369-371.
41. Flores-Amado, V. (1996). "Evaluación de calidad de la cal hidratada para uso en la elaboración de azúcar".
42. Gallego-Medina, J. (2002). "Efecto del hidrato de cal como aditivo de mezclas bituminosas". *Universidad Politécnica de Madrid,* Vol. 123 pp. 68-80.
43. García Serrano, R. (1974). "Nota sobre la fabricación de cal en Archidona (Málaga)". *Revista de dialectología y tradiciones populares,* Vol. 30 No. 3 pp. 463-466.
44. Godsey, C.B., Pierzynsky, G.M., Page, P.W., Mengel, D.B. & Lamond, R.E. (2007). "Evaluation of Common Lime Requirement Methods". *Soil Science Society of American Journal,* Vol. 71 No. 3 pp. 843-849.
45. Gonzalez, A., Cubrinovski, M., Pidwerbesky, B. & Alabaster, D. (2011). "Strength and Deformational Characteristics of Foamed Bitumen Mixes under

Suboptimal Conditions". *Journal of Transportation Engineering-ASCE,* Vol. 137 pp. 1-10.

46. Greenwood, M.S., Skorpik, J.R., Bamberger, J.A. & Harris, R.V. (1999). "On-line ultrasonic density sensor for process control of liquids and slurries". *Ultrasonics,* Vol. 37 No. 2 pp. 159-171.
47. Guo, J., Yan, J., Fan, W. & Zhang, H. (2006). "Applications of strongly inhibitive silicate-based drilling fluids in troublesome shale formations in Sudan". *Journal of Petroleum Science and Engineering,* Vol. 50 No. 3-4 pp. 195-203.
48. Hamzah, M.O., Hasan, M.R.M., Che Wan, C.N. & Abdullah, N.H. (2010). "A comparative study on performance of Malaysian porous asphalt mixes incorporating conventional and modified binders". *Journal of Applied Sciences,* Vol. 10 No. 20 pp. 2403-2410.
49. Hassibi, M. (1999). "Una perspectiva general del apagado de la cal y los factores que afectan el proceso". *3rd Symposium Internacional Sorbalit*, Noviembre 1999.
50. He, Z., Li, J., Sun, Z., Zhang, L., Hu, J. & Qiu, J. (2009). "The application of organosilicone drilling fluid in block Zhandian, Henan". *Drilling Fluid and Completion Fluid,* Vol. 26 No. 4 pp. 75-77.
51. Heggem, A.G. & Pollard, J.A. (1914). "Drilling wells in Oklahoma by the mud-laden fluid method". *U.S. Bur. Mines. Tech.,* Vol. 68.
52. Herrera-Suárez, A.A. (2003). "Eliminación de lodos de una EDAR". *Master en Ingeniería del Agua,* Febrero 2003.
53. Hicks, R.G., Todd, P.E. & Scholz, V. (2003). "Life cycle costs for lime in hot Mix Asphalt". *Roadworthy Research & Design,* Vol. 2.

54. Hossain, K.M.A., Lachemi, M. & Easa, S. (2007). "Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua New Guinea". *Resources, Conservation and Recycling,* Vol. 51 No. 4 pp. 711-731.

55. Hotza, D., Guglielmi, P.O., Silva, W.R.L. & Repette, W.L. (2010). "Porosity and mechanical strength of an autoclaved clayey cellular concrete". *Advances in Civil Engineering,* Vol. 2010, May 2010.

56. Inci, G., Yesiller, N. & Kagawa, T. (2003). "Experimental investigation of dynamic response of compacted clayey soils". *Geotechnical Testing Journal,* Vol. 26 No. 2 pp. 125-141.

57. Ishai, I. & Craus, J. (1977). "Effect of the filler on aggregate-bitumen adhesion properties in bituminous mixtures". *Asphalt Paving Technology. Association of Asphalt Pavement Technologies,* Vol. 46 pp. 228-259.

58. Jiménez, F.E.P. & Pérez, M.A.C. (1990). "Analysis and evaluation of the performance of porous asphalt. The Spanish experience". *ASTM Special Technical Publication*.

59. Jin, J., Wang, Z. & Ran, S. (1991). "Industria de cueros (a base de sales de cromo, con agentes vegetales)". *Fundación Natura. Potencial impacto ambiental de las industrias en el Ecuador; exploración preliminar y soluciones,* Quito, Ecuador, pp.113-126.

60. Jofré, C., Kraemer, C., López-Bachiller, M., Atienza, M. & Díaz-Minguela, J. (2008). "Manual de estabilización de explanadas con cemento o cal". *ANCADE.*

61. Jones, P.H. & Babson, E.C. (1935). "Evaluation of Rotary Drilling Muds". *API Drill. Prod. Pract,* pp. 23-33.

62. Kabak, K. & Akiarli, A. (2007). "A field application for lime stabilization". *Environmental Geology,* Vol. 51 No. 6 pp. 987-997.

63. Konyeha, V.U. & Ogbeide, F.N. (2006). "Lime-cement stabilised chicoco as a road pavement material". *International Conference on Engineering Research and Development: Impact on Industry*.

64. Kraemer, C. & Mestre, V. (2006). "Evaluación y Optimización de las Explanadas". *VII Congreso Nacional de Firmes.*

65. Kraemer, C., Pardillo, J.M., Rocci, S., Romana, M.G., Sánchez-Blanco, V. & Del Val, M.A. (2004). *Ingeniería de carreteras,* Madrid, Ed. Mcgraw-Hill.

66. Kunesch, C. & Buchta, M. (2007)."Asphaltmodifizierung mit Kalkhydrat. Ergebnisseaus der Praxis". *Gestrata Journal,* Vol. 111 pp. 12.

67. León, N.A., Rojas Reyes, N.R., Suárez, B.U. & Oswaldo Bustamante R, M. (2009). "Experimental evaluation of silicon - calcareous units from blast furnace slag and hydraulic lime for masonry". *DYNA,* Vol. 76 No. 160 pp. 247-254.

68. Lewis, J.O. & McMurray, W.F. (1916). "The use of Mud-laden Fluid in Oil and Gas Wells". *U.S. Bur. Mines. Bull.,* Vol. 134.

69. Li, Q., Peng, Y., Zhang, S. & Liu, Z. (2007). "Study on signal transmission technique in rotary steering drilling". *Shiyou Xuebao/Acta Petrolei Sinica,* Vol. 28 No. 4 pp. 108-111.

70. Little-Dallas, N. (1998). "Lime in Soil Stabilitazion".

71. Liu, S., Cao, W.D., Gao, X.C., Cui, X.Z. & Shang, Q.S. (2009). "Experimental Study on Soil Stabilized with Firming Agent and Lime". *Proceedings of Selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference. Road Pavement Material Characterization and Rehabilitation*.

72. Lummus, J.L. (1949). "Water in Oil Emulsion Drilling Fluid", *U.S. Patent Nº 2661334*.

73. Luo, Y., Han, L., Xue, Y., Li, G. & Zhang, Y. (2010). "Laboratory study on a new high performance seawater base drilling fluid". *Drilling Fluid and Completion Fluid,* Vol. 27 No. 1.

74. Mallela, J., Harold Von Quintus, P.E. & Smith, K.L. (2004). "Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical design". *National Lime Association*.

75. Marsh, H.N. (1931). "Properties anda Treatment of Rotary Muds". *Trans, AIME,* Vol. 92 pp. 234-251.

76. Martín-Diaz, E. (2007). "Reciclado de lodos. Prolongación de la línea 11 del metro de Madrid.". *Congreso Nacional del Medio Ambiente,* Dragados, Madrid.

77. Mazadiego Martínez, L.F., Puche Riart, O., Jordá Bordehore, L. & Hervás, A. (2004). "Procesos comerciales e industriales. Hornos de cal de Quijorna". *De Re Metallica*, No. 2 pp. 63-69.

78. Meneses, M., Chaves, J.A.M., Mancilla, P. & Rodríguez-Páez, J.E. (2007). "Caracterización físico-química de arcillas del municipio de Guapi-Costa Pacífica Caucana". *Revista Académica Colombiana de Ciencias,* Vol. 31 No. 121 pp. 537-544.

79. Miró Recasens, R., Martínez, A., Pérez-Jiménez, F. & Bianchetto, H. (2005). "Effect of filler on the aging potential of asphalt mixtures". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,* Vol. 1901 No. 1 pp. 10-17.

80. Miró Recasens, R., Martínez-Lianez, C. & Pérez-Jiménez, F. (2002). "Análisis de las propiedades y caracterización de los filleres de recuperación para su empleo en la fabricación de mezclas bituminosas". *Universidad Politécnica de Cataluña,* Vol. 123 pp. 93-101.

81. Miró, J. (1994). "Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo Cántabro". *Tesis Doctoral ETSECCPB*.

82. Monteiro, E.N., Ribeiro, P.R. & Lomba, R.F.T. (2010). "Study of the PVT properties of gas-synthetic-drilling-fluid mixtures applied to well control". *SPE Drilling and Completion,* Vol. 25 No. 1 pp. 45-52.

83. Nakazawa, J., Iwasaki, Y., Fukuda, M., Matsubara, H., Sreng, S., Akazawa, Y. & Nakagawa, T. (2005). "Restoration of the Angkor complex foundation by slaked lime stabilized soil". *Zairyo/Journal of the Society of Materials Science,* Japan, Vol. 54 No. 11 pp. 1147-1152.

84. Navarro, J.M.F. (2003). "El vidrio". *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*.

85. Ninov, J. & Donchev, I. (2008). "Lime Stabilization of Clay from the "Mirkovo" Deposit. Part I: Kinetics and Mechanisms of the Processes". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,* Vol. 91 No. 2 pp. 487-490.

86. NLT-114/99 (1999). *Determinación del contenido en sales solubles de los suelos*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación.

87. NLT-155/95 (1995). *Densidad relativa del polvo mineral, cementos y materiales similares*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación.

88. NLT-161/00 (2000). *Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas (Ensayo de inmersión-compresión)*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación.

89. NLT-162/00 (2000). *Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas (Ensayo de inmersión-compresión)*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación.

90. NLT-167/74 (1974). *Densidad relativa de los áridos en aceite de parafina*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación.

91. NLT-159/00 (2000). *Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación.

92. NLT-176/92 (1992). *Densidad aparente del polvo mineral en tolueno*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación

93. NLT-254/99 (1999). *Ensayo de colapso en suelos*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación.

94. NLT-352/00 (2000). *Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación.

95. Nyakairu, G.W.A., Kurzweil, H. & Koeberl, C. (2002). "Mineralogical, geochemical and sedimentological characteristics of clay deposits from central Uganda and their applications". *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 35 pp. 123-134.

96. Oakley, D.J., Halliday, G., Begbie, R.J. & Turner, J.B. (1993). "New Oil-Based Drilling Fluid Reduces Oil on Cuttings". *Society of Petroleum Engineers*.

97. Olcina-Cantos, J. (2002). "Nuevos retos en depuración y desalación de aguas en España".

98. Ortuño, l. & Rodríguez, J.L. (2000). "La estabilización del suelo con cal como mejora de suelo. Estudio realizado en el tramo V de la A-381: Jeréz-Los Barrios". *Congreso andaluz de carreteras,* Vol. II pp. 1309-1324.

99. Osula, D.O.A. (1996). "A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite". *Engineering Geology,* Vol. 42 No. 1 pp. 71-81.

100. Oteo, C. (2003). "Algunas consideraciones geológico-geotécnicas para el estudio de la infraestructura de obras lineales".

101. Páez Dueñas, A., Pérez Jiménez, F. & Miró Recasens, R. (2009). "Evaluation of the cohesion of crumb rubber modified bitumens by means of UCL method". *Road Materials and Pavement Design,* Vol. 10 No. 3 pp. 667-676.

102. Pérez-Jiménez, F. & Miró Recasens, R. (1997). "Caractérisation mèchanique de lliants asphaltiques: méthode UCL". *Proceedings of the fifth RILEM Symposium MTBM* , pp. 41-46.

103. Pérez-Jiménez, F., Miró Recasens, R. & Daguerre, L. (2002). "Efecto de la relación filler/betún y de la naturaleza del fíller en los másticos bituminosos". *Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial,* Septiembre 2002*,* Vol. 123 pp. 27-39.

104. Pérez-Jiménez, F., Miró Recasens, R., Rodrigo, J., Khalid, H.A. & Walsh, C.M. (1999). "Procedimientos funcionales para la caracterización de ligantes: métodos SHRP y UCL".

105. Pérez-Jiménez, F., Miró-Recasens, R., Martínez, A., Martínez-Laínez, C. & Páez-Dueñas, A. (2006)."Evaluación de la cohesión de betunes modificados con polvo de neumáticos". *Materiales de Construcción,* Vol. 56 No. 284 pp. 43-54.

106. Plee, D., Lebedenko, F., Obrecht, F., Letellier, M. & Van Damme, H. (1990). "Microstructure, permeability and rheology of bentonite — cement slurries". *Cement and Concrete Research,* Vol. 20 No. 1 pp. 45-61.

107. Ramilo, L.B., De Soler, S.M.G. & Coppari, N.R. (2003). "Tecnologías de proceso para desalinización de aguas". *Revista de la Comisión Nacional de Energía Atómica,* Vol. 3 No. 9-10 pp. 22-27.

108. Ripa, G., Rossi, M., Staltari, D., Ilobi, M., Lawal, T., Beldongar, M., Douglas, T., Wassouf, P., Jones, A., Swaco, M. & Parlar, M. (2010). "Openhole gravel-pack case histories in wells drilled with a synthetic mud: Successful implementation of an alternative method in Oyo field, Nigeria". *Society of Petroleum Engineers - SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition 2010,* APOGCE 2010, pp. 1807.

109. Rodríguez, Á.S., Fernández, M.L.B., Vadillo, D.P. & Cachero, J.L.A. "Tratamientos y estabilizaciones de suelos. Estado del arte".

110. Ruiz, C. (1966). "Concentración Crítica de Filler, su Origen y Significado en la Dosificación de Mezclas Abiertas". *Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires,* Vol. 11.

111. Ruiz, M., Andrés, A. & Irabien, A. (1999). "Oxido de calcio para la estabilización de lodos de fundición". *Ingeniería química,* Madrid, Vol. 31 pp. 147-156.

112. Sabater, O. (1996). "Estudi de la repetibilitat del mètode UCL® per la caracterització de lligants bituminosos". *Tesina d'especialitat ETSECCPB.*

113. Sakr, M.A. & Shahin, M.A. (2009). "Utilization of Lime for Stabilizing Soft Clay Soil of High Organic Content". *Geotechnical Geology Engineering,* Vol. 27 pp. 105-113.

114. Sampedro-Rodríguez, A. (2008). "Diseño y ejecución de las estabilizaciones con cal". *VIII Congreso Nacional de Firmes*.

115. Sampedro-Rodríguez, A. (2005a). "Tratamiento de suelos con cal". *Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España*.

116. Sampedro-Rodríguez, A. (2005b). "Tratamiento de suelos con cal. Planteamiento general, diseño y control de calidad". *Asociación Nacional de fabricantes de Cales y Derivados de España (ANCADE)*, Madrid.

117. Schlumberguer, D. (1994). "Drilling Fluids Technical Manual". *Dowell Fluids Services,* Vol. 3 pp. 12-30.

118. Shahbazi, K., Mehta, S.A., Moore, R.G. & Ursenbach, M.G. J (2006). "Effect of Oxidation on Explosion Potential and Barite Sag Reduction in Oil and Synthetic-Based Drilling Fluids". *Petroleum Society of Canada. Canadian International Petroleum Conference,* 13-15 June 2006.

119. Shanmuganathan, R.T. & Oades, J.M. (1983). "Modification of soil physical properties by addition of Calcium Compounds". *Australian Journal of Soil Research,* Vol. 21 No. 3 pp. 285-300.

120. Sowers, G.B. (1972). "Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones".

121. Stroud, B.K. (1925). "Use of Barites as a Mud Laden Fluid". *Oil Weekly*, pp. 29-30.

122. Tapkin, S. (2008). "Mechanical evaluation of asphalt-aggregate mixtures prepared with fly ash as a filler replacement". *Canadian Journal of Civil Engineering,* Vol. 35 No. 1 pp. 27-40.

123. Tehrani, A., Gerrard, D., Young, S. & Fernandez, J. (2009). "Environmentally friendly water-based fluid for HPHT drilling". *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, 20-22 April 2009, The Woodlands. Texas.

124. Terrel, R.L. & Shute, J.W. (1989). "Summary report on water sensivity. SHRP/A/IR-89-003. Strategic Highway Research Program", *National Research Council*.

125. Torres Martínez, L.M. & Ibarra, J. (2005). "Nueva tecnología para abatir los costos de fabricación del vidrio a partir de materias primas alternas". *Ciencia UANL,* Vol. 8 No. 2.

126. UNE-EN 197-1 (2011). *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.* Madrid: AENOR, Diciembre. Grupo 23, 38 páginas.

127. UNE-EN 7368 (1977). *Determinación con agua oxigenada del contenido de materia orgánica en los suelos.* Madrid: AENOR, Noviembre. Grupo 0, 2 páginas.

128. UNE-EN 77305 (1999). *Calidad del suelo: Determinación del pH.* Madrid: AENOR, Abril. Grupo 4, 8 páginas.

129. UNE-EN 77308 (2001). *Calidad del suelo: Determinación de la conductividad eléctrica específica.* Madrid: AENOR, Enero. Grupo 4, 7 páginas.

130. UNE-EN 103-101 (1995). *Análisis granulométrico de suelos por tamizado.* Madrid: AENOR, Junio. Grupo 5, 9 páginas.

131. UNE-EN 103-102 (1995). *Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro.* Madrid: AENOR, Junio. Grupo 8, 15 páginas.

132. UNE-EN 103-103 (1994). *Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.* Madrid: AENOR, Febrero. Grupo 5, 9 páginas.

133. UNE-EN 103-104 (1993). *Determinación del límite plástico de un suelo.* Madrid: AENOR, Febrero. Grupo 1, 2 páginas.

134. UNE-EN 103-201 (1996). *Determinación cuantitativa del contenido en sulfatos solubles de un suelo.* Madrid: AENOR, Mayo. Grupo 3, 5 páginas.

135. UNE-EN 103-204 (1993). *Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico*. Madrid: AENOR, Febrero. Grupo 2, 4 páginas.

136. UNE-EN 103-300 (1993). *Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.* Madrid: AENOR, Febrero. Grupo 2, 3 páginas.

137. UNE-EN 103-500 (1994). *Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor Normal*. Madrid: AENOR, Febrero. Grupo 3, 6 páginas.

138. UNE-EN 103-502 (1995). *Método de ensayo para determinar en laboratorio el índice C.B.R. de un suelo*. Madrid: AENOR, Junio. Grupo 8, 15 páginas.

139. UNE-EN 103-601 (1996). *Ensayo del hinchamiento libre de un suelo en edómetro.* Madrid: AENOR, Mayo. Grupo 3, 5 páginas.

140. UNE-EN 1097-3 (1999). *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad*. Madrid: AENOR, Mayo. Grupo 12, 15 páginas.

141. UNE-EN 1097-4 (2009). *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 4: Determinación de la porosidad del filler seco compactado*. Madrid: AENOR, Enero. Grupo 11, 13 páginas.

142. UNE-EN 12697-8 (2003). *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 8: Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas*. Madrid: AENOR, Noviembre. Grupo 10, 12 páginas.

143. UNE-EN 12697-12 (2009). *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa*. Madrid: AENOR, Junio. Grupo 14, 19 páginas.

144. UNE-EN 12697-23 (2004). *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la resistencia a tracción indirecta de probetas bituminosas*. Madrid: AENOR, Enero. Grupo 12, 16 páginas.

145. UNE-EN 12697-34 (2006). *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 34: Ensayo Marshall*. Madrid: AENOR, Diciembre. Grupo 11, 14 páginas.

146. Usman, A., Kuzyakov, Y. & Stahr, K. (2005). "Effect of Clay Minerals on Inmovilization of Heavy Metals and Microbial Activity in a Sewage Sludge-Contaminated Soil". *Institute of Soil Science and Land Evaluation. Department of Soil and Water. Journal of Soil and Sediments,* Vol. 5 No. 4 pp. 245-252.

147. Vettorazzo, S., Amaral, F.C.S. & Chitolina, J. (1999). "Lixiviacao de sais de um solo acido tratado com lama de cal proveniente de industria de papel". *Congresso brasileiro de ciencia do solo*, Brasilia.

148. Warren, J. (2000a). "Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations". *Earth-Science Reviews,* Vol. 52 No. 1-3 pp. 1-81.

149. Warren, J. (2000b). "Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations". *Earth-Science Reviews,* Vol. 52 No. 1-3 pp. 1-81.

150. Zhao, Z., Xu, T. & Lu, S. (2005). "New development of drilling fluid technology in 2004 abroad". *Drilling Fluid and Completion Fluid,* Vol. 22 No. 4.

REFERENCIAS ESPECÍFICAS

Publicación 1: Lime stabilization of bentonite sludge from tunnel boring

1. Al-Amoudi, O.S.B., Khan, K., Al-Kahtani, N.S. (2010). Stabilization of a Saudi calcareous marl soil. *Construction and Building Materials*, Arabia Saudi.
2. Al-Rawas, A., Taha, A., Al-Aghbari, R., Mohamedzein, M. (2006). Evaluation of the bearing capacity of compacted desert sands. *Soil and Rock Behaviour and Modelling* Vol. 150 pp. 98–104.
3. ANCADE (2007). Manual de estabilización de suelos con cal. Madrid.
4. ASTM D 422-63 (2007). American society for testing and materials. Standard Test. Method for Particle-Size Analysis of Soils.
5. ASTM D 6913-04 (2009). American society for testing and materials. Standard Test. Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis.
6. ASTM D1883-07E2 (2007). American society for testing and materials. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils, Philadelphia. New York.
7. ASTM D2216-05 (2005). American society for testing and materials. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.
8. Boardman, D.I., Glendinning, S., Rogers, C.D.F. (2001). Development of stabilisation and solidification in lime–clay mixes. *Geotechnique*, Vol. 51 No.6 pp. 533–543.
9. Buhler, R.L., Cerato, A.B. (2007). Stabilization of Oklahoma expansive soils using lime and Class C fly ash.

10. EN 103-201 (1996). Spanish Association for Standardization and Certification quantitative analysis of soluble sulphate content of a soil.
11. EN 103-206 (2006). Spanish Association for Standardization and Certification. Determination of Gypsum Content in Soils.
12. EN 103-406 (2006). Spanish Association for Standardization and Certification. Collapse Test in Soils.
13. EN 103-500 (1994). Spanish Association for Standardization and Certification compactation test. Proctor Standard.
14. EN 103-601 (1996). Spanish Association for Standardization and Certification. Test for Free Swelling of Soils in Oedometer Device.
15. EN 459(2002). Spanish Association for Standardization and Certification. Building Lime.
16. EN 77308 (2006). Spanish Association for Standardization and Certification. Soil Quality. Determination of the Specific Electrical Conductivity.
17. EN 80502 (2003). Spanish Association for Standardization and Certification. Quicklime and Hydrated Limes for the Improvement and/or Stabilization of Soils.
18. Godsey, C.B., Pierzynsky, G.M., Page, P.W., Mengel, D.B., Lamond, R.E. (2007). Evaluation of common lime requirement methods. Soil Science Society of American Journal, Vol. 71 No.3 pp. 843–849.
19. Highways Agency (2007). General technical requirements specification for road and bridge works (PG-3). Article 542: hot mix asphalt concrete or bituminous. Ministry of Development. Spain. 2008.
20. Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Easa, S. (2007). Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua New Guinea. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 51 No. 4 pp. 711–731.

21. Inci, G., Yesiller, N., Kagawa, T. (2003). Experimental investigation of dynamic response of compacted clayey soils. Geotechnical Testing Journal, Vol. 26 No. 2 pp. 125–141.

22. Konyeha, V.U., Ogbeide, F.N. (2006). Lime–cement stabilised chicoco as a road pavement material. International Conference on Engineering Research and Development: Impact on Industry.

23. Kraemer, C., Mestre, V. (2006). Evaluación y Optimización de las Explanadas. VII Congreso Nacional de Firmes.

24. Kuzyakov, Y., Stahr, K.. (2005). Effect of clay minerals on extractability of heavy metals and sewage sludge mineralization in soil. Chemistry and Ecology, Vol. 20 No.2 pp. 123–135.

25. Little-Dallas, N. (1998). Lime in soil stabilization.

26. Liu, S., Cao, W.D., Gao, X.C., Cui, X.Z., Shang, Q.S. (2009). Experimental study on soil stabilized with firming agent and lime. Road Pavement Material Characterization and Rehabilitation.

27. Meneses, M., Chaves, J.A.M., Mancilla, P., Rodríguez-Páez, J.E. (2007). Caracterización fisico-química de arcillas del municipio de Guapi-Costa Pacífica Caucana. Revista Académica Colombiana de las Ciencias, Vol. 31 No.121 pp. 537–544.

28. Ninov, J., Donchev, I. (2008). Lime stabilization of clay from the "Mirkovo" deposit. Part I:kinetics and mechanisms of the processes. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 91 No. 2 pp. 487–490.

29. Nyakairu, G.W.A., Kurzweil, H., Koeberl, C. (2002). Mineralogical, geochemical and sedimentological characteristics of clay deposits from central Uganda and their applications. Journal of African Earth Sciences. Vol. 35 pp. 123–134.

30. Osula, D.O.A. (1996). A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. Engineering Geology, Vol. 42 No. 1 pp. 71–81.
31. Shanmuganathan, R.T., Oades, J.M. (1983). Modification of soil physical properties by addition of calcium compounds. Australian Journal of Soil Research, Vol. 21 No.3 pp. 285–300.
32. Usman, A., Kuzyakov, Y., Stahr, K. (2005). Effect of clay minerals on immobilization of heavy metals and microbial activity in a sewage sludge-contaminated soil. Institute of Soil Science and Land Evaluation. Department of Soil and Water. Journal of Soil and Sediments Vol. 5 No. 4 pp. 245–252.

Publicación 2: Experimental study of bituminous mastic behavior using different fillers based on the UCL method

1. Bocci, M.; Grilli, A.; Cardone, F.; Graziani, A. 2011. A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials. Construction and Building Materials 25 (2): 773-778.
2. Brauers, W. K. M.; Zavadskas, E. K.; Peldschus, F.; Turskis, Z. 2008. Multi-objective decision-making for road design. Transport 23(3): 183-193.
3. Chen, J.; Zhou, L.; Yan, Z. 2011. Hydrated lime content in asphalt mastic based on high temperature performances. Applied Mechanics and Materials 40 (41): 669-674.
4. Devecseri, G. 2010. Effect of heating on the physical properties of asphalt aggregates, Periodica Polytechnica: Civil Engineering 54 (1): 53-60.
5. EN 197-1 Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements. European committee for standarization. Brussels, 2000. 30 p.

6. Hicks, R.G.; Todd, P.E.; Scholz, V. 2003, Life cycle costs for lime in hot Mix Asphalt, Roadworthy Research & Design 2: 1-156. Department of Civil Engineering. Oregon State University.
7. Highways Agency General technical requirements specification for road and bridge works (PG-3). Article 542: hot mix asphalt concrete or bituminous. Ministry for Development. Spain. 2007. 240 p.
8. Huang, S. & Grimes, W. 2010, Influence of aging temperature on rheological and chemical properties of asphalt binders, Transportation Research record 2179: 39-48.
9. IRAM 1542 *Fillers for asphalt mixtures. Determination of the critical ratio and density*. Argentinean committee for standardization, 1992. 15 p.
10. Kunesch, C. 2007, Asphaltmodifizierung mit Kalkhydrat. Ergebnisseaus der Praxis, Gestrata Journal 111: 7-12.
11. Lee, S.; Amirkhanian, S.N.; Shatanawi, K.; Thodesen, C. 2009. *Influence of compaction temperature on rubberized asphalt mixes and binders,* Canadian Journal of Civil Engineer 35 (9): 908-917.
12. Miró-Recasens, R.; Martínez, A.; Pérez-Jiménez, F.; Bianchetto, H. 2008. Effect of filler on the aging potential of asphalt mixtures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1901 (1): 10-17.
13. Molenaar, A., Hagos, E.T. & van de Ven, M.F.C. 2010. Effects of aging on the mechanical characteristics of bituminous binders in PAC, Journal of Materials in Civil Engineering 22 (8): 779-787.
14. Muniandy, R., Aburkaba, E.E., Hamid, H.B. & Yunus, R.B.T. 2009. An initial investigation of the use of local industrial wastes and by-products as mineral fillers

in stone mastic asphalt pavements, Journal of Engineering and Applied Sciences 4 (3): 54-63.

15. NLT 176 Apparent density of mineral power. Spanish committee for standardization (CEDEX), 1992. 10 p.
16. Páez-Dueñas, A.; Pérez-Jiménez, F. & Miró-Recasens, R. 2009. Evaluation of the cohesion of crumb rubber modified bitumens by means of UCL method, Road Materials and Pavement Design 10 (3): 667-676.
17. Radziszewski, P. 2007. Modified asphalt mixtures resistance to permanent deformations. Journal of Civil Engineering and Management 13 (4): 307-315.
18. Shen, S.; Yu, H. 2011. Characterize packing of aggregate particles for paving materials: Particle size impact, Construction and Building Materials, 25 (3): 1362-1368.
19. Valdés, G.; Pérez-Jiménez, F.; Miró-Recasens, R.; Martínez, A.; Botella, R. 2011. Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials* 5 (3):1289-1297.
20. Vikan, H.; Justnes, H.; Winnefeld, F. & Figi, R. 2007. Correlating cement characteristics with rheology of paste, *Cement and Concrete Research* 37 (11): 1502-1511.

Publicación 3: Evaluation of water effect on bituminous mastics with different contribution fillers and binders.

1. Airey, G.D., Collop, A.C., Zoorob, S.E., Elliott, R.C. (2008). “The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage”. *Journal of construction and building materials*, Vol. 22 No. 9 pp. 2015–2024.

2. Terrel, R.L., Shute, J.W. (1989). "Summary report on water sensitivity. SHRP/A/IR-89-003". *Strategic highway research program.* National Research Council.
3. Jiménez, F.E.P., Perez, M.A.C. "Analysis and evaluation of the performance of porous asphalt. The Spanish experience". *ASTM Special Technical Publication,* Vol. 512.
4. González, A., Cubrinovski, M., Pidwerbesky, B., Alabaster, D. (2011). "Strength and deformational characteristics of foamed bitumen mixes under suboptimal conditions". *Journal of Transportation Engineering,* Vol. 137 pp.1–10.
5. Bianchetto, H., Lisandro, D., López, M. (2002). "Primera experiencia sobre utilización del caucho de neumáticos por vía seca en pavimentación urbana". *Asociación argentina de carreteras*, Vol. 168 pp.1–15.
6. Tapkin, S. (2008). "Mechanical evaluation of asphalt–aggregate mixtures prepared with fly ash as a filler replacement". *Canada Journal Civil Engineering*, Vol. 35 No. 1 pp. 27–40.
7. Hamzah, M.O., Hasan, M.R.M., Che Wan, C.N., Abdullah, N.H. (2010). "A comparative study on performance of Malaysian porous asphalt mixes incorporating conventional and modified binders". *Journal of Applied Sciences*, Vol. 10 No. 20 pp. 2403–2410.
8. Aragão, F.T.S., Lee, J., Kim, Y. and Karki, P. (2010). "Material-specific effects of hydrated lime on the properties and performance behaviour of asphalt mixtures and asphaltic pavements". *Journal of construction building materials,* Vol. 24 No. 4 pp. 538–544.

9. Highways Agency (2007). General technical requirements specification for road and bridge works (PG-3). *Article 542: hot mix asphalt concrete or bituminous. Ministry of development*. Spain.
10. Çolak, A. (2008). "Effects of chrome oxide and limestone filler on the wear characteristics of paste and concretes made with white Portland cement". *Journal of construction and build materials*, Vol. 22 No. 11 pp. 2276–2280.
11. Partl, M.N., Pasquini, E., Canestrari, F., Virgili, A. (2010). "Analysis of water and thermal sensitivity of open graded asphalt rubber mixtures". *Journal of construction and building materials*, Vol. 24 No. 3 pp. 283–91.
12. UNE-EN 933-1 (1998). Spanish association for standardization and certification. *Test for geometrical properties of aggregates. Part 1: determination of particle size distribution. Sieving method.*
13. UNE-EN 104281-2 (1986). Spanish association for standardization and certification. *Bituminous and bituminous modified materials. Bituminous raw materials and mastics. Testing methods. Determination of relative density.*
14. UNE-EN 13108-1 (2008). Spanish association for standardization and certification. *Bituminous mixtures – material specifications – Part 1: asphalt concrete.*
15. UNE-EN 13108-2 (2007). Spanish association for standardization and certification. *Bituminous mixtures – material specifications – Part 2: asphalt concrete for very thin layers*.
16. UNE-EN 1097-4 (1999). Spanish association for standardization and certification. *Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 4: determination of the voids of dry compacted filler.*

17. UNE-EN 12697-12 (2009). Spanish Association for standardization and certification. *Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – Part 12: determination of the water sensitivity of bituminous specimens*.
18. UNE-EN 12697-30 (2006). Spanish association for standardization and certification. *Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – Part 30: specimen preparation by impact compactor*.