



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Desarrollo de tecnologías sostenibles de reciclado de pavimentos en frío "in situ" para la rehabilitación de carreteras. Aplicación práctica en la carretera A-221, desde el PK 48+900 al PK 52+065, Caspe (Zaragoza).

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR/A: Gandía Soriano, Jorge

Tutor/a: Llopis Castelló, David

Cotutor/a: García Segura, Tatiana

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Pavasal Empresa Constructora S.A. por brindarme la oportunidad de participar en el proyecto “Desarrollo de herramientas IA (*Deep Learning*) para el diseño y control de nuevas técnicas de fabricación en mezclas bituminosas recicladas en frío (PAVCOOL)” como ingeniero en prácticas en el Departamento de I+D+i de Pavasal Empresa Constructora, S.A., en Quart de Poblet, Valencia. Su apoyo y confianza han sido fundamentales para la realización de este Trabajo de Fin de Máster.

Especialmente, quiero agradecer a Jesús Felipo, Director Técnico de Pavasal, con quien contacté en primera instancia y me acogió indudablemente. Su cercanía y disposición fueron cruciales para mi integración en el equipo y el desarrollo de este trabajo.

Agradezco enormemente a José Ramón López, tutor por parte de la empresa, por su constante apoyo y supervisión. Su guía y conocimiento han sido esenciales para alcanzar los objetivos de este trabajo.

También quiero extender mi gratitud a José Berbis y José Ramón Albert por su colaboración. Sus aportaciones y experiencia han sido cruciales para el progreso de este trabajo.

A mis compañeros Lorena, David, Henar, Blai y Pablo, les agradezco su amistad y apoyo diario. Su ayuda y compañerismo han hecho de esta experiencia algo verdaderamente enriquecedor.

Y, por supuesto, quiero agradecer a mis tutores de la *Universitat Politècnica de València*, David Llopis Castelló y Tatiana García Segura. Su orientación académica y sus valiosos consejos han sido fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo.

Por último, a mi familia y amigos, por su apoyo incondicional a lo largo de este proceso.

A todos ustedes, ¡gracias!

RESUMEN

En la actualidad, se observa un cambio de paradigma global hacia prácticas más ecológicas y sostenibles en todos los sectores industriales, incluida la ingeniería civil, donde la eficiencia energética y la reducción de emisiones son prioridades clave. Este movimiento es impulsado no solo por consideraciones ambientales, sino también por las repercusiones socioeconómicas de la pandemia COVID-19 y los objetivos del Fondo de Recuperación *Next Generation* EU en la Unión Europea, que promueven un crecimiento económico resiliente y sostenible.

Una estrategia fundamental para alcanzar estos objetivos es la reutilización eficiente de materiales en los firmes y pavimentos bituminosos, reconocida internacionalmente por su capacidad para cumplir de manera efectiva con los criterios de sostenibilidad. A pesar de los avances significativos en innovación bajo la Dirección General de Carreteras (DGC), el camino hacia la sostenibilidad integral de la Red de Carreteras del Estado español (RCE) aún no está completo.

En este contexto, el presente trabajo se centra en el desarrollo y optimización de tecnologías sostenibles para el reciclado de pavimentos en frío "in situ" utilizando emulsión bituminosa. El estudio aborda áreas clave como el análisis exhaustivo de la literatura existente y la elaboración experimental de una fórmula de trabajo mediante pruebas en laboratorio con diversos tipos de betún y dotaciones, incluyendo aditivos y diferentes métodos de compactación.

La metodología propuesta establece una alternativa constructiva basada en el reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa tipo III, evaluada también desde una perspectiva ambiental, contrastando significativamente con las soluciones tradicionales adoptadas por las administraciones responsables de la conservación y el mantenimiento de carreteras.

Para llevar a cabo la implementación práctica de esta solución, se ha diseñado un protocolo de actuación integral. Este protocolo se enfoca en demostrar la viabilidad y el potencial del reciclado en frío con emulsión bituminosa tipo III propuesto, específicamente en la rehabilitación del tramo PK 48+900 al PK 52+065 de la carretera A-221 en Caspe, Zaragoza.

Además de demostrar la efectividad de esta técnica, este estudio pionero abre nuevas posibilidades para la gestión sostenible de infraestructuras viales. Fomenta un enfoque más ecológico y establece un precedente innovador en el mantenimiento de carreteras, destacándose como un avance significativo en la ingeniería civil contemporánea.

RESUM

En l'actualitat, s'observa un canvi de paradigma global cap a pràctiques més ecològiques i sostenibles en tots els sectors industrials, inclosa l'enginyeria civil, on l'eficiència energètica i la reducció d'emissions són prioritats clau. Aquest moviment és impulsat no sols per consideracions ambientals, sinó també per les repercussions socioeconòmiques de la pandèmia COVID-19 i els objectius del Fons de Recuperació *Next Generation* EU a la Unió Europea, que promouen un creixement econòmic resiliència i sostenible.

Una estratègia fonamental per a aconseguir aquests objectius és la reutilització eficient de materials en els fermes i paviments bituminosos, reconeguda internacionalment per la seua capacitat per a complir de manera efectiva amb els criteris de sostenibilitat. Malgrat els avanços significatius en innovació sota la Direcció General de Carreteres (DGC), el camí cap a la sostenibilitat integral de la Xarxa de Carreteres de l'Estat espanyol (RCE) encara no està complet.

En aquest context, el present treball se centra en el desenvolupament i optimització de tecnologies sostenibles per al reciclatge de paviments en fred "in situ" utilitzant emulsió bituminosa. L'estudi aborda àrees clau com l'anàlisi exhaustiva de la literatura existent i l'elaboració experimental d'una fórmula de treball mitjançant proves en laboratori amb diversos tipus de betum i dotacions, incloent-hi additius i diferents mètodes de compactació.

La metodologia proposada estableix una alternativa constructiva basada en el reciclatge en fred "in situ" amb emulsió bituminosa tipus III, avaluada també des d'una perspectiva ambiental, contrastant significativament amb les solucions tradicionals adoptades per les administracions responsables de la conservació i el manteniment de carreteres.

Per a dur a terme la implementació pràctica d'aquesta solució, s'ha dissenyat un protocol d'actuació integral. Aquest protocol s'enfoca a demostrar la viabilitat i el potencial del reciclatge en fred amb emulsió bituminosa tipus III proposat, específicament en la rehabilitació del tram PK 48+900 al PK 52+065 de la carretera A-221 a Caspe, Saragossa.

A més de demostrar l'efectivitat d'aquesta tècnica, aquest estudi pioner obri noves possibilitats per a la gestió sostenible d'infraestructures viàries. Fomenta un enfocament més ecològic i estableix un precedent innovador en el manteniment de carreteres, destacant-se com un avanç significatiu en l'enginyeria civil contemporània.

ABSTRACT

There is now a global paradigm shift towards greener and more sustainable practices in all industrial sectors, including civil engineering, where energy efficiency and emissions reduction are key priorities. This movement is driven not only by environmental considerations, but also by the socio-economic repercussions of the COVID-19 pandemic and the objectives of the Next Generation EU Recovery Fund in the European Union, which promote resilient and sustainable economic growth.

A key strategy to achieve these goals is the efficient reuse of materials in bituminous pavements and asphalt pavements, which is internationally recognized for its ability to effectively meet sustainability criteria. Despite significant advances in innovation under the Directorate General of Roads (DGC), the path towards the integral sustainability of the Spanish State Road Network (RCE) is not yet complete.

In this context, the present work focuses on the development and optimization of sustainable technologies for cold in-situ pavement recycling using bituminous emulsion. The study addresses key areas such as the comprehensive analysis of existing literature and the experimental development of an optimal dosage through laboratory tests with various bitumen types, including additives and different compaction methods.

The proposed methodology establishes a construction alternative based on cold recycling "in situ" with bituminous emulsion type III, also evaluated from an environmental perspective, contrasting significantly with the traditional solutions adopted by the administrations responsible for road maintenance and upkeep.

In order to carry out the practical implementation of this solution, a comprehensive action protocol has been designed. This protocol focuses on demonstrating the feasibility and potential of the proposed cold recycling with type III bituminous emulsion, specifically in the rehabilitation of the PK 48+900-PK 52+06 section of the A-221 road in Caspe, Zaragoza.

In addition to demonstrating the effectiveness of this technique, this pioneering study opens up new possibilities for the sustainable management of road infrastructure. It promotes a greener approach and sets an innovative precedent in road maintenance, standing out as a significant advance in contemporary civil engineering.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN	3
RESUM.....	4
ABSTRACT	5
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	14
ÍNDICE DE GRÁFICAS	15
1. INTRODUCCIÓN	16
1.1. ANTECEDENTES	16
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.3. OBJETIVOS.....	20
1.4. ALCANCE.....	21
2. ESTADO DEL ARTE	22
2.1. PAVIMENTOS DE CARRETERAS.....	22
2.2. CONCEPTO DEL RECICLADO DE PAVIMENTO Y SUS TIPOS.....	30
2.3. RECICLADO EN FRÍO	32
2.4. MARCO NORMATIVO Y CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES	38
3. METODOLOGÍA.....	42
3.1. ESTABLECIMIENTO DE LA SOLUCIÓN ALTERNATIVA DEL PROYECTO CONSTRUCTIVO CON RFE III.....	43
3.2. DESARROLLO DE LA FÓRMULA DE TRABAJO.....	63
3.3. EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL.....	81
3.4. DEFINICIÓN DEL PROTOCOLO DE ACTUACIÓN PARA LA APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA SOLUCIÓN.....	91
4. DESARROLLO	93
4.1. ESTABLECIMIENTO DE LA SOLUCIÓN ALTERNATIVA DEL PROYECTO CONSTRUCTIVO CON RFE III.....	93

4.2. FÓRMULA DE TRABAJO	110
4.2.1. ANÁLISIS DE LAS MATERIAS PRIMAS DISPONIBLES.....	110
4.2.2. DISEÑO DE LA FORMULACIÓN A PARTIR DE PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	113
4.2.3. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYO	114
4.3. EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LA ALTERNATIVA PROPUESTA.....	125
4.3.1. DEFINICIÓN DE LAS SOLUCIONES.....	125
4.3.2. CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS	129
4.3.3. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	130
5. PROTOCOLO DE ACTUACIÓN PARA LA APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA SOLUCIÓN	131
5.1. REQUISITOS DE MAQUINARIA Y PERSONAL.....	132
5.2. FASES DE EJECUCIÓN.....	133
5.3. PLAN DE CONTROL Y ENSAYO	137
5.4. VALORACIÓN ECONÓMICA	141
6. CONCLUSIONES	144
REFERENCIAS.....	147
ANEJOS	149
ANEJO 0. CASO DE ESTUDIO.....	151
APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 0 TESTIGOS Y SECCIONES ESTUDIADAS.....	152
APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 0 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRAMO.....	157
ANEJO 1. ESTUDIO PREVIO.....	159
APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 1 INFORMACIÓN DISPONIBLE	160
APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 1 INSPECCIÓN VISUAL	168
APÉNDICE Nº 3 DEL ANEJO 1 GRANULOMETRÍA DE FRESADO	177
APÉNDICE Nº 4 DEL ANEJO 1 CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE	180
APÉNDICE Nº 5 DEL ANEJO 1 CONTENIDO DE AGUA	183
APÉNDICE Nº 6 DEL ANEJO 1 DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD ÓPTIMA.....	185
ANEJO 2. ESTUDIO ESTRUCTURAL.....	188
APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 2 DEFLEXIONES.....	189

APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 2 IRI.....	197
APÉNDICE Nº 3 DEL ANEJO 2 DIAGNÓSTICO PRELIMINAR Y TRAMIFICACIÓN	204
ANEJO 3. ENSAYOS DE LABORATORIO	206
APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 3 SENSIBILIDAD AL AGUA Y DENSIDADES.....	207
APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 3 MÓDULO RESILIENTE A LA TRACCIÓN INDIRECTA	210
ANEJO 4. EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL	220
APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 4 DEFINICIÓN DE LAS SOLUCIONES	221
APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 4 CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS	226
APÉNDICE Nº 3 DEL ANEJO 4 EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	229
ANEJO 5. PROTOCOLO DE ACTUACIÓN.....	232
APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 5 UNIDADES DE OBRA	233
APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 5 FASES DE EJECUCIÓN.....	235
APÉNDICE Nº 3 DEL ANEJO 5 PLAN DE CONTROL Y ENSAYO	237
ANEJO 6. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)	239
PLANOS.....	242
PLANO Nº 1.1 PLANTA DE SITUACIÓN E ÍNDICE DE PLANOS	243
PLANO Nº 1.2 PLANTA GENERAL – DISTRIBUCIÓN DE HOJAS.....	245
PLANO Nº 2 PLANTA GENERAL - ACTUACIONES	247
PLANO Nº 3 SECCIONES TIPO	254

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Reutilización y reciclado de asfalto regenerado en 2022. Fuente: (EAPA, 2022).	19
Figura 2. Estructura del firme de una carretera. Fuente: (Llopis Castelló & Pérez Zuriaga, 2020).	22
Figura 3. Ejemplos de las diferentes tipologías de firmes. Fuente: (Zuriaga & María, n.d.)	23
Figura 4. Transferencia de carga a través de la estructura del pavimento. Fuente: (Wirtgen, 2004).	24
Figura 5. Estructuración típica de pavimentos flexibles. Fuente: (Wirtgen, 2004).....	25
Figura 6. Administración de pavimentos para el mantenimiento y rehabilitación a través del monitoreo de la calidad de rodado. Fuente: (Wirtgen, 2004).	26
Figura 7. Diagrama de la pérdida de calidad de un pavimento durante su vida útil. Fuente: (Orosa et al., 2022).....	27
Figura 8. Mecanismo de movimiento y guía de la cadena del curviametro. Fuente: Euroconsult NT S.A.	28
Figura 9. Rangos del Índice de Regularidad Superficial (IRI). Fuente: Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (MOPT).....	28
Figura 10. Emisiones en la producción de mezcla asfáltica. Fuente: (Galvis, 2021).	29
Figura 11. Clasificación por temperatura. Fuente: (European Asphalt Pavement Association, 2014).	31
Figura 12. Esquema de un equipo de reciclado "in situ". Fuente: CEPESA.	34
Figura 13. Ejemplo de un tren de Reciclado en Frío "In Situ". Fuente: (Orosa et al., n.d.)	34
Figura 14. Tipos de reciclado en frío con emulsión. Fuente: ASEFMA.	35
Figura 15. Dotaciones de emulsión y ligante según el tipo de reciclado. Fuente: ASEFMA.	36
Figura 16. Rangos de los valores del módulo resiliente recomendado según los tipos de reciclado. Fuente: ASEFMA.	37
Figura 17. Estructura metodología general del trabajo. Fuente: Elaboración propia.....	43

Figura 18. Metodología seguida en el estudio previo. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 19. Campaña de extracción de testigos. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 20. Ensayo del evaporador rotatorio según la Norma UNE - EN 12697-3:2013: Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 21. Ensayo penetración. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 22. Ensayo Anillo y bola. Fuente. Elaboración propia.	53
Figura 23. Metodología seguida en el estudio estructural de la obra. Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 24. Planteamiento necesidad específica de rehabilitación. Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 25. Líneas representativas de cada rodada. Fuente: Euroconsult NT.	56
Figura 26. Corrección de temperatura mediante software de visualización. Fuente: Euroconsult NT.	57
Figura 27. Datos para el cálculo de Ch. Fuente: Euroconsult NT.	57
Figura 28. Coeficiente corrector por humedad de la explanada (Ch). Fuente: Euroconsult NT.	57
Figura 29. Criterio de numeración de carreteras y carriles. Fuente: Euroconsult NT.	58
Figura 30. Referencias curviametro. Fuente: Euroconsult NT.	58
Figura 31. Modelo matemático de vehículo utilizado para el cálculo del IRI. Fuente: Euroconsult NT.	59
Figura 32. Criterio numeración de calzadas y carriles. Fuente: Euroconsult NT.	60
Figura 33. Tipos de soluciones de la rehabilitación estructural. Fuente: Norma 6.3 IC: Rehabilitación de firmes.	61
Figura 34. Metodología seguida en el diseño de la formulación a partir de pruebas experimentales. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 35. Utensilios de laboratorio. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 36. Evolución de las distintas fases de mezclado. Fuente: Elaboración propia.	70

Figura 37. Prensa hidráulica del laboratorio utilizada. Fuente: Elaboración propia.	72
Figura 38. Máquina compactadora giratoria y probeta realizada con este método. Fuente: Elaboración propia.	74
Figura 39. Ejemplo del proceso de vacío en el acondicionamiento de probetas húmedas. Fuente: Elaboración propia.	77
Figura 40. Ensayo módulo resiliente según Norma UNE-EN 12697-26. Fuente: Elaboración propia.	79
Figura 41. Metodología seguida para la comparativa medioambiental a partir del software SEVE TP. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 42. Croquis de las fases consideradas en la evaluación medioambiental. Fuente: Seve TP.	83
Figura 43. Menú principal del software SEVE TP utilizado para la evaluación medioambiental. Fuente: SEVE TP.	85
Figura 44. Esquema del proceso de modelado. Fuente: SEVE TP.	90
Figura 45. Tipos de reutilización "in situ" con emulsión existentes en España. Fuente: (MITMA, 2023).	93
Figura 46. Ubicación de Caspe en España. Fuente: Wikipedia.	95
Figura 47. Ubicación de Caspe en la provincia de Zaragoza. Fuente: Wikipedia.	96
Figura 48. Ubicación tramo de estudio. Fuente: Google Earth Pro.	97
Figura 49. <i>Collage</i> fotos testigos carretera A-221. Fuente: Elaboración propia.	99
Figura 50. Croquis de la sección existente. Fuente: Elaboración propia.	100
Figura 51. Husos granulométricos. Cernido acumulado (% en masa) Norma UNE - EN 933-2. Fuente: Artículo 20 PG-4: Reutilización in situ con emulsión de capas de firmes.	101
Figura 52. Tabla 1.A - Categorías de tráfico pesado. Fuente: Norma 6.3 IC: Rehabilitación de firmes.	103

Figura 53. Tabla 1.B - División de las categorías de tráfico pesado T3 y T4. Fuente: Norma 6.3	
IC: Rehabilitación de firmes.	103
Figura 54. División de las subcategorías de tráfico según el Gobierno de Aragón. Fuente:	
"Recomendaciones para el dimensionamiento de firmes de la Red Autonómica Aragonesa".	103
Figura 55. Umbrales del valor puntual de la deflexión patrón para el agotamiento estructural	
en firmes flexibles y semiflexibles. Fuente: Norma 6.3 IC: Rehabilitación de firmes.	104
Figura 56. Materiales para rehabilitación estructural de firmes. Fuente: Norma 6.3 IC:	
Rehabilitación de firmes.....	108
Figura 57. Espesor (cm) de recrecimiento con mezcla bituminosa en firmes flexibles y	
semiflexibles. Fuente: Norma 6.3 IC: Rehabilitación de firmes.	109
Figura 58. Espesor (cm) de recrecimiento con mezcla bituminosa en firmes flexibles y	
semiflexibles con subdivisión de las categorías de tráfico T3 y T4. Fuente: Norma 6.3 IC:	
Rehabilitación de firmes.....	109
Figura 59. Propiedades físicas y químicas del QP FLUX F. Fuente: Química De los Pavimentos,	
QDP.	111
Figura 60. Especificaciones CEPASAASFALT 35/50. Fuente: CEPASA.....	112
Figura 61. Especificaciones CEPASAASFALT 70/100. FUENTE: CEPASA.	112
Figura 62. Especificaciones CEPASAASFALT 160/220. FUENTE: CEPASA.	112
Figura 63. Metodología seguida en el diseño de la formulación mediante pruebas	
experimentales. Fuente: Elaboración propia.....	114
Figura 64. Valores mínimos de resistencia en el ensayo de compresión estática y resistencia	
conservada (UNE - EN 41215). Fuente: Art. 20 del PG-4.	115
Figura 65. Croquis de la solución de reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa III.	
Fuente: Elaboración propia.	125
Figura 66. Croquis de la solución de la obra convencional con dos mezclas bituminosas en	
caliente. Fuente: Elaboración propia.	126

Figura 67. Comparativa del consumo de recursos energéticos totales (MJ). Fuente: Seve TP.	129
Figura 68. Comparativa por escenario y módulo del consumo de recursos energéticos. Fuente: Seve TP.	129
Figura 69. Comparativa de las emisiones de gases de efecto invernadero totales (tCO ₂ eq). Fuente: Seve TP.	130
Figura 70. Comparativa por escenario y módulo de las emisiones de gases de efecto invernadero. Fuente: Seve TP.	130
Figura 71. Inicio del tramo PK 48+900. Fuente: Google Earth Pro.	170
Figura 72. PK 49+000. Fuente: Google Earth Pro.	171
Figura 73. PK 50+000. Fuente: Google Earth Pro.	172
Figura 74. PK 51+000. Fuente: Google Earth Pro.	173
Figura 75. PK 51+500. Fuente: Google Earth Pro.	174
Figura 76. PK 52+000. Fuente: Google Earth Pro.	175
Figura 77. Fin del tramo PK 52+065. Fuente: Google Earth Pro.	176
Figura 78. Comparativa por módulo y escenario del consumo de recursos energéticos (MJ). Fuente: Elaboración propia.	228
Figura 79. Comparativa por módulo y escenario de las emisiones de gases de efecto invernadero (tCO ₂ eq). Fuente: Seve TP.	231

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes de datos de la evaluación medioambiental. Fuente: SEVE TP.....	84
Tabla 2. Caracterización de la muestra de fresado analizada en el laboratorio I. Fuente: Elaboración propia.	101
Tabla 3. Categoría de la acción del tráfico en el tramo estudiado para el año 2024. Fuente: Estación de aforo 0644, red de carreteras autonómicas del Gobierno de Aragón.	102
Tabla 4. Caracterización de la muestra de fresado analizada en el laboratorio II. Fuente: Elaboración propia.	110
Tabla 5. Composición de la mezcla óptima. Fuente: Elaboración propia.	124
Tabla 6. Resultados ensayo UNE 41215. Fuente: Elaboración propia.	124
Tabla 7. Resultados ensayo UNE - EN 12697-26. Fuente: Elaboración propia.....	124
Tabla 8. Materiales utilizados RFE III vs convencional. Fuente: Elaboración propia.....	126
Tabla 9. Equipos de trabajo RFE III vs convencional. Fuente: Elaboración propia.....	127
Tabla 10. Proceso constructivo RFE III vs convencional. Fuente: Elaboración propia.	127
Tabla 11. Aspectos ambientales y logísticos RFE III vs convencional. Fuente: Elaboración propia.	128
Tabla 12. Resultados relación de resistencias a compresión, i/C (%). Fuente: Elaboración propia.	208
Tabla 13. Resultados Resistencia Húmeda, Cw (Kpa). Fuente: Elaboración propia.....	208
Tabla 14. Resultados Resistencia Seca (Kpa). Fuente: Elaboración propia.	208
Tabla 15. Resultados densidad seca (t/m ³). Fuente: Elaboración propia.	209
Tabla 16. Resultados densidad húmeda (t/m ³). Fuente: Elaboración propia.	209
Tabla 17. Grado de relación del TFM con los ODS. Fuente: Elaboración propia.....	240

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Comparativa Emulsión - I/C. Fuente: Elaboración propia.....	115
Gráfica 2. Comparativa Emulsión - Resistencia Húmeda. Fuente: Elaboración propia.....	116
Gráfica 3. Comparativa Emulsión - Resistencia Seca. Fuente: Elaboración propia.....	117
Gráfica 4. Comparativa emulsión - densidad seca. Fuente: Elaboración propia.	117
Gráfica 5. Comparativa emulsión - densidad húmeda. Fuente: Elaboración propia.	118
Gráfica 6. Variación en % del módulo resiliente (4% emul. s/m). Fuente: Elaboración propia.	119
Gráfica 7. Variación en Mpa del módulo resiliente (4% emul. s/m). Fuente: Elaboración propia.	119
Gráfica 8. Variación de la densidad (4% emul. s/m). Fuente: Elaboración propia.....	120
Gráfica 9. Variación en % del módulo resiliente (3,5% emul. s/m). Fuente: Elaboración propia.	121
Gráfica 10. Variación en Mpa del módulo resiliente (3,5% emul. s/m). Fuente: Elaboración propia.	121
Gráfica 11. Variación de la densidad (3,5% emul. s/m). Fuente: Elaboración propia.....	122
Gráfica 12. Valoración económica de la ejecución material de la solución. Fuente: Elaboración propia.	143

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

En este primer apartado se establecen los antecedentes jurídicos e históricos que justifican la realización de este Trabajo Fin de Máster (TFM).

Antecedentes jurídicos

En España, el marco regulador de las enseñanzas universitarias oficiales, establecido por el Real Decreto 822/2021, requiere que los programas de Grado y Máster concluyan con un Trabajo de Fin de Título (TFT). En la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la *Universitat Politècnica de València*, esta exigencia se rige por la Normativa de Trabajos de Fin de Grado y Máster, aprobada el 21 de julio de 2022 por su Consejo de Gobierno. Esta normativa asegura la rigurosidad académica y profesional de los TFTs, garantizando la calidad y relevancia de los trabajos presentados.

Este TFM se enmarca en el proyecto “Desarrollo de herramientas IA (*Deep Learning*) para el diseño y control de nuevas técnicas de fabricación en mezclas bituminosas recicladas en frío (PAVCOOL)” donde el autor ha participado como ingeniero en prácticas en el Departamento de I+D+i de Pavasal Empresa Constructora, S.A., en Quart de Poblet, Valencia. Esta iniciativa innovadora, financiada por la Agencia Valenciana de la Innovación (AVI) a través del Programa de Consolidación de la Cadena de Valor Empresarial para el ejercicio 2023-2025 (INNCAD/2023/113) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), aborda el desarrollo de nuevas tipologías de producción de mezcla asfáltica en frío que reduzcan la huella de carbono actual de las mezclas bituminosas utilizadas en la conservación viaria urbana e interurbana.

El trabajo ha sido elaborado en su totalidad por Jorge Gandía Soriano para la obtención del Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Su título, "Desarrollo de tecnologías sostenibles de reciclado de pavimentos en frío “in situ” para la rehabilitación de carreteras. Aplicación práctica en la carretera A-221, desde el PK 48+900 al PK 52+065, Caspe (Zaragoza)", fue solicitado en junio de 2024 y aprobado por la Comisión Académica de Título (CAT).

Cuenta con la supervisión de David Llopis Castelló, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, como tutor académico, y de Tatiana García Segura, Profesora Titular de Universidad del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil, como cotutora. El trabajo fue entregado y presentado en septiembre de 2024.

Antecedentes históricos

El desarrollo de tecnologías de reciclado de pavimentos ha sido parte de una evolución continua hacia la sostenibilidad en la ingeniería civil a nivel global. Inicialmente implementadas a principios del siglo XX, estas técnicas ganaron relevancia significativa durante la década de 1970, motivadas por la crisis del petróleo, que impulsó la búsqueda de alternativas económicas y sostenibles para la construcción y mantenimiento de carreteras. En Estados Unidos, por ejemplo, la producción de mezclas bituminosas recicladas aumentó de 50.000 toneladas en 1975 a 25 millones de toneladas en 1980.

En España, las primeras experiencias documentadas con el reciclado de pavimentos datan de los años 80, utilizando inicialmente técnicas como el reciclado en planta y el reciclado "in situ" en caliente. Sin embargo, fue en 1991 cuando se llevaron a cabo proyectos significativos que marcaron un hito en la adopción de estas técnicas, incluyendo el reciclado en frío con emulsión bituminosa. Estos proyectos no solo validaron la eficacia de las técnicas de reciclado en frío, sino que también impulsaron el desarrollo de maquinaria especializada por parte de empresas españolas (Asf, 2011).

Según la *National Asphalt Pavement Association* (NAPA) y la *Federal Highway Administration* (FHWA) de Estados Unidos, en 2010 se reciclaron 62 millones de toneladas de mezclas asfálticas para la construcción de nuevos pavimentos en Estados Unidos, con otros 11.2 millones de toneladas destinadas a diversas aplicaciones, como la rehabilitación. En Europa, la Asociación Europea de Pavimentación Asfáltica (EAPA) reportó que en 2020 se produjeron aproximadamente 50 millones de toneladas de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), de las cuales el 76% se recicló para la creación de nuevas mezclas asfálticas y el 20% se utilizó como material granular en estructuras de carreteras (Orosa et al., 2022).

La normativa española actual, especificada en la Orden Ci/Cular 2/2023 del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA, 2023), reconoce varias técnicas de reciclado de pavimentos, entre las que destaca el Reciclado en Frío con Emulsión bituminosa (RFE), reconocido por sus beneficios ambientales al ser aplicado "in situ" para capas asfálticas (Gobierno de España, 2024).

En términos de ejecución práctica, se han llevado a cabo numerosas obras de Reciclado en Frío con Emulsión bituminosa en España a lo largo de las últimas décadas, destacándose proyectos como:

- Carretera regional de Madrid M-204, entre Carabaña y Ambiente (2008).
- Carretera regional de Madrid M-822, entre Loeches y Nuevo Baztán (2005).
- Carretera regional de Murcia CM-412, entre Villanueva de los Infantes y Villahermosa (2000).
- Carretera regional de Huelva A-494, entre Mazagón y Matalascañas, 24 km (1998).
- Carretera regional de Ávila C-501, entre Alcorcón y Plasencia, 15 km (1996).

Estos proyectos no solo evidencian el compromiso de España con la innovación en técnicas de rehabilitación de pavimentos sostenibles, sino que también subrayan el potencial de estas prácticas para mejorar la eficiencia ambiental y económica en la gestión de infraestructuras viales en el país.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, se observa un cambio de paradigma global hacia prácticas más ecológicas y sostenibles en todos los sectores industriales, incluida la ingeniería civil, donde la eficiencia energética y la reducción de emisiones son prioridades clave. Este movimiento es impulsado no solo por consideraciones ambientales, sino también por las repercusiones socioeconómicas de la pandemia COVID-19 y los objetivos del Fondo de Recuperación *Next Generation* EU en la Unión Europea, que enfatizan la transición hacia un crecimiento económico sostenible y resiliente (Galvis, 2021).

A pesar de los avances logrados en la innovación de pavimentos bajo la Dirección General de Carreteras (DGC), el camino hacia la sostenibilidad integral de la Red de Carreteras del Estado español (RCE) aún no se considera completo. Es fundamental mantener el esfuerzo para satisfacer las crecientes demandas de sostenibilidad, integrando nuevos conocimientos y avances tanto a nivel nacional como internacional (Gobierno de España, 2024).

Una estrategia efectiva para lograr estos objetivos es la reutilización adecuada de materiales en los firmes y pavimentos bituminosos, una práctica ampliamente reconocida a nivel internacional por su capacidad para cumplir de manera eficiente y sostenible con los criterios de sostenibilidad. Esta técnica no solo reduce la necesidad de áridos provenientes de canteras, disminuyendo así el impacto ambiental, sino que también reduce la dependencia de betunes derivados del petróleo, mejorando la resiliencia del sector ante posibles crisis de suministro y disminuyendo significativamente el consumo energético en comparación con métodos tradicionales de fabricación de mezclas bituminosas, lo que resulta en menores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En paralelo, las técnicas de reutilización han evolucionado con la incorporación de nuevos equipos y sistemas constructivos. El uso de adiciones más sostenibles junto con tecnologías avanzadas en equipos de fresado como los sistemas 3D, ha mejorado considerablemente la eficiencia y la precisión en la recuperación y retirada de firmes y pavimentos para su reutilización (Asociación Europea de Pavimentación Asfáltica, EAPA, 2022). En respuesta a estos avances, las empresas del sector están centrando sus esfuerzos en el desarrollo de metodologías que cumplen con los rigurosos requisitos ambientales asociados a la producción de mezclas asfálticas. Las investigaciones actuales se concentran en dos aspectos cruciales: la reducción de las temperaturas necesarias para la fabricación de mezclas bituminosas, con el consiguiente ahorro energético, y el aumento de la proporción de material asfáltico reciclado (RAP), obtenido del fresado de pavimentos antiguos y reutilizado en nuevas mezclas.

Aunque presenta ventajas evidentes, el reciclado en frío "in situ" de pavimentos en España sigue siendo limitado. Según datos de la EAPA (2022) (Figura 1), solo el 7% del asfalto recuperado se utilizó en reciclado en frío, mientras que el 66% se destinó a asfalto en caliente, principalmente debido a barreras legislativas, dinámicas del mercado y la necesidad de una mayor difusión y comprensión de estas técnicas. Superar estos desafíos requerirá una colaboración activa y comprometida de todos los actores del sector hacia un desarrollo más sostenible, tomando como ejemplo las prácticas exitosas de otros países europeos con tasas de adopción más altas, que alcanzan hasta el 29%.

Country	Total amount of site-won asphalt generated in 2022 in tonnes	Amount of reclaimed asphalt available to be used by the asphalt industry in 2022 in tonnes	% of available reclaimed asphalt used in							Total Re-use	Total Recycling	Put to Landfill/Other Application/Unknown
			Hot and Warm Mix Asphalt Production	Half Warm Mix Asphalt Production	On-Site Cold Recycling**	Plant Cold Recycling**	Unbound Road Layers	Other Civil Engineering Applications	Put to Landfill/Other Applications/ Unknown			
Austria	1.900.000	800.000	85	0	5	0	10	0	0	90	10	no data
Belgium	1.684.000	1.025.000	100	0	0	0	0	0	0	100	0	0
Croatia	270.000	240.000	42	0	2	19	no data	no data	no data	63	no data	no data
Czech Rep	2.800.000	2.500.000	30	0	15	0	15	10	30	45	25	30
Denmark	1.306.000*	1.106.000	no data	no data	no data	no data	4	no data	no data	96	4	0
France	no data	7.340.000	45	no data	no data	no data	no data	no data	no data	100	0	0
Germany	14.800.000	12.876.000	87	0	0	0	13	0	0	87	13	0
Great Brit	5.814.442	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data	38*	61*	<1*
Hungary	150.000	180.000	10	0	10	74	3	3	0	94	6	0
Ireland	500*	500*	45*	no data	no data	no data	no data	no data	no data	45	no data	no data
Italy	11.000.000*	9.200.000*	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data
Norway	>1.600.000	1.600.000	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data	58	42	0
Romania	34.000*	34.000*	0	0	95	0	5	0	0	95	5	0
Slovenia	305.000	51.000	58	0	9	0	14	9	10	67	23	10
Spain	1.900.000	2.000.000	66	~0	7	~0	24	0	3	73	24	3
Turkey	1.920.400	1.728.360	12	0	0	7	81	0	0	19	81	0

FIGURA 1. REUTILIZACIÓN Y RECICLADO DE ASFALTO REGENERADO EN 2022. FUENTE: (EAPA, 2022).

Por lo tanto, este trabajo propone una metodología integral para estudiar y ejecutar obras de mantenimiento utilizando tecnologías de reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa. Esta propuesta no solo presenta una alternativa viable y sostenible frente a soluciones tradicionales, sino que también contribuye a un sector más responsable con el medio ambiente, promoviendo prácticas de construcción más limpias y eficientes energéticamente.

1.3. OBJETIVOS

El objetivo de este Trabajo de Fin de Máster es desarrollar y optimizar tecnologías de reciclado de pavimentos en frío "in situ" utilizando emulsión bituminosa, con el fin de mejorar la sostenibilidad y eficiencia de las obras de rehabilitación de carreteras. Además, también se busca proporcionar soluciones alternativas a las técnicas tradicionales en caliente, reduciendo considerablemente el impacto ambiental asociado a los métodos convencionales de pavimentación.

Para alcanzar este objetivo, se definen los siguientes objetivos específicos:

1. Estudio exhaustivo de la literatura existente.
2. Estudio de la técnica actual consolidada y desarrollo de la fórmula de trabajo.
3. Establecimiento de una alternativa de proyecto constructivo con Reciclado en Frío con Emulsión bituminosa (RFE).
4. Evaluación medioambiental de la solución propuesta.
5. Definición de un protocolo de actuación para la aplicación práctica de la solución.

En primer lugar, se investigarán métodos innovadores que maximicen la eficiencia del reciclado en frío como técnica consolidada, minimicen el consumo de recursos energéticos y reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero.

En segundo lugar, se analizará la tecnología de reciclado en frío "in situ", conocida como RFE III, identificando sus ventajas y áreas de mejora. Este análisis permitirá adaptar y optimizar la técnica para su implementación más eficiente.

A continuación, se llevará a cabo la formulación de una mezcla asfáltica en frío específica. Se establecerá una fórmula de trabajo que detalle los componentes utilizados y sus proporciones exactas, y se evaluará la metodología para la mezcla de los componentes, asegurando consistencia y calidad en la producción mediante ensayos de laboratorio.

Asimismo, se propondrá una solución alternativa de proyecto constructivo que implemente la tecnología desarrollada, y se realizará un estudio comparativo medioambiental frente a una solución convencional estándar. Para ello, se estudiarán previamente las carreteras CV-668 en Ontinyent (Valencia) y la A-221 en Caspe (Zaragoza) como candidatas para evaluar la viabilidad de aplicar técnicas de reciclado en frío "in situ" en la rehabilitación de tramos específicos.

Por último, se elaborará un protocolo claro y detallado para la aplicación de la técnica seleccionada en el caso de estudio seleccionado, definiendo todas las etapas y pasos necesarios desde la preparación hasta la finalización de la obra. Esto incluirá la identificación de los recursos necesarios para cada etapa del protocolo con el fin de demostrar la viabilidad y el potencial de dicha técnica.

Por tanto, este trabajo integrará la investigación teórica con la aplicación práctica, garantizando que las soluciones desarrolladas sean tanto innovadoras como aplicables en el contexto real de mantenimiento y conservación de carreteras.

1.4. ALCANCE

Para delimitar el alcance del TFM y centrarse en los objetivos planteados, cabe destacar los siguientes aspectos:

- La fórmula de trabajo se centrará únicamente en el reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa tipo RFE III, debido a sus beneficios ambientales frente a otras técnicas. Es decir, la mezcla estará compuesta por un 100% de reciclado.
- La técnica desarrollada se utilizará en un caso particular, demostrando así su potencial para una implementación inmediata por parte de administraciones públicas, empresas privadas y profesionales responsables de la conservación de carreteras. Pese a estudiar su viabilidad en diversas obras, el caso práctico se llevará a cabo para la rehabilitación de la carretera A-221 del PK 48+900 al PK 52+065, en Caspe (Zaragoza).
- No se incluirá la validación del protocolo, debido a que los tiempos de ejecución de la obra no coinciden con el período de redacción del trabajo. No obstante, se proporcionará una base teórica y experimental robusta para su futura implementación.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. PAVIMENTOS DE CARRETERAS

2.1.1. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO Y SU ESTRUCTURA

La capa de rodadura, que constituye la superficie visible de cualquier carretera, es solo la parte superior de una estructura mucho más compleja denominada firme. El firme se compone de múltiples capas de distintos materiales y espesores, incluyendo el pavimento. Su función principal es soportar y distribuir las cargas del tráfico hacia la subrasante, proporcionando una superficie segura y cómoda para la circulación de vehículos (Llopis Castelló & Pérez Zuriaga, 2020).

Estructura del firme

El firme de una carretera generalmente se estructura en tres capas principales. Las dos capas superiores constituyen el pavimento propiamente dicho, que es crucial para garantizar la funcionalidad y seguridad de la vía. La tercera capa, situada en la base, es fundamental para la distribución adecuada de las cargas y la estabilidad estructural de la carretera. Esta organización multicapa, representada en la Figura 2, se detalla a continuación:

- Capa de rodadura: Es la superficie superior que entra en contacto directo con los vehículos. Proporciona características funcionales como la resistencia al deslizamiento y la regularidad superficial.
- Capa intermedia: Actúa como una capa de transición entre la capa de rodadura y la base, distribuyendo las cargas a la capa inferior.
- Capa base: Soporta las presiones del tráfico y distribuye estas cargas a la subbase, evitando que se exceda la capacidad estructural de la misma.

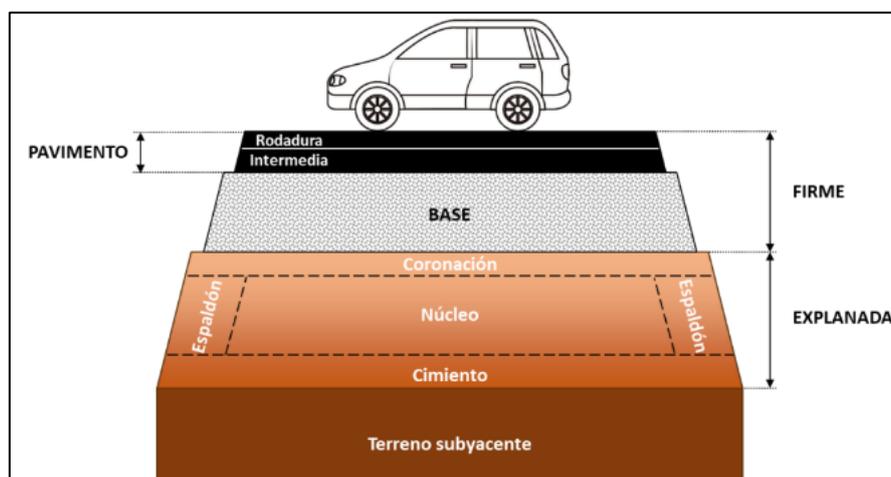


FIGURA 2. ESTRUCTURA DEL FIRME DE UNA CARRETERA. FUENTE: (LLOPIS CASTELLÓ & PÉREZ ZURIAGA, 2020).

Tipos de pavimentos

De acuerdo con la Norma 6.1 IC de Secciones de Firme (Fomento, 2003), los pavimentos de carreteras se clasifican en cuatro tipos principales, cada uno con características y aplicaciones específicas:

- Pavimentos rígidos: Estos pavimentos están formados por una capa gruesa de hormigón de alta resistencia que se apoya sobre una base granular estabilizada. Son conocidos por su capacidad para soportar cargas pesadas y condiciones adversas sin sufrir deformaciones significativas, ofreciendo una larga vida útil con menores necesidades de mantenimiento.
- Pavimentos semirrígidos: Consisten en un pavimento bituminoso de cualquier espesor colocado sobre una o más capas tratadas con conglomerantes hidráulicos de al menos 20 cm de espesor. Combinan las propiedades de los pavimentos rígidos y flexibles, proporcionando una buena resistencia y flexibilidad.
- Pavimentos flexibles: Están contruidos a partir de materiales naturales reforzados con capas superiores unidas por ligantes, como el asfalto o mezclas ligeramente cementadas. Este tipo de pavimento es capaz de distribuir las cargas vehiculares de manera más uniforme y adaptarse mejor a las variaciones térmicas y movimientos del terreno, lo que los hace ideales para diferentes condiciones de tráfico y clima.
- Pavimentos semiflexibles: Son similares a los pavimentos flexibles, pero con un espesor de mezcla bituminosa superior a 15 cm. Ofrecen una mayor resistencia y durabilidad, siendo adecuados para vías con tráfico intenso y pesado.

La Figura 3 presenta un esquema ilustrativo de cada uno de estos tipos de pavimentos, destacando sus estructuras y características principales:

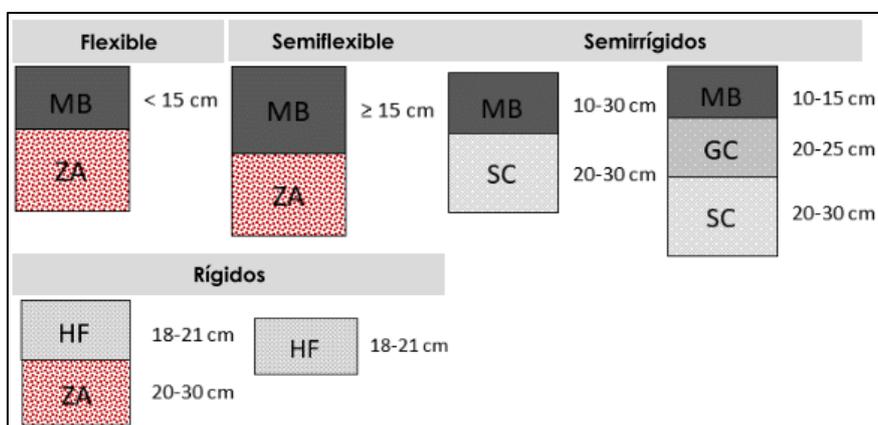


FIGURA 3. EJEMPLOS DE LAS DIFERENTES TIPOLOGÍAS DE FIRMES. FUENTE: (ZURIAGA & MARÍA, N.D.).

En general, solo los pavimentos flexibles, que constituyen alrededor del 90% de las carreteras a nivel mundial según las estadísticas de la EAPA, pueden ser reciclados "in situ". En contraste, los pavimentos rígidos de hormigón tienden a ser demolidos al alcanzar el final de su vida útil (Wirtgen, 2004).

Distribución de cargas en pavimentos flexibles

La estructura de los pavimentos flexibles actúa como un sistema complejo de transferencia de fuerzas generadas por las ruedas de los vehículos. Este proceso resulta en la flexión de la superficie del pavimento, provocando esfuerzos y deformaciones a lo largo de sus diversas capas. Como ilustra la Figura 4, la carga aplicada se dispersa gradualmente dentro del pavimento, distribuyéndose sobre un área más extensa conforme penetra en su estructura.

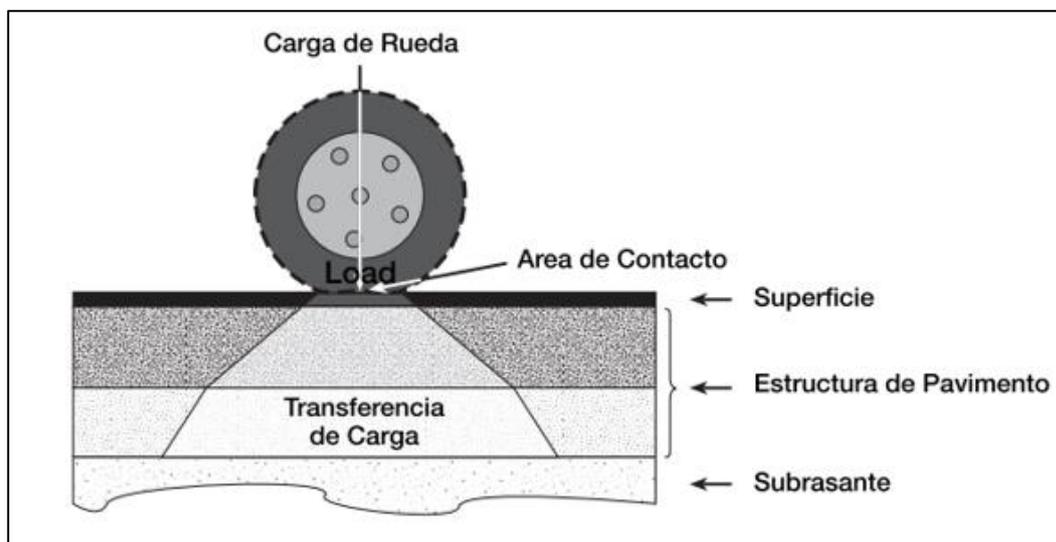


FIGURA 4. TRANSFERENCIA DE CARGA A TRAVÉS DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO. FUENTE: (WIRTGEN, 2004).

La magnitud de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones está directamente influenciada por el tipo de carga y la disposición de los ejes de los vehículos que circulan sobre el pavimento, incluyendo ejes sencillos, duales, tándem y trídem. Estas variables determinan tanto la ubicación como la intensidad de los efectos que impactan la estructura del pavimento, influenciando así su durabilidad y mantenimiento.

Materiales y comportamiento de los pavimentos

Asimismo, los pavimentos flexibles se componen de materiales diseñados para resistir y distribuir eficientemente las cargas del tráfico, como se detalla en la Figura 5. La respuesta de los materiales a las cargas, incluyendo tensiones y deformaciones, depende de sus propiedades elásticas y de la naturaleza de la carga aplicada, como intensidad y presión.

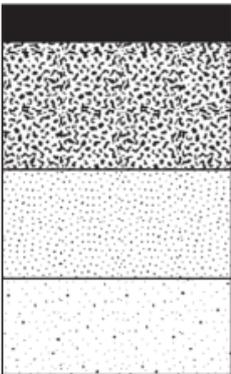
<i>Posición relativa en la estructura</i>		<i>Material de construcción</i>
	Superficie	Asfalto o sello asfáltico
	Base	Mezcla asfáltica/granular estabilizado con asfalto o cemento/granular
	Subbase	Granular estabilizado con asfalto o cemento/granular
	Subrasante	Granular estabilizado con cemento/granular/material in-situ

FIGURA 5. ESTRUCTURACIÓN TÍPICA DE PAVIMENTOS FLEXIBLES. FUENTE: (WIRTGEN, 2004).

Los materiales granulares, como gravas y mezclas bituminosas, cumplen funciones distintas en la transmisión y distribución de cargas a través del pavimento. Las gravas transmiten cargas a través de su estructura granular, manteniendo la cohesión por la fricción entre partículas. Sin embargo, pueden experimentar compactación y deformaciones superficiales bajo cargas repetitivas y condiciones húmedas, como huellas en las zonas de rodadura.

Por otro lado, las mezclas bituminosas se comportan de manera similar a losas, soportando cargas verticales que inducen tensiones de compresión en la parte superior y tensiones de tracción en la inferior. Estas tensiones pueden resultar en fatiga y grietas que se propagan verticalmente con el aumento del tráfico, afectando la vida útil del pavimento.

En algunos casos, se emplean materiales reciclados en capas intermedias del pavimento, lo que no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también puede alterar las propiedades de resistencia y deformación de esas capas, afectando directamente la durabilidad y el mantenimiento requerido. Esta inclusión de materiales reciclados representa una estrategia cada vez más adoptada para mejorar la eficiencia y el rendimiento de los pavimentos flexibles.

2.1.2. MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS

El mantenimiento y la rehabilitación de pavimentos son esenciales para asegurar la seguridad y el confort de los usuarios, así como para preservar la infraestructura vial. Durante su vida útil, el pavimento está expuesto a múltiples factores como el tráfico constante, las condiciones climáticas y el endurecimiento del ligante asfáltico, lo que incrementa su vulnerabilidad al deterioro y puede reducir su nivel de servicio.

El desgaste de los pavimentos es un proceso progresivo que, sin la atención adecuada, puede resultar en un deterioro significativo y costoso. Cuando el daño es avanzado, se requieren rehabilitaciones más extensas o incluso la reconstrucción total del pavimento. Sin embargo, la rehabilitación puede incluir técnicas como el revestimiento o el refuerzo, que consisten en la colocación de una nueva capa sobre la estructura existente del pavimento para devolverle condiciones similares al diseño original (Orosa et al., n.d.).

Para gestionar eficazmente el estado de los pavimentos y optimizar el uso de recursos, se emplean Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS, por sus siglas en inglés), como se muestra en la Figura 6. El PMS facilita la toma de decisiones y la programación de intervenciones de mantenimiento y rehabilitación de manera económica y oportuna. Además, estos sistemas permiten monitorear continuamente la condición del pavimento mediante técnicas de auscultación y evaluación de firmes.

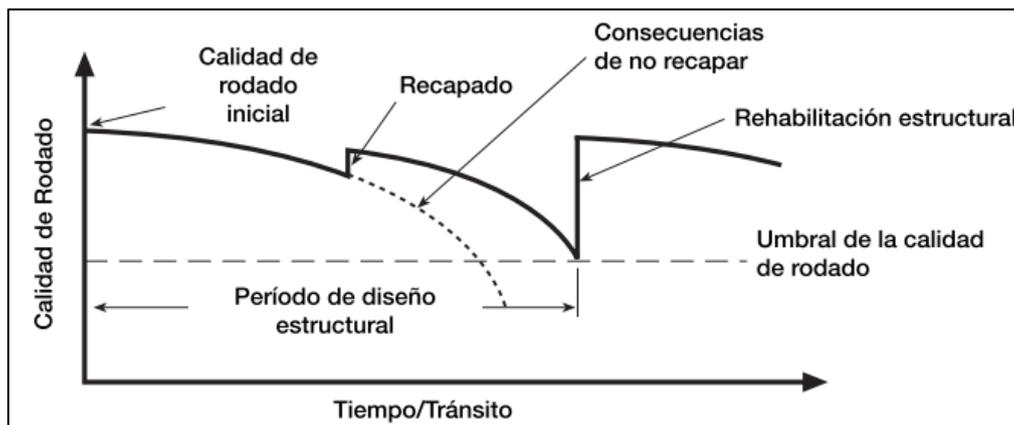


FIGURA 6. ADMINISTRACIÓN DE PAVIMENTOS PARA EL MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN A TRAVÉS DEL MONITOREO DE LA CALIDAD DE RODADO. FUENTE: (WIRTGEN, 2004).

Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es una estrategia proactiva que busca preservar la calidad del pavimento y evitar su rápido deterioro mediante intervenciones planificadas antes de que se produzcan fallos estructurales. Este enfoque incluye actividades como el sellado de grietas, el parcheo de baches, la aplicación de tratamientos de superficie y el refuerzo de capas delgadas. La implementación de estas acciones de manera regular y sistemática ayuda a extender la vida útil del pavimento y reducir los costes a largo plazo.

Aunque las soluciones temporales pueden ser económicamente beneficiosas, posponer la rehabilitación necesaria también puede resultar en un daño significativamente mayor a largo plazo. Cada decisión debe considerar el contexto global de la red vial.

La Figura 7 ilustra cómo el mantenimiento preventivo puede influir positivamente en la durabilidad del pavimento, destacando la importancia de estas prácticas para garantizar su funcionalidad y seguridad a lo largo del tiempo.

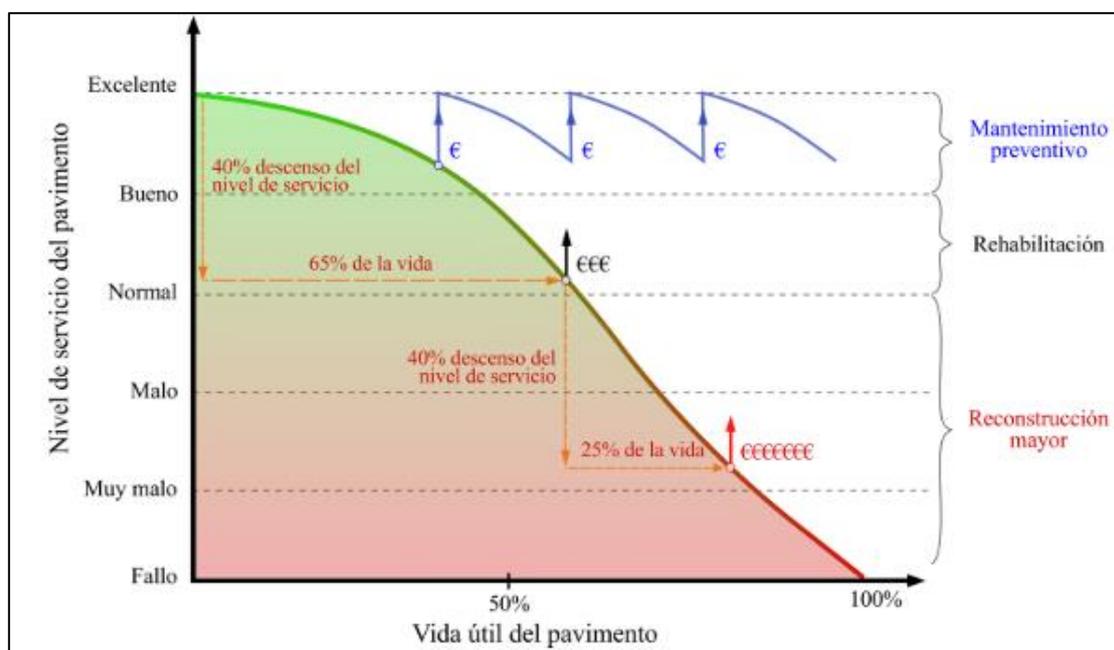


FIGURA 7. DIAGRAMA DE LA PÉRDIDA DE CALIDAD DE UN PAVIMENTO DURANTE SU VIDA ÚTIL. FUENTE: (OROSA ET AL., 2022).

Auscultación y evaluación de firmes

La auscultación y evaluación de firmes es un componente fundamental del mantenimiento preventivo, así como de los PMS. Este proceso permite evaluar el estado del pavimento utilizando diversas técnicas y equipos especializados, proporcionando datos críticos sobre la condición estructural y superficial del pavimento, permitiendo identificar problemas de manera temprana y planificar intervenciones de mantenimiento y rehabilitación de forma precisa y oportuna.

Uno de los equipos más habitual actualmente en la auscultación de firmes es el curviámetro, utilizado para evaluar las características estructurales de los firmes de carreteras, según la norma UNE 41250-4:2016. Este equipo mide las deflexiones del pavimento para identificar tramos con baja capacidad portante y establecer prioridades de refuerzo, a partir de una carga de 130 kN (13 ton) siendo la distancia entre ejes de 5 metros. Montado sobre un camión de dos ejes, el curviámetro funciona como un escáner móvil que recorre la superficie del firme a una velocidad de 18 km/h, recopilando información precisa sobre su estado estructural. La Figura 8 muestra el mecanismo de movimiento y guía de la cadena de un curviámetro.

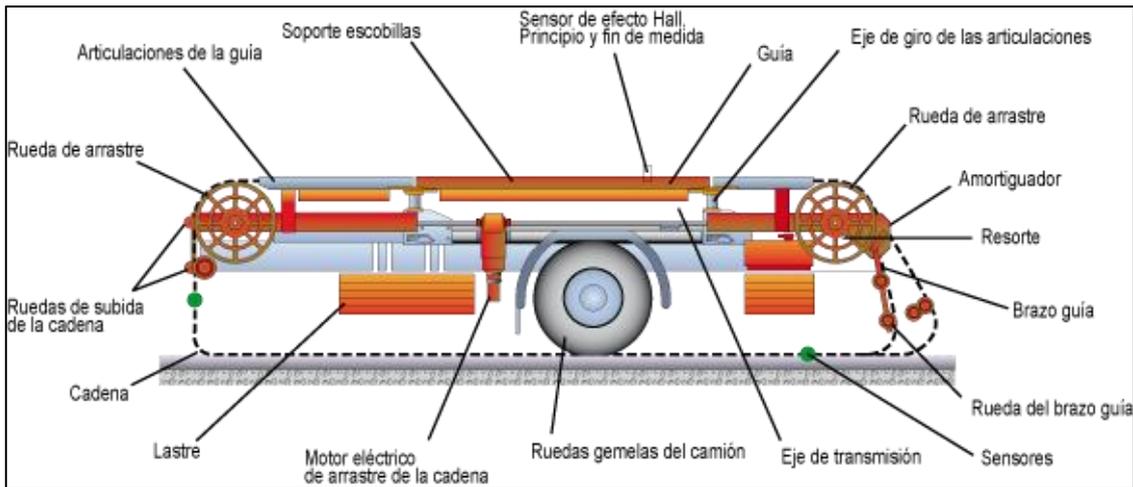


FIGURA 8. MECANISMO DE MOVIMIENTO Y GUÍA DE LA CADENA DEL CURVIAMETRO. FUENTE: EUROCONSULT NT S.A..

Además de la evaluación estructural, la rugosidad del pavimento se cuantifica normalmente mediante el Índice Internacional de Rugosidad (IRI). El IRI mide el movimiento vertical acumulado de la suspensión de un vehículo a 80 km/h dividido por la distancia recorrida, proporcionando una evaluación de la calidad de la superficie del pavimento. Este índice es crucial para determinar la calidad de la conducción, el confort y la seguridad, siendo una de las principales causas de accidentes. Equipos como los perfilógrafos y viágrafos son utilizados para medir esta característica, permitiendo a las agencias de carreteras establecer criterios de garantía de calidad y necesidades de mantenimiento (Peraka y Biligiri et al., 2020). La Figura 9 muestra una clasificación de los valores del IRI medidos cada 100 metros recomendados según si la red estudiada es de alta capacidad o convencional.

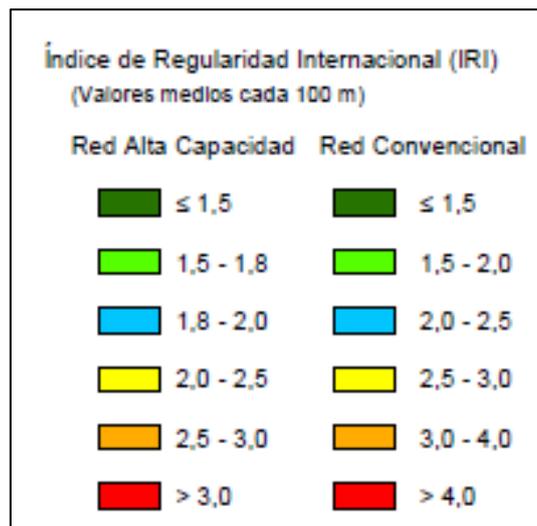


FIGURA 9. RANGOS DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD SUPERFICIAL (IRI). FUENTE: MANUAL DE CARRETERAS DEL MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES DE COSTA RICA (MOPT).

Importancia de un correcto mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos

El mantenimiento y rehabilitación de pavimentos son procesos críticos que implican la obtención, procesamiento, transporte y fabricación de grandes volúmenes de materiales, lo cual conlleva un consumo significativo de energía y la generación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La eficiencia energética varía considerablemente entre los diferentes métodos de rehabilitación y conservación, afectando también la vida útil esperada de los pavimentos.

Es fundamental comparar la vida útil de un pavimento evaluando su consumo energético y las emisiones de GEI asociadas a cada tratamiento de conservación, para entender plenamente su impacto ambiental. Para minimizar tanto el consumo de energía como las emisiones de GEI a lo largo de la vida útil de los pavimentos, es crucial seleccionar tratamientos que requieran menos energía y que al mismo tiempo reduzcan las emisiones de GEI, como los tratamientos preventivos.

Como se observa en la Figura 10, la producción de una tonelada de mezcla asfáltica genera aproximadamente 50 kg de CO₂, siendo los áridos y el asfalto responsables del 42% de estas emisiones totales.

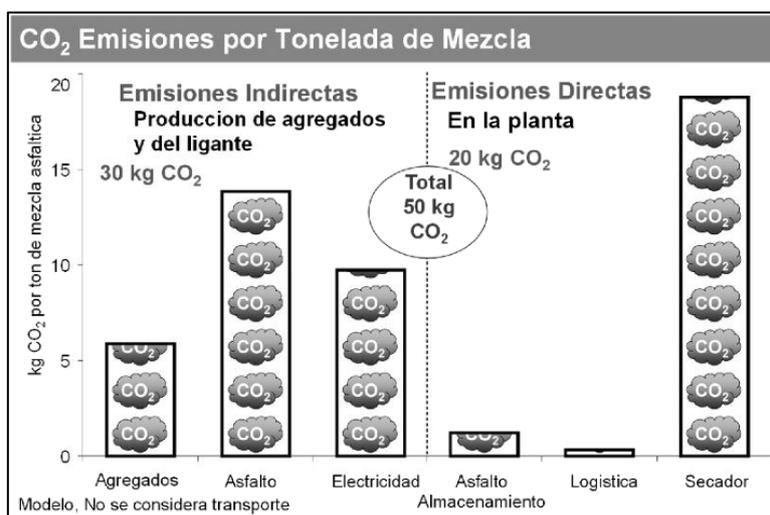


FIGURA 10. EMISIONES EN LA PRODUCCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA. FUENTE: (GALVIS, 2021).

Además, mediante el reciclado o la reutilización de RAP (Material Asfáltico Reciclado), es posible reducir estas emisiones hasta un 42% de inmediato, junto con un ahorro energético de al menos 5,000 MJ por cada tonelada de mezcla producida. Esto subraya la importancia de llevar a cabo el mantenimiento adecuado en el momento oportuno para optimizar los recursos y mitigar el impacto ambiental asociado con la infraestructura vial.

2.2. CONCEPTO DEL RECICLADO DE PAVIMENTO Y SUS TIPOS

El reciclado y la reutilización son fundamentales para conservar los recursos naturales y promover el desarrollo sostenible, reduciendo significativamente el impacto ambiental asociado con la producción y mantenimiento de pavimentos. La industria europea del asfalto reconoce este impacto y se compromete a prolongar la vida útil de sus productos (Galvis, 2021).

La Asociación Europea de Pavimentos Asfálticos (EAPA) impulsa activamente la reutilización y el reciclado del asfalto, definiendo claramente ambos conceptos: la reutilización incorpora el RAP (Material Asfáltico Reciclado) en nuevas mezclas asfálticas manteniendo sus funciones originales, mientras que el reciclado de firmes reintegra materiales de pavimentos demolidos en capas de subbase o relleno para su rehabilitación. Este enfoque no solo reduce los residuos enviados a vertederos, sino que también puede mejorar las propiedades de los pavimentos, siendo una alternativa más sostenible y económica frente a métodos tradicionales como el fresado y reemplazo, así como a la rehabilitación completa (Asf, 2011).

En términos de prácticas globales, Europa lidera en la reutilización del RAP, con más de 4,000 plantas de reciclaje fijas en países como Hungría, Luxemburgo, Austria, Alemania, Holanda y Dinamarca, reutilizando más del 85% del RAP disponible, equivalente a aproximadamente 56 millones de toneladas. En Estados Unidos, donde el 90% de las carreteras están pavimentadas con asfalto, se ha avanzado considerablemente en los últimos cinco años hacia el uso del 99% del RAP generado anualmente, aunque el promedio actual de disponibilidad es del 36% (FHWA, 2011).

A pesar de la percepción negativa inicial en la comunidad de pavimentación de EE. UU. respecto al uso de RAP en nuevas mezclas asfálticas, estudios realizados por la National Center for Asphalt Technology (NCAT) han demostrado que las mezclas con contenido moderado a alto de RAP no presentan una calidad inferior. De hecho, estas mezclas recicladas han demostrado un rendimiento y vida útil equiparables a las mezclas convencionales, según datos de Long-Term Pavement Performance (LTPP) de 18 estados de EE. UU. y provincias canadienses, en términos de capacidad estructural y funcional del pavimento, incluyendo resistencia al ahuellamiento, el agrietamiento por fatiga, el agrietamiento longitudinal, el agrietamiento transversal, el agrietamiento en bloque y la meteorización o desprendimiento (Galvis, 2021).

Tipos de reciclado de pavimentos

La clasificación de las técnicas de reciclado de pavimentos asfálticos suele basarse en la temperatura y el método de aplicación. Restrepo & Stephens (2015) proponen cuatro tipos principales:

- Reciclado en planta en caliente: Este método implica calentar el material asfáltico retirado y mezclarlo con nuevos áridos y ligantes en una planta de producción.
- Reciclado "in situ" en caliente: Similar al anterior, pero realizado directamente en el sitio de la obra, lo que permite una rápida renovación de pavimentos deteriorados con betún caliente y nuevos materiales.
- Reciclado en planta en frío: Utiliza aditivos para mezclar el asfalto retirado con nuevos materiales a temperaturas más bajas en una planta especializada.
- Reciclado "in situ" en frío: Este método se lleva a cabo a temperatura ambiente directamente en la obra, triturando y mezclando el asfalto existente con nuevos materiales y ligantes sin necesidad de calentamiento completo del material.

Además de esta clasificación, existen otras formas de categorizar el reciclado según el tipo de material reciclado, el tipo de ligante utilizado y si se añaden nuevos materiales (Asf, 2011).

El reciclado "in situ" en frío se destaca por su eficiencia energética y su capacidad para realizarse directamente en el lugar de construcción, lo cual optimiza recursos y reduce la interrupción del tráfico durante las obras (ver Figura 11). Eliminar la necesidad de calentar el material es su principal ventaja, permitiendo una ejecución más rápida y menos intrusiva en comparación con otros métodos de reciclado de pavimentos asfálticos.

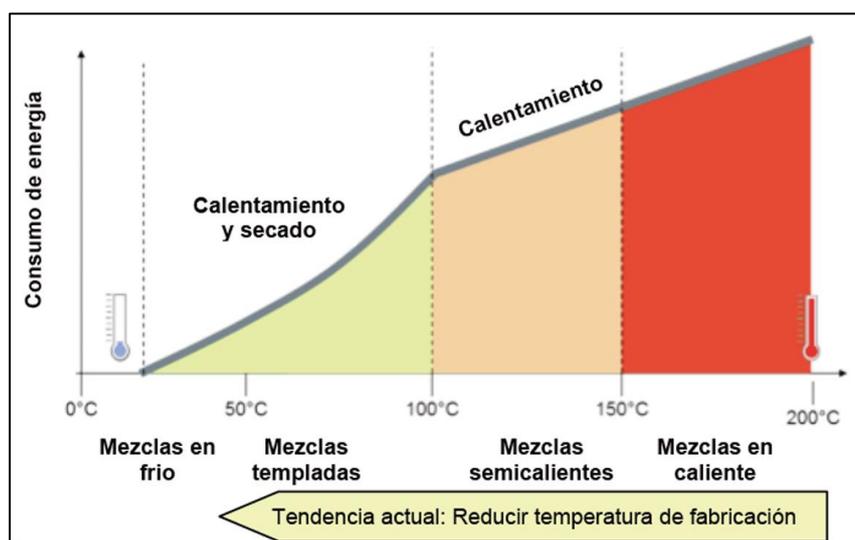


FIGURA 11. CLASIFICACIÓN POR TEMPERATURA. FUENTE: (EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2014).

2.3. RECICLADO EN FRÍO

2.3.1. EL PROCESO DE RECICLADO EN FRÍO

El reciclado en frío, conocido también como Cold Recycling (CR), es una técnica avanzada y prometedora que se alinea con los principios de sostenibilidad y eficiencia energética. Esta metodología destaca por no requerir calor durante su aplicación, permitiendo que el proceso de pavimentación se lleve a cabo a temperatura ambiente. Además, el CR favorece la utilización de RAP en estado sólido dentro de las mezclas recicladas en frío, denominadas Cold Recycled Mixtures (CRM) (Orosa et al., 2022).

La elección de la técnica o método específico para reciclar pavimentos en frío varía según la ubicación y las condiciones del sitio donde se realicen las obras, adaptándose así a las necesidades particulares de cada proyecto. Cuando todas las operaciones se realizan “in situ”, utilizando recicladoras especialmente diseñadas para ello, la técnica se conoce como Reciclado en Frío “In Situ” o Cold In-Place Recycling (CIR), mientras que si los materiales recuperados se transportan a plantas de tratamiento para su uso posterior, la técnica se conoce como Reciclado en Frío en Planta, o Cold Central Plant Recycling (CCPR).

2.3.2. RECICLADO EN FRÍO “IN SITU”

El reciclado en frío “in situ”, introducido por Del Val en 1998, representa una técnica avanzada para rehabilitar pavimentos utilizando los materiales existentes en su ubicación original. A pesar del deterioro que puedan haber experimentado debido al uso y el tiempo, estos materiales pueden ser eficazmente reciclados al mezclarlos con nuevos ligantes como emulsiones bituminosas, agua y aditivos específicos. Esta metodología se destaca como una opción altamente ventajosa en términos de reducción del impacto ambiental, especialmente adecuada para carreteras con un deterioro superficial significativo (Restrepo, H. Stephens, 2015).

Proceso del reciclado en frío “in situ”

El proceso se organiza en varias etapas estructuradas:

- 1. Tramo de prueba:** Comienza con la disgregación controlada de los materiales existentes mediante fresado, ajustando la profundidad y la granulometría según las especificaciones del diseño del tratamiento. Durante este proceso, se verifica la operatividad de la maquinaria y se asegura la precisión en los sistemas de dosificación requeridos para la mezcla de los materiales.

2. **Preparación del sitio:** Comprende la limpieza del área de trabajo, la señalización, y la identificación y marcado de zonas como áreas de trampas y pre-millín, entre otros aspectos esenciales para la seguridad y eficiencia del proceso.
3. **Fresado del pavimento a reciclar:** Utilizando equipos especializados, se realiza un fresado preciso ajustado a las condiciones preestablecidas.
4. **Mezcla y estabilización:** Tras el fresado, se incorpora el ligante más adecuado, asegurando una mezcla homogénea que puede requerir la adición de agua y/o aditivos para facilitar y promover su reacción química. Este proceso integral destaca la importancia de considerar aspectos técnicos, ambientales y económicos antes de iniciar cualquier proceso de reciclado.
5. **Extensión, nivelación y compactación:** Una vez obtenida la mezcla homogénea, se procede al extendido utilizando equipos adecuados como extendedoras para capas de rodadura o motoniveladoras para otras capas. La compactación se realiza con rodillos vibratorios y compactadores neumáticos, garantizando un acabado superior y duradero en la nueva capa.
6. **Curado:** El tiempo de curado varía según el contenido de humedad del material reciclado, así como de la composición de los ligantes.
7. **Aplicación de capa de rodadura:** Finalmente, se coloca una nueva capa de rodadura sobre el pavimento reciclado, que puede ser una mezcla asfáltica en caliente o un tratamiento superficial según las especificaciones del diseño del proyecto.

Previo al inicio del reciclado, es crucial realizar una caracterización exhaustiva del pavimento existente para determinar su espesor, composición y condiciones de deterioro. Este análisis incluye inspecciones visuales detalladas y ensayos técnicos como el análisis de las deflexiones para determinar la fórmula de trabajo óptima, asegurando así la máxima resistencia y durabilidad del pavimento rehabilitado.

El reciclado en frío “in situ” ha evolucionado significativamente con el tiempo, desde equipos iniciales adaptados para fresar y estabilizar suelos hasta modernas recicladoras diseñadas para procesar eficientemente capas gruesas de pavimento en una sola operación. El elemento más importante de estas máquinas es el rotor fresador-mezclador, dotado de numerosas puntas de corte diseñadas para pulverizar eficientemente el pavimento existente. Durante el proceso, el tambor rota, desintegrando el material y mezclándolo con agua suministrada desde un tanque acoplado, logrando así el nivel de humedad óptimo para una compactación efectiva, como muestra la Figura 12.

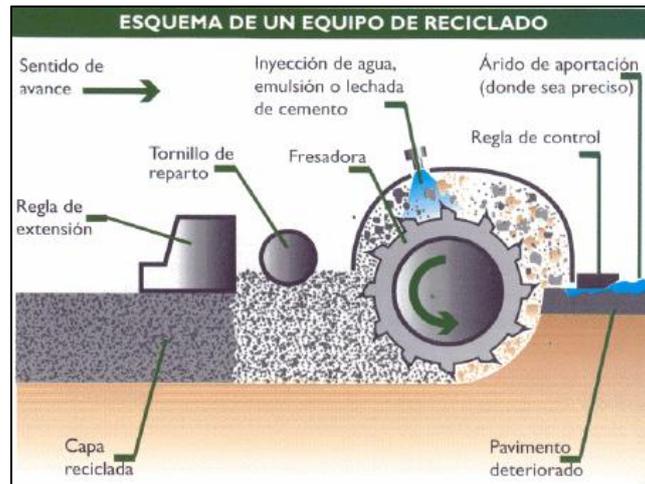


FIGURA 12. ESQUEMA DE UN EQUIPO DE RECICLADO "IN SITU". FUENTE: CEPESA.

La implementación del reciclado en frío "in situ" no solo promueve la sostenibilidad al reutilizar materiales existentes, sino que también minimiza el impacto ambiental asociado con la producción y transporte de nuevos materiales. La coordinación precisa de maquinaria complementaria como compactadores y motoniveladoras, además de la ejecución secuencial conocida como "tren de reciclado", garantiza resultados óptimos y duraderos en la renovación de pavimentos (ver ejemplo Figura 13).

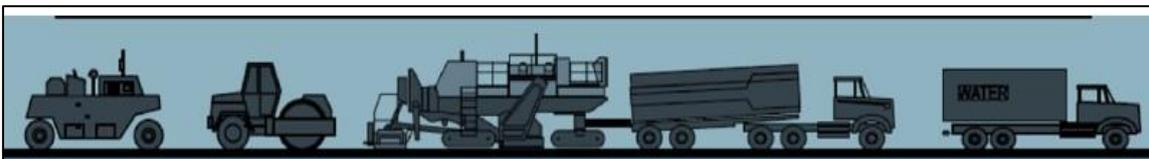


FIGURA 13. EJEMPLO DE UN TREN DE RECICLADO EN FRÍO "IN SITU". FUENTE: PAVASAL.

Ventajas del reciclado en frío "in situ"

En este contexto, las principales ventajas del reciclado en frío "in situ" son:

- ✓ **Económicos:** Se logran ahorros significativos al eliminar la necesidad de transporte y utilizar una recicladora "in situ" en lugar de una planta fija.
- ✓ **Energéticos:** Se reduce el consumo de energía al no calentar materiales y disminuir el transporte, lo que también disminuye las emisiones de CO₂, óxidos de azufre y nitrógeno (GEI's).
- ✓ **Conservación de recursos:** Se usan menos áridos, betún y espacio en vertederos, minimizando la generación de residuos al reutilizar el material fresado en la obra.
- ✓ **Operativos y de seguridad:** Se minimiza la interrupción del tráfico durante la construcción, ya que una sola máquina realiza el fresado, la mezcla con el ligante y la extensión de la mezcla final en una sola pasada.

2.3.3. RECICLADO EN FRÍO CON EMULSIÓN BITUMINOSA

El Reciclado en Frío con Emulsión bituminosa o RFE, según Soto & Peña (2017), es el proceso de crear una mezcla homogénea, extendida y compactada, utilizando material fresado de una o más capas de pavimento existente, con un grosor entre 6 y 12 cm, emulsión bituminosa, agua y, si es necesario, aditivos. Este procedimiento se lleva a cabo a temperatura ambiente. Además, puede llevarse a cabo sin añadir áridos, lo que equivale a una tasa de reciclado del 100%, o con un aporte de áridos en proporciones bajas, generalmente del 10-15%, para ajustar la granulometría. Las tecnologías de reciclado “in situ” con emulsión, son soluciones alternativas a las operaciones de fresado y reposición, compitiendo con éstas desde el punto de vista técnico, económico y medioambiental (James W, Elston D, 2020).

Tipos de reciclado en frío con emulsión bituminosa

La Figura 14 presenta los diferentes tipos de reciclado en frío con emulsión bituminosa disponibles actualmente, destacando sus principales características en cuanto al tipo de material reciclado, tipo y dotación de la emulsión a emplear, espesores mínimos y objetivos.

Reciclado en frío con emulsión				
		Tipo I	Tipo II	Tipo III
Material reciclado del firme existente		Capa bituminosa (< 4/5 cm) + base granular	Capa bituminosa (5-10 cm) + base no bituminosa (>50% "negro")	Mezclas bituminosas
Emulsión (60% B. Res.)	Tipo	Emulsión de betún blando (70/100 ó 160/220)	Emulsión de betún blando o regenerante	Emulsión de betún blando o regenerante
	Dotación	(4-7%)	(3-5%)	(2,5-4%)
Espesor de reciclado		8-12cm	8-12cm	6-12cm
Objetivo		Mejora de las características mecánicas o geométricas del firme existente	Idem tipo I y, eventualmente, regeneración del ligante existente	Reciclado y regeneración del ligante existente

FIGURA 14. TIPOS DE RECICLADO EN FRÍO CON EMULSIÓN. FUENTE: ASEFMA.

Entre los diferentes tipos de RFE, destaca el Tipo III, que incorpora el 100% de los materiales reciclados del firme existente, siempre mezclas bituminosas. Este método es particularmente adecuado para carreteras de tráfico medio o pesado que presentan problemas de fatiga, desprendimiento de capas y envejecimiento del pavimento. Utiliza una emulsión de efecto regenerante en proporciones del 2,5-4%, lo cual permite recuperar las propiedades adhesivas y cohesivas del pavimento. Los tratamientos se realizan en espesores de 6 a 12 cm, asegurando así una capa suficiente para soportar el tráfico y prolongar la vida útil de la carretera.

Las emulsiones de betún y sus componentes

Las emulsiones bituminosas son mezclas homogéneas de betún y agua, donde el betún se dispersa en partículas finas de unos pocos micrómetros mediante un molino coloidal, facilitado por tensoactivos que evitan la coalescencia de las gotas de betún. Esta combinación puede ser ajustada con aditivos como fluidificantes y retardantes de endurecimiento, adaptándola para diversas aplicaciones y mejorando sus propiedades específicas (Technical Association for Bituminous Emulsions (ATEB), 2018).

Sus componen son:

- El betún y el agua.

El betún constituye entre el 50% y el 70% del volumen total de la emulsión bituminosa y desempeña un papel crucial en la cohesión del material reciclado y su comportamiento inicial bajo el tráfico. Los tipos de betún varían según su penetración, siendo los grados 70/100 y 160/220 los más comúnmente empleados debido a su dureza relativa. Por su parte, el agua actúa como fase continua en la que se dispersan los componentes del betún, incluidos tensoactivos y agentes saponificantes que aseguran la estabilidad de la emulsión.

- El emulsionante y los aditivos.

Los emulsionantes, también conocidos como tensoactivos, son esenciales para mantener la separación de las fases de agua y betún a lo largo del tiempo, evitando la coagulación de las gotas de betún. Además, ciertos aditivos como los fluidificantes se utilizan para controlar la viscosidad y mejorar la penetración del betún, lo que resulta crucial para definir las propiedades finales de la emulsión y ampliar sus aplicaciones. En España, las emulsiones catiónicas son predominantes, ofreciendo rápida adherencia y versatilidad en diversas condiciones climáticas.

La Figura 15 muestra las recomendaciones para la dotación de una emulsión que contiene un 60% de betún residual y el ligante sobre el % total en peso del material a reutilizar.

Tipo de reciclado	Emulsión al 60% B. res.		Ligante	
	(% en peso sobre material a reutilizar)		(% en peso sobre material a reutilizar)	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.
RFE-III	2,5	4	1,5	2,4
RFE-II	3	5	1,8	3
RFE-I	4	7	2,4	4,2

FIGURA 15. DOTACIONES DE EMULSIÓN Y LIGANTE SEGÚN EL TIPO DE REICLADO. FUENTE: ASEFMA.

Dimensionamiento por métodos analíticos

El dimensionamiento por métodos analíticos para el Reciclado en Frío con Emulsión (RFE) enfrenta desafíos significativos debido a la falta de valores de referencia y criterios de fatiga establecidos en la normativa actual. Esta carencia dificulta la validación estructural precisa y la exploración de alternativas viables para optimizar el rendimiento de esta técnica. Además, la limitada experiencia y aplicación del RFE en proyectos de rehabilitación de carreteras en España ha resultado en una escasez de datos sobre su comportamiento estructural a nivel nacional.

Para superar estas limitaciones, es crucial adoptar un enfoque empírico en el dimensionamiento. Esto implica comparar el rendimiento del RFE con secciones de nueva construcción o mediante el uso de coeficientes de equivalencia reconocidos. Estos métodos permiten verificar que los resultados obtenidos sean coherentes con las mejores prácticas respaldadas por la experiencia acumulada, como los catálogos de secciones y el método de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

En términos prácticos, cuando no se disponga de datos de laboratorio específicos y fiables, se pueden emplear los valores de módulo recomendados que se indican en la Figura 16 como referencia inicial para el dimensionamiento del RFE. Estos valores proporcionan una guía útil para estimar la rigidez estructural necesaria basada en condiciones típicas de campo y características del material reciclado.

Tipo de reciclado	Módulo dinámico E (MPa)	Módulo de Poisson ν	Observaciones
RFE-I	1.200-1.800	0.35	Valores a alcanzar tras la maduración
RFE-II	1.500-2.500	0.35	
RFE-III	2.500-3.500	0.35	

FIGURA 16. RANGOS DE LOS VALORES DEL MÓDULO RESILIENTE RECOMENDADO SEGÚN LOS TIPOS DE RECICLADO. FUENTE: ASEFMA.

Además, estudios como el realizado por Kim et al. (2011) han documentado incrementos significativos en la rigidez de los materiales reciclados con emulsión a medida que se produce el curado, con valores típicos oscilando entre 1000 kPa y 3000 kPa. Estas investigaciones son fundamentales para comprender mejor el comportamiento a largo plazo de las capas tratadas con RFE y para optimizar los diseños de rehabilitación de carreteras basados en evidencia científica robusta.

2.4. MARCO NORMATIVO Y CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES

La regulación de firmes y pavimentos bituminosos ha experimentado una notable evolución en las últimas dos décadas, impulsada por el progreso en la experiencia y el entendimiento de su comportamiento, así como por la cooperación con países de la Unión Europea en la estandarización de normativas. Se ha dado especial énfasis a la reutilización de mezclas bituminosas y a la integración de sus técnicas en la rehabilitación o construcción de nuevas capas de firme bituminoso.

El cambio normativo comenzó con la OC 5/2001, que modificó aspectos del PG-3 y fue seguido por la creación del PG-4 con la OC 8/2001, centrada en el reciclado de firmes. Posteriormente, las Órdenes FOM/3459/2003 y FOM/3460/2003 establecieron las normas para la rehabilitación y secciones de firmes.

La ORDEN FOM/3459/2003 (BOE del 12/12/2003), aprobó la **Norma 6.3-IC “Rehabilitación de firmes”** de la Instrucción de Carreteras y establece los criterios para seleccionar y proyectar la solución idónea de rehabilitación de firmes de carreteras (Ministerio de Fomento, 2003).

Se aplica a los estudios y proyectos de rehabilitación superficial o estructural de los firmes de las carreteras en servicio, incluyendo especificaciones técnicas y medidas necesarias para el cumplimiento de la legislación ambiental, de seguridad y salud, y de almacenamiento y transporte de mercancías peligrosas.

La prescripción de obligatoriedad de estudiar técnica y económicamente los materiales reciclados de firmes y pavimentos de esta norma, indica textualmente que *“Por consideraciones medioambientales y de reutilización de los materiales existentes en los firmes y pavimentos, en aquellas actuaciones cuya superficie de rehabilitación sea superior a setenta mil (70.000) m², se deberá considerar el empleo de las técnicas de reciclado, con las limitaciones y prescripciones que figuran en el anejo que acompaña a esta Orden”*.

En el apartado 7.2 de la norma, Actuaciones de rehabilitación estructural, entre las soluciones que se citan se hace referencia en primer lugar a la *“eliminación parcial y reposición del firme existente, incluyendo el reciclado de los materiales de acuerdo con lo expuesto en el apartado 7.4”*. En este apartado 7.4 de la norma se comentan los Criterios de aplicación de las técnicas de reciclado de firmes, indicando que se deben tener en cuenta las limitaciones y prescripciones que se mencionan a continuación:

- *“En carreteras con categoría de tráfico pesado T00 no se podrán utilizar en ningún caso materiales reciclados”.*
- *“En carreteras con categoría de tráfico pesado T0 no se podrán utilizar en ningún caso las técnicas de reciclado in situ en frío (con emulsión bituminosa o con cemento). Únicamente se podrán emplear mezclas bituminosas en caliente recicladas en central en el recrecimiento de arcenes, siempre que sobre ellas se disponga posteriormente como mínimo una capa de rodadura. También podrá ser aplicable este último tipo de material reciclado en capas de reposición en calzada cuando sobre ellas se coloquen capas de recrecimiento con mezclas bituminosas en caliente en un espesor total mínimo de 10 cm”.*
- *“En carreteras con categoría de tráfico pesado T1 se podrán utilizar las mezclas bituminosas en caliente recicladas en central en los mismos supuestos indicados para carreteras con categoría de tráfico pesado T0, considerando, en este caso, que sobre las capas de reposición con mezclas bituminosas recicladas en central deben colocarse capas de recrecimiento con mezclas bituminosas en caliente en un espesor total mínimo de 6 cm. Además podrán emplearse mezclas bituminosas recicladas in situ con emulsión bituminosa en arcenes cuando sobre este material se disponga como mínimo una capa de rodadura. También podrá ser aplicable este último tipo de material reciclado en capas de reposición en calzada cuando sobre ellas se coloquen capas de recrecimiento con mezclas bituminosas en caliente en un espesor total mínimo de 8 cm”.*
- *“Para carreteras con categorías de tráfico pesado T2 a T4, incluidas las vías de servicio no agrícolas de autovías y autopistas, podrán utilizarse todas las técnicas de reciclado indicadas, así como el reciclado in situ con cemento, con la condición de disponer sobre cualquiera de ellas, como mínimo, una capa de mezcla bituminosa en caliente del tipo densa D o semidensa S”.*

Más tarde, la Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre (B.O.E. de 3 de enero de 2015), en su apartado 542.2.3.1 (MEZCLAS BITUMINOSAS TIPO HORMIGÓN BITUMINOSO, MATERIALES, Áridos, Características generales) introdujo que:

“En la fabricación de mezclas bituminosas para capas de base e intermedias, podrá emplearse el material procedente del fresado de mezclas bituminosas en caliente, según las proporciones y criterios que se indican a continuación:

- *En proporción inferior o igual al quince por ciento ($\leq 15\%$) de la masa total de la mezcla, empleando centrales de fabricación que cumplan las especificaciones del epígrafe*

542.4.2 (Central de fabricación) y siguiendo lo establecido en el epígrafe 542.5.4 (Fabricación de la mezcla) de este artículo.

- En proporción superiores al quince por ciento (> 15%) y hasta el sesenta por ciento (60%) de la masa total de la mezcla, siguiendo las especificaciones establecidas al respecto en el artículo 22 vigente del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras, PG-4.
- En proporciones superiores al sesenta por ciento (>60%) de la masa total de la mezcla, será preceptiva la autorización expresa de la Dirección General de Carreteras. Además se realizará un estudio específico en el Proyecto de la central de fabricación de mezcla discontinua y de sus instalaciones especiales, con un estudio técnico del material bituminosos a reciclar por capas y características de los materiales, que estarán establecidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares”.

Además, en el apartado 542.1 (DEFINICIÓN) se indica que en la fabricación de mezclas de alto módulo no se podrá “emplear en ningún caso materiales procedente de fresado de mezclas bituminosas en caliente en proporción superior al 15% ($\leq 15\%$) de la masa total de la mezcla”.

Aunque, la actualización más significativa en la normativa vigente es la Orden Ci/Cular 40/2017, que reemplazó a la OC 8/2001 y actualizó las directrices sobre el reciclado de firmes, permitiendo un mayor uso de material reciclado y alineando las prácticas con las normas europeas armonizadas, incluyendo la obligatoriedad del marcado CE en los materiales reutilizados.

Sin embargo, la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento ha emitido una nueva Orden Ci/Cular 2/2023 con el fin de promover decisivamente el uso de técnicas de reutilización en la fabricación de mezclas bituminosas, en lugar de las soluciones tradicionales. Esta orden actualiza y destaca las novedades en los artículos del **Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4)**, específicamente:

- **Artículo 20: Reciclaje “in situ” con emulsión para capas asfálticas.**
- Artículo 21: Reciclaje “in situ” con cemento para bases de carreteras.
- Artículo 22: Reciclaje en caliente y semicaliente en plantas para capas asfálticas.

Estas actualizaciones contribuirán a mejorar el comportamiento ambiental del sector, reducir la huella de carbono y fomentar la innovación en la reutilización de capas de firmes.

Análogamente, la reutilización de los materiales de firmes promueve la conservación de recursos naturales y reduce la necesidad de espacio en vertederos públicos. Durante el proceso, es crucial evaluar la composición de estos materiales para detectar y gestionar cualquier elemento que pueda ser perjudicial para el medio ambiente.

En este contexto, la **Ley 7/2022**, de 8 de abril, **sobre residuos y suelos contaminados para una economía ci/Cular**, ha reemplazado a la Ley 22/2011. Dicha legislación, la quinta en la serie de leyes de residuos de España, también anula la Orden MAM/304/2002. Orden por la que se publica las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la famosa Lista Europea de Residuos (LER), que incluía las mezclas bituminosas en el capítulo 17, “Residuos de construcción y demolición” :

- 17 03 01 Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla.
- 17 03 02 Mezclas bituminosas distintas de las especificadas en el código 17 03 01.

El propósito de la ley es minimizar los impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana derivados de la gestión de residuos, contribuyendo así a la lucha contra el cambio climático, la protección de los océanos y el establecimiento de los principios de la economía ci/Cular. Esto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 12, 13 y 14 de la Agenda 2030 y busca crear empleo sostenible, especialmente en áreas relacionadas con la reutilización y el reciclaje (BOE, 2022).

Aunque existen pocos estudios sobre el impacto ambiental de estos residuos, investigaciones en EE. UU. y Francia sugieren que no representan un riesgo ambiental significativo. No obstante, se recomienda precaución debido a posibles contaminantes en los materiales o emisiones de gases durante el tratamiento en plantas. El laboratorio francés LCPC está investigando dichas emisiones.

En España, el proyecto Fénix, concluido en enero de 2011, se centró en el desarrollo de nanomateriales activos para la reducción de gases de combustión y la promoción de centrales energéticamente eficientes (In et al., 2015).

3. METODOLOGÍA

En este apartado se detalla la metodología seguida durante el desarrollo de las diferentes áreas clave que componen el presente Trabajo Fin de Máster.

Primero, se ha realizado un exhaustivo análisis de la literatura existente para conocer el estado actual de la investigación sobre técnicas y métodos disponibles para la reutilización eficiente de mezclas bituminosas en frío. El objetivo de este análisis es aplicar los conocimientos adquiridos en el desarrollo de tecnologías que sistematicen la ejecución de obras de reciclado en frío "in situ", presentándose como una alternativa a las metodologías normalmente establecidas por las administraciones responsables de la conservación de carreteras.

Posteriormente, se ha llevado a cabo el desarrollo del proyecto, que constituye el principal objetivo de este trabajo académico. Este desarrollo se ha estructurado en cuatro fases, que se detallarán a continuación:

1. Establecimiento de una solución alternativa de proyecto constructivo con RFE.
2. Desarrollo de la fórmula de trabajo.
3. Comparativa medioambiental frente a una solución convencional.
4. Definición del protocolo de actuación para la aplicación práctica de la solución.

La naturaleza de la técnica requiere un enfoque personalizado. Por ello, las dos fases iniciales de planificación y diseño se han realizado de manera paralela, una vez seleccionado el caso de estudio con el fin de optimizar los recursos y garantizar la efectividad de la solución. En cambio, las etapas tres y cuatro se han centrado en demostrar la viabilidad técnica y económica de la solución propuesta, demostrando sus beneficios medioambientales frente a una solución convencional.

Los resultados de los tres primeros puntos se incluyen a lo largo del capítulo 4, "Desarrollo". Sin embargo, el protocolo se ha incluido en el capítulo 5.

Para ofrecer una comprensión completa de todas las actividades realizadas en el desarrollo de este trabajo, se presenta en la Figura 17 un esquema que abarca todos los pasos. Esta representación visual proporciona una visión panorámica, facilitando la identificación de las interrelaciones entre las diferentes etapas y ayudando a visualizar el seguimiento general del proceso de trabajo.

A continuación, se describen en profundidad las diferentes etapas.

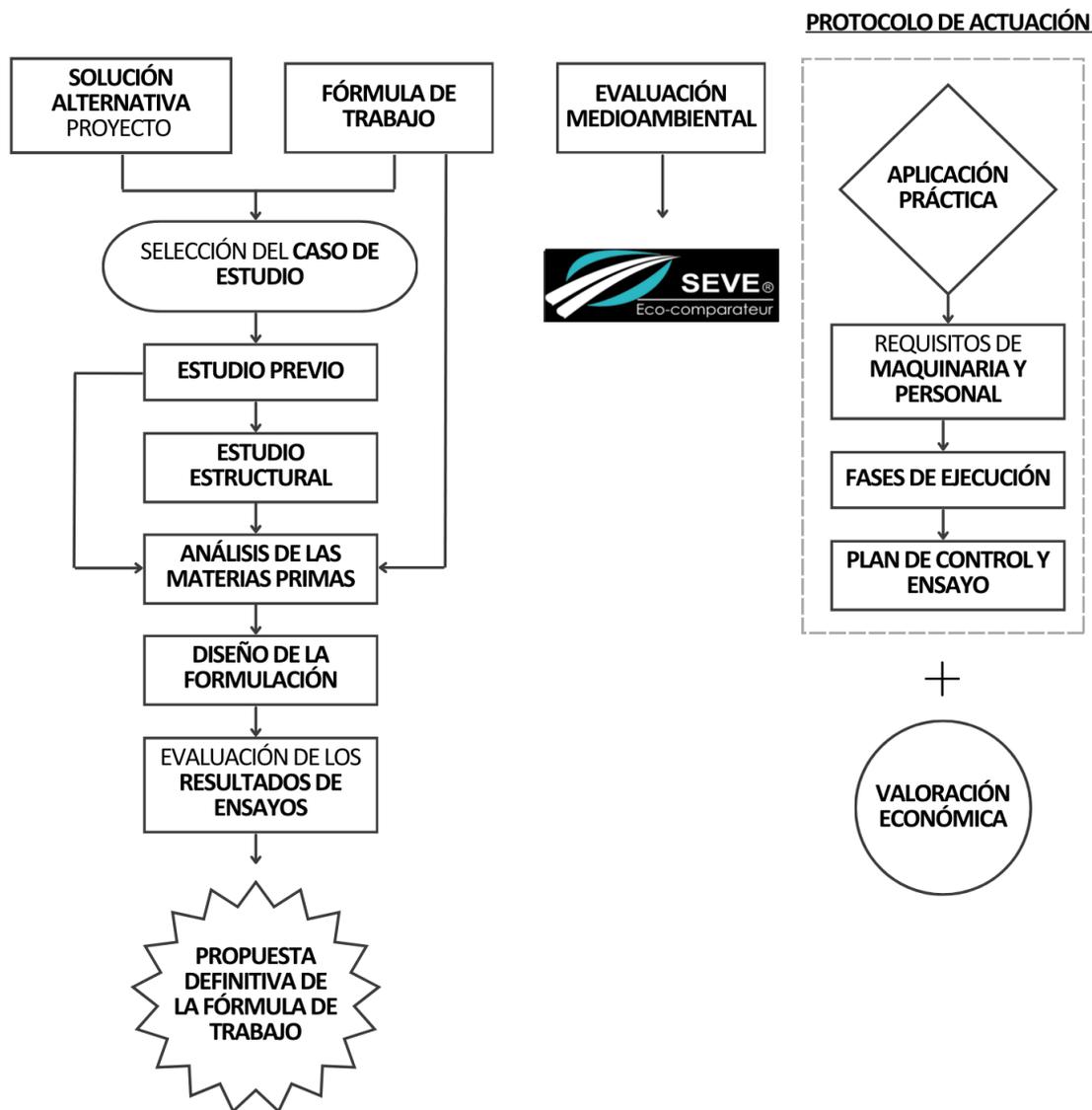


FIGURA 17. ESTRUCTURA METODOLÓGICA GENERAL DEL TRABAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

3.1. ESTABLECIMIENTO DE LA SOLUCIÓN ALTERNATIVA DEL PROYECTO CONSTRUCTIVO CON RFE III

En esta primera fase, se ha realizado un estudio preliminar de las obras, analizando la posibilidad de aplicación de técnicas de reciclado en frío considerando factores como el estado del pavimento, el volumen de tráfico y las condiciones climáticas, entre otros. Una vez establecida la viabilidad del caso de estudio, se ha llevado a cabo un estudio previo y un estudio estructural riguroso para determinar el estado actual del firme y de su nivel de agotamiento, así como la necesidad específica de rehabilitación. Se ha propuesto una solución alternativa al método convencional mediante reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa tipo III. Para ello, se han tenido que realizar las actividades que se enumeran a continuación.

3.1.1. SELECCIÓN Y VIABILIDAD DEL CASO DE ESTUDIO

El planteamiento inicial del trabajo considera las carreteras CV-668 en Ontinyent (Valencia) y la A-221 en Caspe (Zaragoza) como candidatas para evaluar la viabilidad de aplicar técnicas de reciclado en frío "in situ" en la rehabilitación de tramos específicos. Sin embargo, tras una primera inspección de la superficie, se han extraído testigos y una muestra representativa de los materiales presentes en ambas carreteras. Esto ha permitido una evaluación preliminar del espesor y del tipo de material presente en cada una de las capas, siendo fundamental para seleccionar el caso de estudio según las directrices del Artículo 20 de la Orden Ci/Cular 2/2023 del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA, 2023), así como para establecer posteriormente la fórmula de trabajo.

3.1.2. ESTUDIO PREVIO DE LA OBRA

En el estudio previo de la obra, se han realizado diversas tareas con la intención de obtener una comprensión detallada de la situación antes de proceder con la formulación de la mezcla. Estas actividades han sido fundamentales para recopilar datos relevantes, desarrollar una estrategia efectiva y planificar las siguientes etapas del proyecto. Sin embargo, el foco principal del estudio previo ha sido identificar potenciales tramos homogéneos para la implementación de las técnicas de rehabilitación.

La Figura 18 muestra un croquis del procedimiento empleado.

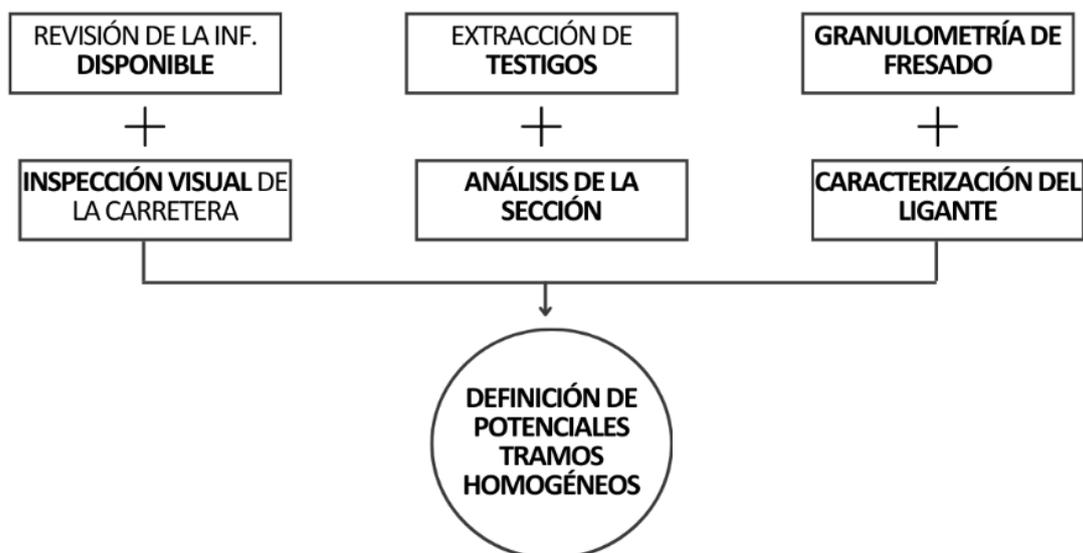


FIGURA 18. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL ESTUDIO PREVIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Revisión de la información disponible e inspección visual de la carretera

Para empezar, se ha llevado a cabo un estudio introductorio de la situación que incluye una extensa búsqueda y análisis de la información disponible, como informes técnicos y otros documentos relevantes, además de una inspección visual de la carretera con el fin de obtener información complementaria sobre el estado del firme y las condiciones de la obra.

La revisión exhaustiva de la información disponible incluye datos relevantes sobre:

- Características generales de la carretera:
 - ✓ Longitud total de la carretera.
 - ✓ Localización del tramo.
 - ✓ Tipología y clasificación de la vía.
 - ✓ Tipo de red vial.
 - ✓ Titular y gestor de la carretera.
 - ✓ Sector de conservación y explotación al que pertenece.
- Características específicas del tramo y entorno:
 - ✓ Orografía de la zona.
 - ✓ Naturaleza del tramo.
 - ✓ Perfil longitudinal del tramo.
 - ✓ Características geométricas de la plataforma.
 - ✓ Tipo de relieve.
 - ✓ Condiciones climatológicas de la zona.
- Características del firme existente y estado del pavimento:
 - ✓ Naturaleza y espesor de las capas del firme.
 - ✓ Inspección visual.
- Solicitaciones del tráfico:
 - ✓ IMD y IMD-p.
 - ✓ Tramo de concentración de accidentes.
- Otros:
 - ✓ Catálogo de la Red Autónoma de Carreteras de Aragón.
 - ✓ Plan General de Carreteras de Aragón 2013 - 2024.
 - ✓ “Recomendaciones Técnicas para el dimensionamiento de firmes de la red autonómica aragonesa”.
 - ✓ “Manual Buenas Prácticas Medioambientales carreteras de Aragón”.
 - ✓ “Recomendaciones Plan de Control de Calidad de Materiales en Carreteras”.

Para ello, se ha recurrido principalmente a la web de la Red de Carreteras Autonómicas del Gobierno de Aragón, que proporciona una amplia gama de información sobre sus carreteras, incluyendo un visor en línea muy útil (<https://gob-aragon.maps.arcgis.com/>). Además, se han consultado otras fuentes de información como la Estación Meteorológica Caspe Plana del Pilón de AEMET, la estación de aforo 0644 situada en el cruce EF - Caspe de la carretera A-221, el software Google Earth Pro y el visor del Sistema de Información Geográfica Nacional (<https://signa.ign.es/signa/>).

En cuanto a la inspección visual de la carretera, se ha llevado a cabo mediante fotografías obtenidas con Google Earth Pro de abril de 2024 complementadas con observaciones "in situ" por parte de técnicos colaboradores.

Extracción de testigos y análisis de la sección

La extracción de testigos se ha realizado previamente para evaluar la viabilidad de aplicar técnicas de reciclado en frío "in situ" en la rehabilitación de las dos carreteras estudiadas inicialmente. Una vez que se ha determinado el caso de estudio definitivo, los testigos han sido utilizados para analizar la sección del firme existente, incluyendo la naturaleza y composición de las diferentes capas.

La extracción se ha efectuado mediante una sonda sacatestigos de tipo convencional, como se muestra en la Figura 19.



FIGURA 19. CAMPAÑA DE EXTRACCIÓN DE TESTIGOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Granulometría de fresado y caracterización del ligante

Tal como exige el Artículo 20 de la Orden Ci/Cular 2/2023, sobre la muestra de material fresado se ha verificado la homogeneidad del material recuperado a lo largo de todo el tramo y se han realizado ensayos de laboratorio para determinar el análisis granulométrico, el contenido de ligante residual, la penetración y el punto de reblandecimiento.

La muestra analizada se ha obtenido a partir de una fresadora convencional similar a la máquina planificada para la ejecución de la obra, asegurando de este modo la correcta preparación del material para su reutilización.

Granulometría Norma UNE-EN 933-1:

El análisis granulométrico del fresado se ha completado siguiendo la metodología de la Norma UNE-EN 933-1:

1. Preparación de la muestra.

Primero, se ha reducido la muestra con la intención de obtener una porción de ensayo cuyo tamaño debe ser superior al mínimo especificado.

Después, se ha secado la porción en la estufa a una temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ hasta conseguir una masa constante. Se ha dejado enfriar y se ha pesado, registrando su masa como M1.

2. Procedimiento de lavado.

El proceso de lavado ha consistido en colocar la porción de ensayo en un recipiente y añadir agua suficiente para cubrirla. Se debe agitar la muestra vigorosamente para obtener la completa separación y suspensión de los finos.

Seguidamente, se han mojado ambos lados del tamiz de 0,063 mm y se ha colocado un tamiz de guarda (por ejemplo, de 1 mm) encima del tamiz de 0,063 mm.

A continuación, se ha vertido el contenido del recipiente sobre el tamiz superior y se ha continuado con el lavado hasta que el agua que fluya a través del tamiz de 0,063 mm sea clara.

Por último, se ha secado el residuo retenido por el tamiz de 0,063 mm a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ hasta obtener una masa constante, se ha dejado enfriar, se ha pesado y se ha registrado su masa como M2.

3. Procedimiento de tamizado.

Tras el lavado de la muestra, se han utilizado los tamices de ensayo adecuados para el tamaño de las partículas a analizar. Dichos tamices deben se han colocado en orden decreciente de tamaño de abertura.

Se ha vertido la muestra seca sobre el tamiz superior y se ha tamizado manualmente hasta que no pasa más material por los tamices. Durante este paso es fundamental registrar la masa de material retenido en cada tamiz.

4. Registro de pesos.

De esta manera, se han anotado los valores de los pesos para cada uno de los tamaños de abertura utilizados en el ensayo.

5. Cálculo y expresión de resultados.

Para dar por finalizado el ensayo, se ha calculado el porcentaje de masa acumulada que pasa por cada tamiz, redondeando al número decimal más próximo para el tamiz de 0,063 mm y al número entero más próximo para los otros tamices.

Análogamente, se ha redactado el informe del ensayo en el que se indican algunos datos relevantes como, por ejemplo, la identificación de la muestra y del laboratorio, la fecha de recepción de la muestra, el nombre y la localización de la fuente de la muestra, la fecha del ensayo, etc.

Contenido de ligante residual Norma UNE-EN 12697-1:

El ensayo del contenido de ligante en el fresado extraído según la norma UNE-EN 12697-1:2013 se resume en varios pasos clave. A continuación, se detallan los pasos, instrumentos y/o herramientas empleados en este proceso.

1. Preparación de la muestra.

Primero, se ha preparado la muestra de fresado obtenida conforme a las directrices establecidas para asegurar la representatividad y homogeneidad.

2. Determinación del contenido de ligante.

Cabe destacar que, este ensayo se basa en la extracci3n del ligante de la mezcla bituminosa a partir de un disolvente adecuado. En este caso, se ha utilizado percloroetileno.

Por un lado, se ha pesado la muestra y se ha colocado en el extractor. Por otro lado, se ha a1naddido el disolvente correspondiente y se ha llevado a cabo la extracci3n.

Una vez extraído el ligante, se ha separado la materia mineral mediante centrifugaci3n.

Por ulti3mo, se ha medido la cantidad de ligante recuperado mediante el m3todo de c3lculo por masas, con ayuda de una b3scula de precisi3n (Figura 20).

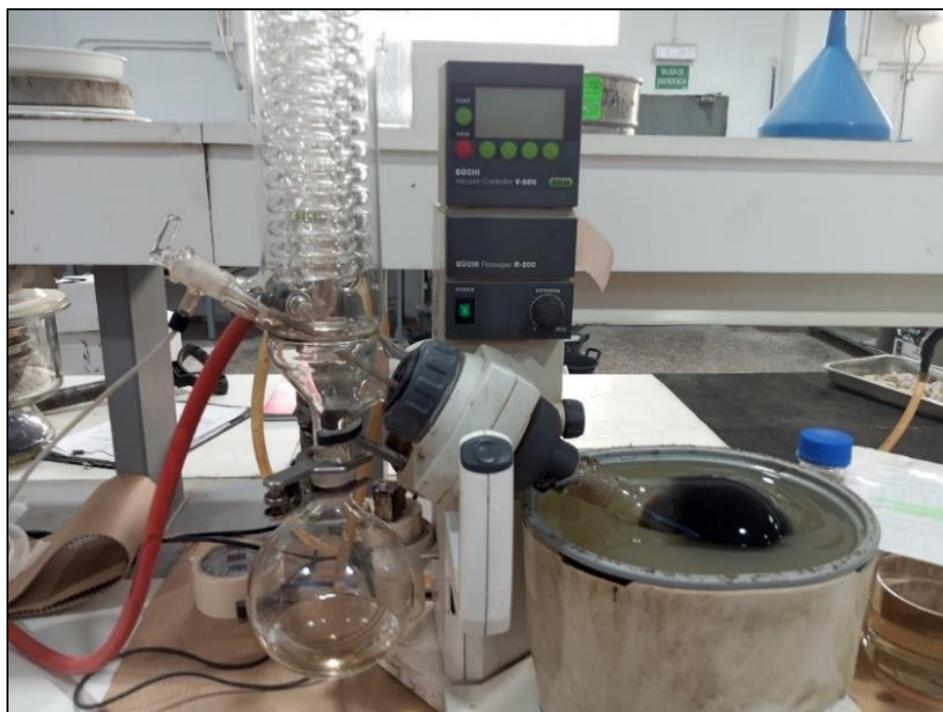


FIGURA 20. ENSAYO DEL EVAPORADOR ROTATORIO SEGUN LA NORMA UNE - EN 12697-3:2013: FUENTE: ELABORACI3N PROPIA.

3. Secado hasta masa constante.

Seguidamente, se ha colocado el residuo en la estufa a la temperatura especificada hasta alcanzar una masa constante eliminando cualquier traza de disolvente.

4. C3lculo y expresi3n de resultados.

Tras obtener el ligante por recuperaci3n parcial por masas, se ha expresado el resultado en porcentaje de ligante respecto a la masa total de la muestra.

Para finalizar el ensayo, se han registrado todos los datos obtenidos, incluyendo las condiciones específicas de prueba y cualquier observación relevante.

Además, en el informe se han indicado todos los detalles necesarios para la interpretación de los resultados, tales como el tipo de muestra, el método de extracción utilizado, la cantidad de disolvente empleado, y otros parámetros de prueba.

Penetración Norma UNE - EN 1426:

Para determinar la consistencia del betún residual extraído a temperatura ambiente de acuerdo con el ensayo anterior, se ha realizado el ensayo de penetración según las directrices de la Norma UNE - EN 1426.

1. Preparación de la muestra.

En primer lugar, se ha tomado una muestra representativa de acuerdo con la Norma UNE - EN 58. Posteriormente, se ha verificado que la homogeneidad de la muestra y que esté libre de contaminantes, según la Norma EN 1425. Finalmente, se ha transferido a un recipiente adecuado y se ha calentado a una temperatura entre 80 ° C y 90 ° C por encima del punto de reblandecimiento esperado, conforme a la Norma EN 1427.

2. Llenado del recipiente.

En segundo lugar, se ha llenado el recipiente con la muestra caliente hasta un nivel que, al enfriarse a la temperatura del ensayo, queda al menos 10 mm por encima de la profundidad esperada de penetración de la aguja.

3. Preparación de la muestra.

A continuación, se ha colocado la muestra y el recipiente en un bato termostático a 25 ° C.

4. Determinación de la penetración.

Para determinar la penetración, se ha colocado la muestra en el penetrómetro, se ha ajustado el dispositivo manualmente de manera que la aguja toque la superficie de la muestra, se ha dejado caer la aguja bajo su propio peso (100 g) durante un tiempo de 5 segundos y se ha medido la profundidad de penetración en décimas de milímetro, tal como muestra la Figura 21.



FIGURA 21. ENSAYO PENETRACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

5. Pruebas sucesivas.

Se han realizado al menos tres determinaciones válidas con agujas distintas de forma que cada punto de penetración esta al menos a 10 mm del borde del recipiente y separado unos de otros por al menos 10 mm.

6. Finalización del ensayo.

Una vez terminado el ensayo, las agujas se han limpiado con disolvente y se ha calculado la media aritmética de las determinaciones válidas para expresar los resultados en el informe correspondiente.

Punto de reblandecimiento del ligante recuperado Norma UNE-EN 1427:

La metodología seguida en el ensayo realizado según la Norma UNE-EN 1427:2015 - Determinación del punto de reblandecimiento - "Método del anillo y bola" ha sido la siguiente:

1. Preparación y conservación de la muestra.

Inicialmente, se ha tomado una muestra del ligante de acuerdo con la Norma EN 58, adoptando todas las medidas de seguridad necesarias y asegurándose de que la muestra de ensayo es representativa de la muestra de laboratorio de la que se obtiene.

Seguidamente, se ha preparado la muestra del ligante de ensayo de acuerdo con la Norma UNE-EN 12594.

Primero, se han calentado los dos anillos de latón a una temperatura no superior a 100 ° C por encima del punto de reblandecimiento esperado y se han colocado sobre la placa de vertido tratada con un agente antiadherente.

Después, se ha vertido una cantidad de producto caliente en cada uno de los anillos, con un ligero exceso, y se han dejado enfriar a temperatura ambiente durante al menos 30 minutos.

Una vez enfriadas las muestras, se ha recortado el exceso de producto con una espátula o cuchillo calientes para que cada muestra quede perfectamente enrasada con el borde superior de su anillo.

2. Método y resultados.

El equipo empleado incluye dos anillos de latón, una placa de vertido metálica, dos bolas de acero inoxidable, guías de centrado de las bolas, un baño, y un agitador.

El baño se ha realizado con agua a (25 ± 1) ° C.

Antes de llevar a cabo el ensayo, se han calibrado todos los equipos para asegurar la presión y fiabilidad de los resultados.

3. Procedimiento de ensayo.

Por último, se ha colocado el anillo en el equipo montado y se ha observado el momento en que la bola toca la placa de fondo como muestra la Figura 22. El ensayo se ha completado teniendo en cuenta el límite temporal de 4 horas después del vertido de las muestras.



FIGURA 22. ENSAYO ANILLO Y BOLA. FUENTE. ELABORACIÓN PROPIA.

Los resultados obtenidos se han anotado, incluyendo alguna observación, respecto al comportamiento del ensayo.

Para finalizar el estudio previo con toda la información recopilada y analizada, se han identificado los potenciales tramos homogéneos en la carretera, los cuales serán verificados en el siguiente estudio estructural. La agrupación de las secciones se ha fundamentado en datos sobre el estado del firme, tipo de materiales, etc.

Esta clasificación ha permitido realizar un análisis más detallado de las necesidades específicas de cada tramo, asegurando que las intervenciones de rehabilitación propuestas sean adecuadas y eficaces.

3.1.3. ESTUDIO ESTRUCTURAL DE LA OBRA

Una vez identificados los tramos con características similares, se ha llevado a cabo el análisis estructural de la obra siguiendo las instrucciones de la Norma 6.3 IC: Rehabilitación de Firmes. Este procedimiento se ha desglosado en las diferentes etapas expuestas en el croquis de la Figura 23.

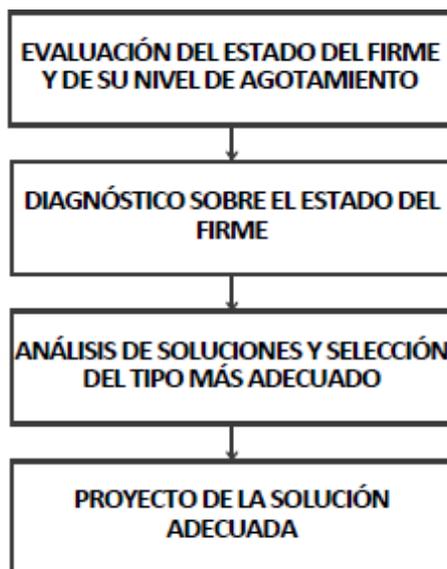


FIGURA 23. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL ESTUDIO ESTRUCTURAL DE LA OBRA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Previo a la determinación de la solución más adecuada, ha sido fundamental establecer la necesidad específica de rehabilitación de la carretera.

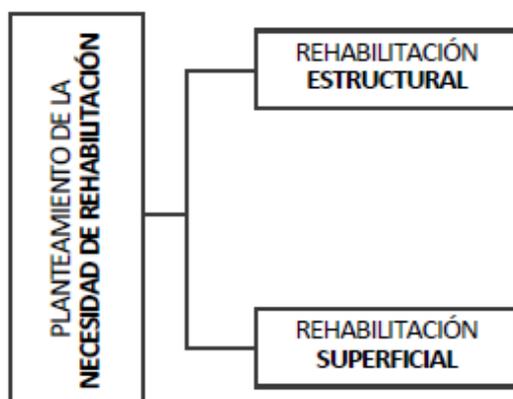


FIGURA 24. PLANTEAMIENTO NECESIDAD ESPECÍFICA DE REHABILITACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Evaluación del estado del firme y de su nivel de agotamiento

La evaluación del estado del firme existente ha sido esencial para establecer el diagnóstico que ha permitido seleccionar y proyectar la actuación de rehabilitación más adecuada en cada uno de los tramos homogéneos en que se divide el tramo de carretera en estudio.

Dicha evaluación ha requerido estudiar los siguientes aspectos clave:

- ✓ Tipo de firme existente.
- ✓ Categoría de tráfico pesado.
- ✓ Auscultación del firme.

En lo referente a la auscultación del firme, se ha llevado a cabo utilizando equipos avanzados que proporcionan información precisa y cuantitativa sobre sus características resistentes. Por una parte, se han empleado dispositivos que evalúan la capacidad estructural del firme mediante la medición de la deflexión. Por otra parte, para evaluar la regularidad superficial, se ha utilizado el Índice de Regularidad Internacional (IRI), que aporta datos complementarios cruciales para la auscultación sistemática a nivel de red. La metodología seguida en cada caso se explica a continuación.

Evaluación de la medida de las deflexiones en firmes de carretera Norma UNE-EN 41250-4:2016:

El ensayo para la medición de deflexiones y radios de curvatura en la capa de rodadura del firme ha sido llevado a cabo por la empresa Euroconsult Nuevas Tecnologías S.A., utilizando un equipo de auscultación curviámetro. Este procedimiento se realizó a finales de diciembre de 2023, siguiendo la solicitud de PAVASAL, sin que se reportaran incidencias reseñables.

El ensayo ha consistido en los siguientes pasos:

1. Equipo de medida y componentes utilizados.

Se ha empleado el equipo de auscultación curviámetro de última generación. Este equipo está montado en un camión de dos ejes con un eje trasero gemelo lastrado con una carga ajustable entre 80 y 130 kN. Además, incluye sensores de alta sensibilidad y un software especializado para registrar y procesar las deflexiones y radios de curvatura de manera exacta.

2. Proceso de toma de datos.

El procedimiento de medición ha consistido en:

- i. Disponer longitudinalmente el curviámetro para medir la curvatura de la deformada producida en el pavimento, siendo proporcional a la aceleración del movimiento vertical.
- ii. Realizar una integración en el espacio para calcular la pendiente y la amplitud de la deformada.
- iii. Colocar amplificadores-moduladores cerca de los geófonos para evitar distorsiones por ruidos eléctricos o mecánicos.
- iv. Transmitir y modular las señales de los geófonos por el mismo conducto eléctrico a frecuencias diferentes para diferenciar las señales individuales.

- v. Utilizar un sistema de adquisición de datos para recibir y demodular las señales de los sensores.
- vi. Realizar medidas continuas para evaluar las condiciones de la carretera.

Dichas medidas se han completado en intervalos regulares de 5 metros y a una velocidad constante de 5 m/s (18 km/h) sobre la línea representativa de la rodada derecha, según el esquema de la Figura 25.

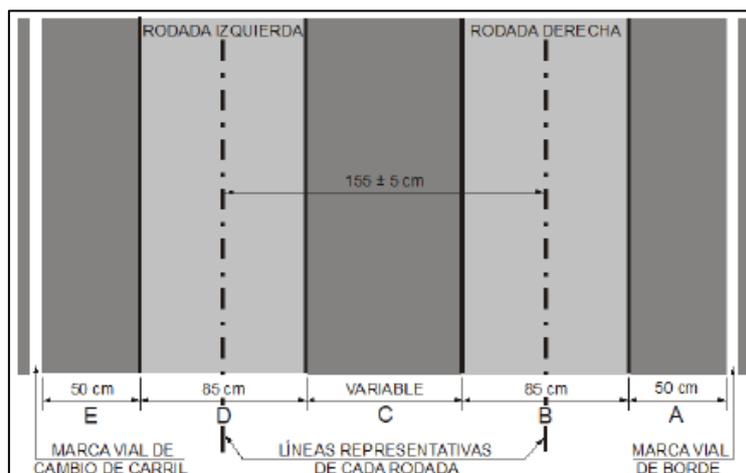


FIGURA 25. LÍNEAS REPRESENTATIVAS DE CADA RODADA. FUENTE: EUROCONSULT NT.

3. Adquisición de datos y corrección.

Una vez se ha finalizado el proceso de medición, se ha determinado la deformada del firme en cada punto, corrigiendo los valores por temperatura y humedad:

- Corrección por temperatura:

Se ha calculado el coeficiente de corrección por temperatura del pavimento bajo la hipótesis de “Firmes con pavimento poco fisurado y espesor de mezcla bituminosa ≥ 10 cm”:

$$Ct = \frac{200}{3t+140} \quad 1. \text{ COEFICIENTE DE CORRECCIÓN POR } T^{\circ} \text{ PARA FIRMES } \geq 10 \text{ CM (CT).}$$

donde;

- t es la temperatura del pavimento, en grados Celsius.

No obstante, el software de visualización de resultados empleado “VISOR MULTIPARÁMETRO” permite cambiar los criterios utilizados para definir este coeficiente, recalculando de forma automática los coeficientes de corrección por temperatura en cada punto de medida (ver Figura 26).

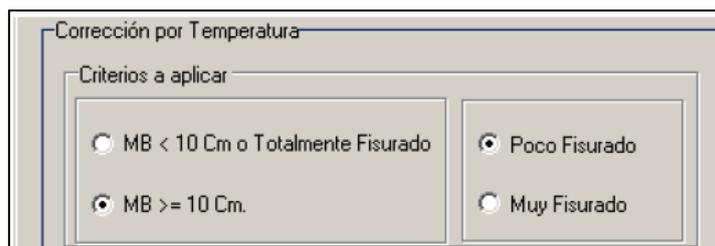


FIGURA 26. CORRECCIÓN DE TEMPERATURA MEDIANTE SOFTWARE DE VISUALIZACIÓN. FUENTE: EUROCONSULT NT.

- Corrección por humedad:

Se ha determinado el coeficiente de corrección por humedad considerando el tipo de explanada existente, las condiciones de drenaje y el nivel de precipitación anual similar al del área donde se encuentra el tramo de estudio, así como la precipitación registrada durante el mes de referencia para definir el periodo (húmedo, intermedio, seco). La Figura 27 muestra los datos utilizados en el cálculo.

Estación meteorológica facilitada por AEMET		Zaragoza Valdespartera
Meses de referencia	Medida 4 - 13 de diciembre de 2023	1ª quincena noviembre 2ª quincena octubre
Precipitaciones en mm	1ª quincena noviembre	16,44 mm
	2ª quincena octubre	33,6 mm
Zona con nivel de precipitación anual semejante (según Figura 4 del Anejo 3: Guía para el estudio de las deflexiones en firmes de pavimento bituminoso)		Zona 6

FIGURA 27. DATOS PARA EL CÁLCULO DE CH. FUENTE: EUROCONSULT NT.

Al no disponer de un estudio específico de variación de la deflexión con la humedad de la explanada, y partiendo de la hipótesis de que la explanada está constituida por suelos de tipo A-1, se ha adoptado un factor corrector de 1. La Figura 28 ilustra este enfoque.

		Coeficiente corrector en suelos estabilizados S-EST3, seleccionados y adecuados.	
Zona con nivel de precipitación anual semejante para la estimación de los periodos húmedo, intermedio y seco (según Tabla 14 del Anejo 3: Guía para el estudio de las deflexiones en firmes de pavimento bituminoso)	Medida del 4-137/12/2023	Período húmedo (>30 mm)	1,00

FIGURA 28. COEFICIENTE CORRECTOR POR HUMEDAD DE LA EXPLANADA (CH). FUENTE: EUROCONSULT NT.

4. Almacenamiento y análisis de datos.

Los resultados de las deflexiones han sido procesados y analizados estadísticamente para identificar patrones de deformación y áreas críticas de deterioro del firme. El criterio seguido en la numeración de carriles y calzadas es el mostrado en el esquema de la Figura 29.

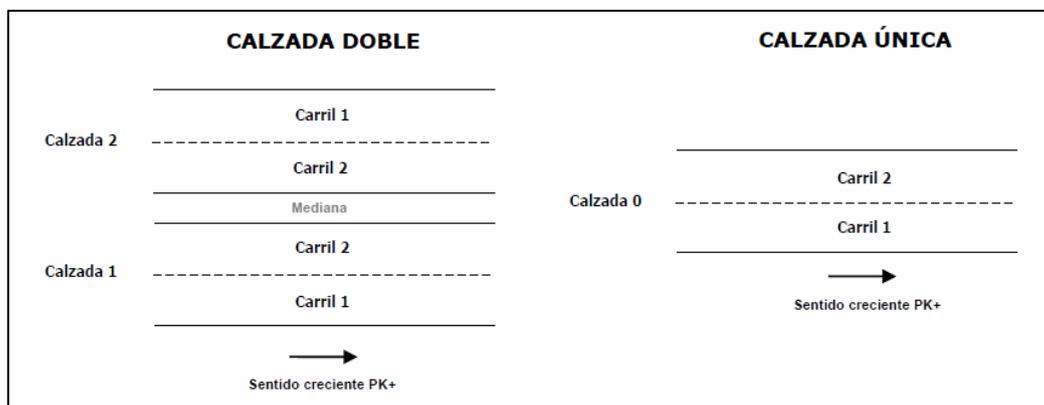


FIGURA 29. CRITERIO DE NUMERACIÓN DE CARRETERAS Y CARRILES. FUENTE: EUROCONSULT NT.

Por último, se han generado representaciones gráficas detalladas, que incluyen perfiles de deflexión y mapas de distribución de radios de curvatura. Estas visualizaciones facilitan la interpretación de los datos obtenidos, permitiendo identificar patrones de deformación y áreas críticas del firme. La Figura 30 presenta las referencias que se han utilizado tanto durante la toma de datos de la deflexión como en los listados y gráficos de resultados.

CÓDIGO	SIGNIFICADO
PK + Nº	Hito kilométrico de la carretera
PI	Paso Inferior
CP	Cambio de pavimento
LP	Límite provincial
T	Comienzo de travesía de túnel
VL	Inicio de carril adicional para vehículos lentos
CCA	Cambio de carril
ZNA	Zona neutralizada y no auscultada

FIGURA 30. REFERENCIAS CURVIÁMETRO. FUENTE: EUROCONSULT NT.

Ensayo NLT-330/98 "Cálculo del índice de regularidad internacional (IRI) en pavimentos de carreteras":

La metodología seguida en el proceso de auscultación del IRI, se describe a continuación:

1. Equipo de medida y componentes utilizados.

El equipo de medida utilizado ha sido el LASERPROF, el cual está compuesto por:

- Un vehículo tractor.
- Una caja de adquisición.
- Dos sensores láser de perfil.
- Dos brazos soportes de aluminio.
- Una abrazadera para la bola del remolque.
- Un odómetro de precisión.
- Un odómetro manual.

El equipo LASERPROF ha permitido evaluar la regularidad superficial de los firmes y pavimentos de carreteras a velocidades elevadas. Ha realizado mediciones continuas del perfil longitudinal con dos sensores láser portátiles y un odómetro para garantizar la precisión en la distancia de las medidas. Además de medir el IRI, el equipo también ha evaluado la textura de la superficie.

2. Proceso de toma de datos.

La toma de datos se ha llevado a cabo de forma automática mediante un ordenador portátil instalado en el vehículo tractor. De manera que, se han realizado dos mediciones por carril (una por rodada) con el pavimento seco.

Asimismo, el software utilizado ha permitido generar listados de IRI en función de la distancia recorrida, referidos al punto de origen o al punto kilométrico. Por tanto, las medidas obtenidas se han podido visualizar en tiempo real y se han almacenado en un soporte digital.

3. Método de ensayo.

En el desarrollo del método de ensayo se ha utilizado un modelo matemático denominado QCS (Quarter Car Simulation) para simular la suspensión y masas de un vehículo tipo *ci/Culando* a 80 km/h (ver Figura 31).

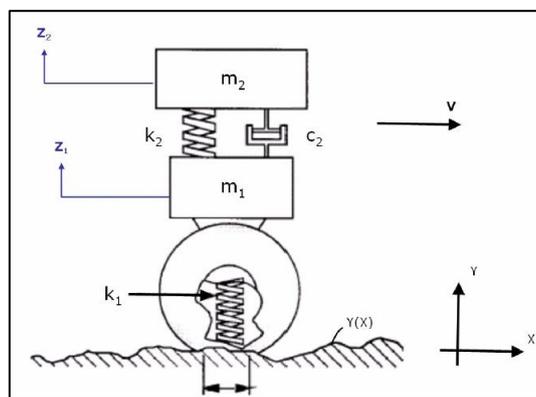


FIGURA 31. MODELO MATEMÁTICO DE VEHÍCULO UTILIZADO PARA EL CÁLCULO DEL IRI. FUENTE: EUROCONSULT NT.

El cálculo del IRI se ha realizado utilizando la siguiente expresión matemática:

$$IRI = \frac{\sum_{i=1}^n |Z1 - Z2|_i}{L} \times \frac{\sum_{i=1}^n |Z1 - Z2|_i}{n \Delta x} \quad 2. \text{ ÍNDICE DE REGULARIDAD SUPERFICIAL (IRI).}$$

donde;

- L es la longitud de evaluación.
- Δx es el paso de medida.
- n es el número de puntos de medida.

Además, se han empleado dos sensores láser para medir la distancia entre el dispositivo y la superficie del pavimento, y un acelerómetro para determinar los desplazamientos de la caja en la que se sitúa el sensor láser.

4. Resultados y representación gráfica.

Los resultados del IRI se han representado gráficamente en el software "VISOR MULTIPARÁMETRO". El criterio seguido en la numeración de carriles y calzadas es el mostrado en la Figura 32.

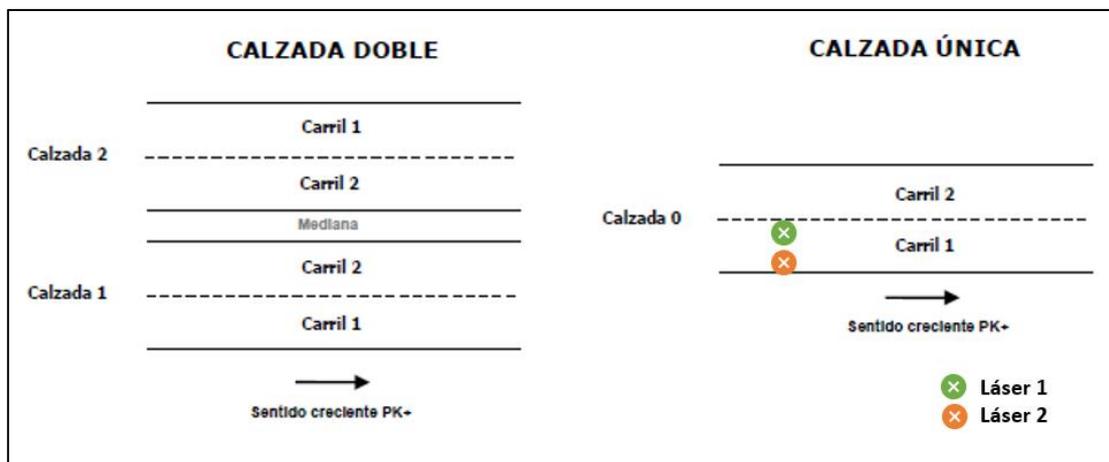


FIGURA 32. CRITERIO NUMERACIÓN DE CALZADAS Y CARRILES. FUENTE: EUROCONSULT NT.

Por último, se han generado gráficos de IRI por hectómetro para visualizar la regularidad superficial a lo largo de la carretera objeto de estudio. No obstante, durante el proceso se proporcionó una base de datos en formato Access para consultar la información de las carreteras ensayadas.

Diagnóstico sobre el estado del firme

Una vez recopilados los datos básicos de caracterización del firme y su entorno, se ha sintetizado la información en una tabla resumen para establecer el diagnóstico del estado del firme. El análisis integrado de estos datos ha permitido identificar patrones y correlaciones, facilitando la tramitación definitiva de la carretera en distintos tramos homogéneos con características similares en términos de estado del firme y condiciones de tráfico. A partir de esta tabla, se ha podido establecer un diagnóstico preliminar sobre las posibles causas de los deterioros observados, diferenciando entre problemas estructurales y aquellos que afectan principalmente a la superficie del pavimento. Este análisis ha sido crucial para determinar la adecuación del firme al tráfico al que estará sometido, asegurando que las soluciones propuestas sean sostenibles y duraderas.

Análisis de soluciones y selección del tipo más adecuado

Después de haber establecido el diagnóstico sobre el estado de todos los tramos homogéneos y el nivel de sus deterioros, se han analizado las posibles soluciones de rehabilitación y se ha proyectado la más adecuada, siguiendo los criterios establecidos en la Norma 6.3 IC. Para ello, se ha considerado un abanico de soluciones representado en la Figura 33 que incluye la eliminación parcial y reposición del firme existente, el recrecimiento aplicado sobre el pavimento actual, la combinación de ambas técnicas y, en los casos más severos, la reconstrucción total del firme, incluyendo técnicas de reciclado de materiales.

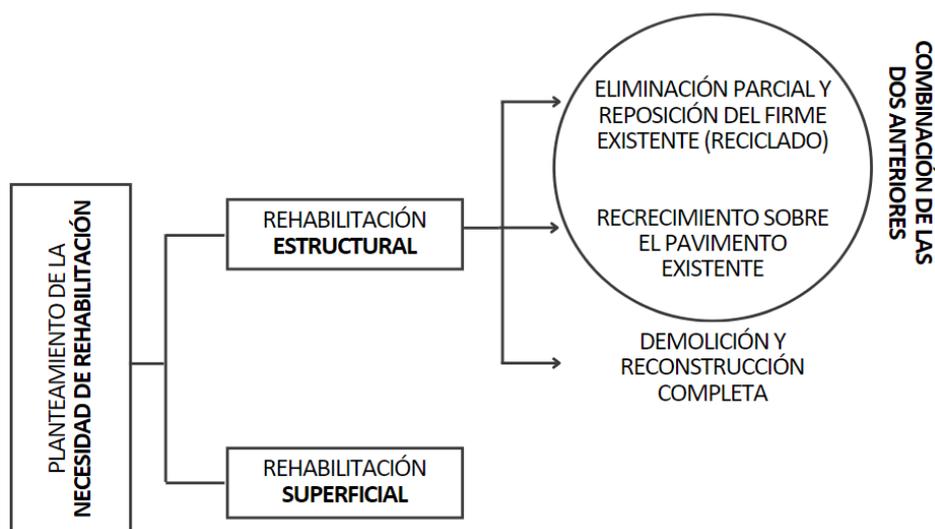


FIGURA 33. TIPOS DE SOLUCIONES DE LA REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL. FUENTE: NORMA 6.3 IC: REHABILITACIÓN DE FIRMES.

Cada posible solución ha sido valorada en términos de su capacidad para mitigar los problemas estructurales y superficiales previamente identificados, así como su compatibilidad con el tráfico previsto y las condiciones ambientales del área de estudio.

La selección final de la solución de rehabilitación más adecuada se ha basado principalmente en criterios medioambientales. Se ha buscado equilibrar la necesidad de proporcionar una superficie de rodadura segura y confortable con las limitaciones técnicas del proyecto. En este proceso, se han combinado diferentes enfoques para diferentes tramos de la carretera, seleccionando las soluciones que mejor se adaptan a las características específicas de cada tramo homogéneo. Dicha solución se ha proyectado siguiendo la Norma 6.3 IC: Rehabilitación de Firmes, de acuerdo con los factores de dimensionamiento analizados a lo largo del estudio estructural.

Proyecto de la solución adoptada

Para desarrollar el proyecto de rehabilitación de firmes, se ha seguido la metodología basada en las directrices de la Orden Ci/Cular 2/2023 del MITMA. Esta incluye:

1. Análisis de normativas: Se ha revisado detalladamente la normativa que permite la reutilización “in situ” con emulsión de capas de firme para categorías de tráfico T1 a T4, asegurando el cumplimiento de espesores mínimos y penetraciones adecuadas.
2. Consulta de recomendaciones técnicas locales: Se ha consultado el documento de recomendaciones técnicas para dimensionamiento de firmes en Aragón, que detalla espesores de capas de rodadura.
3. Evaluación de deflexión característica: Se ha utilizado el curvómetro para medir deflexiones características, esenciales para determinar las necesidades de intervención en los diferentes tramos.
4. Selección de espesores: Basado en los datos de deflexión, se han seleccionado espesores de recrido adecuados según la categoría de tráfico para garantizar la durabilidad y seguridad de las intervenciones.
5. Integración de normativas y recomendaciones: Se ha integrado coherentemente la normativa nacional con las recomendaciones técnicas locales para asegurar la efectividad y sostenibilidad de las intervenciones de rehabilitación de pavimentos.

3.2. DESARROLLO DE LA FÓRMULA DE TRABAJO

A partir de la caracterización de la muestra, se ha desarrollado una fórmula de trabajo mediante un análisis exhaustivo y metódico basado en ensayos de laboratorio. El objetivo ha sido definir la formulación óptima que servirá como base para el desarrollo posterior del trabajo. Este proceso ha incluido diversas tareas específicas, desde el análisis detallado de las materias primas disponibles hasta la evaluación de los resultados de los ensayos, garantizando así una selección fundamentada de la mejor estrategia a seguir. Todos los ensayos de laboratorio realizados a lo largo de este desarrollo se han documentado minuciosamente.

3.2.1. ANÁLISIS DE LAS MATERIAS PRIMAS DISPONIBLES

En primer lugar, se ha realizado un análisis exhaustivo de las materias primas disponibles, incluyendo el fresado, el ligante, los aditivos y el agua, entre otros elementos clave. Este análisis ha permitido determinar las características físicas, químicas y mecánicas de cada componente, así como su compatibilidad y reactividad mutua. Esto proporciona una base sólida para la selección y combinación adecuada de materiales, garantizando la calidad y eficacia del proceso de trabajo en el desarrollo del proyecto. Además, en el caso del fresado, ha permitido completar la caracterización de la muestra analizada en el estudio previo.

Fresado

El fresado se ha caracterizado con anterioridad en el estudio previo a partir de los siguientes ensayos de laboratorio:

- Granulometría (Norma UNE-EN 933-1): Este ensayo ha permitido determinar la distribución de tamaños de las partículas del fresado, asegurando que cumplen con los requisitos necesarios para su reutilización en el pavimento.
- Contenido de ligante residual (Norma UNE-EN 12697-1): Se ha evaluado la cantidad de ligante residual presente en el fresado, lo que es crucial para entender su capacidad de adherencia y su contribución a la mezcla bituminosa.
- Penetración (Norma UNE-EN 1426): Este ensayo ha medido la dureza del ligante recuperado del fresado, proporcionando información sobre su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga.
- Punto de reblandecimiento del ligante recuperado (Norma UNE-EN 1427): Se ha determinado la temperatura a la cual el ligante comienza a reblandecerse, un factor importante para evaluar su desempeño en condiciones climáticas variables.

Adicionalmente, para completar el análisis de las materias primas se ha determinado el contenido de agua por secado en estufa (Norma UNE - EN 1097-5:2009) y el Proctor Modificado (NTL 108/91) del fresado disponible.

Contenido de agua por secado en estufa Norma UNE - EN 1097-5:2009:

El procedimiento realizado ha consistido en:

1. Cálculo de la masa mínima.

Se ha reducido la cantidad de materia prima disponible para producir una muestra de ensayo, y se ha calculado la masa mínima de la muestra de ensayo en función del tamaño del tamiz superior (D) en milímetros.

2. Almacenamiento inmediato.

Inmediatamente después de preparar la muestra de ensayo, se ha colocado en un recipiente limpio y seco.

3. Procedimiento operatorio.

Por un lado, se han limpiado y secado las bandejas para contener la muestra de ensayo durante el secado, y se han pesado anotando su masa como (M2).

Después, se han pesado las bandejas que contienen la muestra de ensayo húmeda y se ha determinado la masa de la muestra de ensayo (M1) restándole (M2).

4. Secado en estufa.

Se han colocado las bandejas en una estufa a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ hasta obtener masa constante. Para establecer si se ha alcanzado la masa constante (M3), se ha seguido el siguiente procedimiento:

- i. Se ha enfriado la bandeja a temperatura ambiente.
- ii. Se ha determinado la masa de la muestra de ensayo (Md1) restando la masa de la bandeja (M2).
- iii. Se ha introducido nuevamente la bandeja con la muestra de ensayo en la estufa durante 1 hora.
- iv. Se ha sacado la bandeja, dejado enfriar a temperatura ambiente, y repetido la determinación de la masa de la muestra de ensayo (Mdi).

- v. Si M_d se diferencia de M_{d1} en menos del 0,1%, se ha asumido que se ha alcanzado la masa constante. Si la diferencia ha sido igual o superior al 0,1%, se ha repetido el procedimiento hasta que la diferencia entre dos determinaciones sucesivas ha sido inferior al 0,1%.
5. Cálculo y expresión de los resultados.

Para finalizar, el contenido en agua se ha calculado y expresado redondeando al 0,1% más próximo.

Proctor Modificado Norma UNE 103501:

En el ensayo Proctor Modificado, se ha seguido una metodología precisa para determinar la relación entre la densidad seca y la humedad en el fresado extraído, utilizando una energía de compactación específica. A continuación, se detallan los pasos y herramientas utilizadas en el proceso:

1. Preparación de la muestra.

La muestra de fresado se ha dividido en varias porciones con diferentes contenidos de humedad: tres puntos en la rama ascendente y dos en la descendente de la curva de compactación.

2. Compactación.

Primero, se ha colocado el collar en la parte superior del molde. Después, se ha introducido la muestra en el molde en 5 capas, compactando cada una con 60 golpes de la maza. Seguidamente, se ha retirado el collar y se ha nivelado la superficie del fresado compactado.

3. Determinación de la densidad seca.

La densidad seca se ha determinado pesando el molde con el fresado compactado, midiendo el peso del fresado utilizando las balanzas especificadas y calculando la densidad a partir de la fórmula adecuada para cada contenido de humedad.

4. Determinación de la humedad.

En cambio, para la humedad se ha secado una porción de la muestra compactada en la estufa, y se ha pesado antes y después del secado para determinar la cantidad.

5. Representación gráfica:

Por último, se ha representado en un gráfico, los porcentajes de humedad en el eje de abscisas y las densidades secas en el eje de ordenadas, dibujando una curva suave a través de los puntos obtenidos. Las coordenadas del punto máximo de la curva representan la "densidad seca máxima" y la "humedad óptima".

6. Repetición del proceso.

Se ha repetido el proceso con otras muestras representativas, ajustando la cantidad de agua en cada mezcla, para obtener suficientes puntos y definir con precisión la curva de compactación.

Para llevar a cabo correctamente el ensayo, se ha necesitado:

- Molde cilíndrico de metal:
 - Diámetro interior: $152.5 \text{ mm} \pm 0.7 \text{ mm}$.
 - Altura: $127 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$.
 - Volumen aproximado: 2320 cm^3 .
 - Collar: Mismo diámetro y altura aproximada de 60 mm, para colocarlo en la parte superior durante el apisonado.
- Maza metálica:
 - Peso: $4.535 \text{ kg} \pm 0.01 \text{ kg}$.
 - Altura de caída libre: $457 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$.
 - Diámetro de la maza manual: $50 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$.
 - Guía tubular de 1 cm de diámetro espaciados 90° y a 2 cm de cada extremo.

Ligante y aditivo

El ligante y aditivo empleado en la formulación de la mezcla ha sido validado a partir de la información proporcionada por el fabricante. Dicha información comprende la proporción adecuada de aditivo que se vayan a aplicar y el método destinado para su incorporación, así como las especificaciones que deban cumplir, tanto dicho aditivo como la mezcla resultante. Además de, sus características y comportamiento y efectos sobre la mezcla al suministrarlo en las proporciones previstas.

Las diversas emulsiones empleadas en esta investigación fueron preparadas específicamente para este estudio. Estas emulsiones están compuestas por un betún proporcionado por la empresa CEPSA y un aditivo rejuvenecedor de betún suministrado por Química de los Pavimentos (QDP). Este aditivo busca restaurar la flexibilidad del betún envejecido y reblandecer el betún duro, mejorando su trabajabilidad y rendimiento a largo plazo.

Agua

Se ha confirmado que el agua del grifo utilizada contiene pequeñas cantidades de minerales y cloro, que se encuentran dentro de los rangos aceptables para el tipo de ensayos realizados. Adicionalmente, en el laboratorio se realizan periódicamente verificaciones de la calidad del agua del grifo utilizada, incluyendo pruebas de pH y conductividad, para asegurar que cumpla con los parámetros aceptables de las pruebas realizadas.

3.2.2. DISEÑO DE LA FORMULACIÓN A PARTIR DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

Con el objetivo de obtener la fórmula óptima, se ha llevado a cabo un proceso de diseño de la formulación basado en una serie de pruebas experimentales. Se han realizado ensayos de laboratorio, variando el tipo de emulsión, la dosificación y la incorporación de aditivos específicos. Además, se ha desarrollado un procedimiento eficiente para la fabricación de probetas, ajustado a los métodos de compactación necesarios para cada ensayo. La Figura 34 muestra las fases realizadas en este proceso.

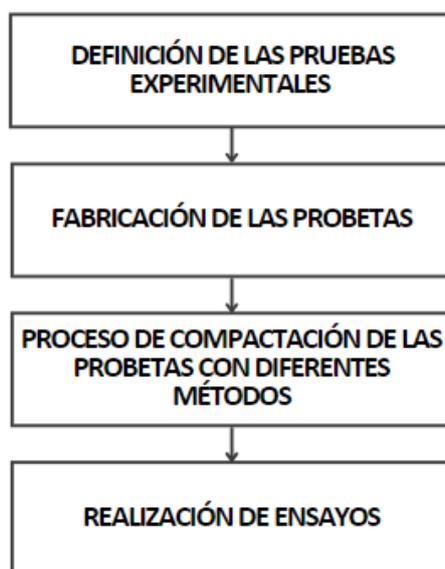


FIGURA 34. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DISEÑO DE LA FORMULACIÓN A PARTIR DE PRUEBAS EXPERIMENTALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Cada una de estas fase ha sido cuidadosamente diseñada y ejecutada con el objetivo de ajustar las proporciones de los componentes de la mezcla para cumplir con los requisitos de diseño establecidos. Se ha puesto especial énfasis en la precisión y repetibilidad de los ensayos, asegurando que los resultados obtenidos sean fiables y que la fórmula de trabajo desarrollada ofrezca un rendimiento óptimo en términos de flexibilidad, durabilidad y trabajabilidad.

Definición de las pruebas experimentales

Para evaluar de manera exhaustiva las propiedades y el comportamiento a largo plazo de las mezclas bituminosas, se ha implementado un riguroso programa de ensayos de laboratorio. Este programa, desarrollado a partir de una revisión detallada de la literatura y las mejores prácticas del sector, ha estado supervisado por un comité de expertos en pavimentación y materiales de construcción. Se enfoca en dos ensayos clave: la sensibilidad al agua y el módulo resiliente a tracción indirecta.

En lo que respecta a la sensibilidad al agua, se han realizado ensayos de compactación por inmersión-compresión para evaluar cómo el agua impacta la estabilidad y durabilidad de las mezclas bituminosas. Se ha analizado el efecto de diferentes dosificaciones, tipos de betún y aditivos en la capacidad de las mezclas para resistir la acción del agua. Los parámetros evaluados incluyen la resistencia conservada, la relación de resistencias a compresión (i/C %), la resistencia húmeda (C_w en kPa) y la resistencia seca, así como las densidades de las mezclas en ambos estados. Este análisis permite identificar las combinaciones óptimas que mejoran la resistencia al agua.

Por otro lado, se ha evaluado el módulo resiliente a tracción indirecta mediante compactación giratoria para analizar el comportamiento mecánico de las mezclas. Este ensayo es crucial para garantizar la durabilidad de las pavimentaciones, ya que mide la capacidad de las mezclas para soportar tensiones sin fracturarse. Se han probado diferentes dosificaciones que demostraron los mejores resultados en los ensayos previos, a diversas edades de maduración y curado de las probetas, para determinar su efecto sobre la resistencia a tracción de las mezclas. El estudio ha considerado la variación en porcentaje y en MPa del módulo resiliente, así como las densidades aparentes de las mezclas.

La evaluación integral de estos ensayos proporciona una comprensión detallada de cómo diversas variables afectan las propiedades de las mezclas bituminosas en frío. Este enfoque metodológico no solo optimiza las prácticas de pavimentación, sino que también contribuye a prolongar la vida útil de las carreteras al identificar las mezclas más duraderas y resistentes.

Proceso de fabricación de las probetas

El proceso de fabricación de las probetas se ha llevado a cabo conforme al siguiente protocolo específico.

1. Preparación de los utensilios de laboratorio necesarios.

En primer lugar, se han preparado los utensilios de laboratorio necesarios para llevar a cabo el proceso de fabricación de las probetas adecuadamente:

- Recipientes de mezcla.
- Espátulas.
- Termómetros.
- Balanzas de precisión.
- Moldes de compactación.
- Guantes y equipo de protección personal.

Todos los utensilios deben estar limpios y secos antes de comenzar el proceso para evitar contaminaciones (ver Figura 35). Además, es importante asegurarse de que las balanzas estén calibradas y que los moldes de compactación estén en buen estado y correctamente etiquetados.



FIGURA 35. UTENSILIOS DE LABORATORIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

2. Preparación y pesado de las materias primas disponibles.

Tras identificar y seleccionar los diferentes tipos de emulsión necesarios para la fabricación de las probetas, se han utilizado balanzas de precisión para pesar cada uno de los componentes según la formulación específica de cada mezcla.

Durante este paso, es importante anotar los pesos en una hoja de registro. Igualmente, es recomendable colocar cada materia prima en recipientes separados y etiquetados correctamente para evitar confusiones durante el mezclado.

3. Incorporación de las materias primas a la mezcla.

La secuencia de adición de los ingredientes a la mezcla, se ha realizado siguiendo este orden:

- i. Se vierte el fresado en el recipiente de mezcla.
- ii. Se incorpora la emulsión en el porcentaje requerido con movimientos lentos y circulares al recipiente que contiene los sólidos. Simultáneamente, se añade la cantidad de agua previamente definida.

4. Procedimiento de mezclado.

Una vez se incorporan todas las materias primas en el recipiente de mezclado, se ha utilizado una espátula para comenzar a combinar los ingredientes. No obstante, se puede emplear un mezclador mecánico a baja velocidad.

Se ha continuado mezclando hasta obtener una masa homogénea, asegurándose de que no queden grumos y que la emulsión se distribuya uniformemente.

Igualmente, es recomendable cronometrar el proceso de mezclado para asegurar la misma consistencia entre diferentes lotes.

La Figura 36 muestra la evolución de la mezcla durante las distintas fases del proceso de mezclado explicado.



FIGURA 36. EVOLUCIÓN DE LAS DISTINTAS FASES DE MEZCLADO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

5. Colocación de la muestra.

Por último, tras asegurarse de que los moldes estén limpios y secos, se ha vertido la mezcla homogénea en el molde de compactación. Previamente, se ha colocado un disco de papel de filtro encima de la placa de compactación inferior. Si es necesario, se puede aplicar adicionalmente un agente desmoldante.

Dicho vertido, se ha realizado por capas para evitar la formación de burbujas de aire, empleando un equipo de compactación para aplicar la presión necesaria y asegurarse de que la mezcla llene completamente el molde sin vacíos. Para finalizar, se ha alisado la superficie de la probeta para asegurar una muestra uniforme y se ha colocado un segundo disco de papel de filtro encima.

Proceso de compactación de las probetas con diferentes métodos

A continuación, se explican en detalle los dos métodos de compactación utilizados.

Preparación de probetas mediante compactación estática Norma UNE-EN 12697-56:

El procedimiento de preparación de probetas mediante compactación estática consta de los siguientes pasos:

1. Preparación del equipo de compactación.

Primero, se prepara el equipo de compactación colocando la placa inferior y el molde de compactación sobre el pistón inferior de carga. Para ello, se ha fijado la posición vertical del molde de compactación para permitir un movimiento vertical relativo entre el molde y la placa de carga inferior durante el proceso de compactación.

Además, se ha colocado un disco de papel de filtro encima de la placa de compactación inferior.

2. Colocación de la muestra.

Tras el mezclado, preparación y acondicionamiento de la mezcla bituminosa, se ha colocado el material en el molde de compactación con la masa requerida ($M \pm 0,2$) %, dentro del marco de compactación.

Se recomienda repartir la mezcla uniformemente en el molde con una pala evitando cualquier segregación. Por tanto, se ha aplastado y pinchado la mezcla, incluyendo los bordes, para conseguir una superficie lo más uniforme posible antes de que comience la compactación.

Seguidamente, se ha colocado un disco de papel de filtro sobre la superficie de la muestra de mezcla y se ha insertado la placa de compactación superior en el molde de compactación.

Tanto los moldes como las placas de compactación permiten el drenaje del agua de la probeta durante el proceso de compactación.

Se ha trabajado a Tª ambiente de laboratorio.

3. Proceso de compactación.

El proceso de compactación, se debe iniciar en un plazo máximo de 2 min después de llenar los moldes.

En primer lugar, se aplica el preesfuerzo necesario para liberar el molde y permitir los movimientos verticales relativos entre el molde y la placa de compactación.

A continuación, se aumenta la fuerza vertical hasta conseguir la fuerza de compactación $\pm 1,0$ kN en un periodo de tiempo (60 ± 30) s, y se mantiene constante durante el tiempo de compactación establecido. Para ello, se emplea una máquina de ensayo a compresión capaz de aplicar la carga requerida, con una velocidad de deformación constante de 50 ± 2 mm/min (ver Figura 37).



FIGURA 37. PRENSA HIDRÁULICA DEL LABORATORIO UTILIZADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

4. Desmontaje y desmoldeo.

Una vez termina el proceso de compactación, se desmonta el molde de compactación y se almacena apoyado en la base de la probeta hasta que se desmolde.

Dado que se está trabajando con mezclas en frío con emulsión bituminosa, el periodo de desmoldeo coincide con el tiempo de curado de cada probeta.

Preparación de la muestra mediante compactador giratorio Norma UNE-EN 12697-31:

El método para preparar probetas utilizando compactación giratoria se compone de los siguientes pasos:

1. Preparación del equipo de compactación.

Primero, se ha verificado el dispositivo de ensayo asegurándose de que pueda compactar la probeta según el principio descrito y cumplir con los requisitos de ángulo y fuerza especificados.

Después, se ha llevado a cabo la calibración de parámetros. Se ha ajustado el ángulo de inclinación y la fuerza de compactación.

Igualmente, se ha ajustado la velocidad de rotación del equipo a 30 r/min para que se mantenga constante durante el ensayo con una tolerancia de $\pm 10\%$.

Por último, se han preparado los moldes metálicos y las placas de suplemento cumpliendo con los requisitos de dureza y rugosidad según las Normas EN ISO 6508-1 y EN ISO 4287 para la posterior colocación de la muestra.

2. Colocación de la muestra.

Tras calcular y pesar la masa de la mezcla bituminosa según la densidad y el volumen requerido, se ha llenado el molde mediante un embudo, y se ha pesado nuevamente para asegurar la precisión del 0,1%.

Se ha trabajado a Tª ambiente de laboratorio.

3. Proceso de compactación.

A continuación, se ha insertado el molde con la mezcla y las placas de suplemento en el dispositivo de ensayo y se ha iniciado el proceso de compactación.

Este procedimiento se ha realizado de manera que el cabezal estaba en contacto con la placa superior al comenzar la rotación de la máquina.

El control del proceso, se ha llevado a cabo manteniendo constante la velocidad de rotación y midiendo la altura de la probeta $h(n_g)$ a intervalos específicos de giros (por ejemplo, 5, 10, 15, etc.) utilizando un software diseñado para este propósito.

4. Desmontaje y desmoldeo.

Una vez se ha obtenido la altura requerida de la probeta (60 ± 1) cm, se detiene la rotación de la máquina.

Por último, se ha extraído la probeta y se ha utilizado un gato para sacarla del molde.

La Figura 38 muestra la maquina compactadora giratoria utilizada, así como el resultado obtenido.



FIGURA 38. MÁQUINA COMPACTADORA GIRATORIA Y PROBETA REALIZADA CON ESTE MÉTODO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Realización de ensayos

Igualmente, los ensayos de laboratorio realizados son:

Densidad de la mezcla Norma UNE-EN 12697-6:

Para determinar la densidad aparente de las probetas compactadas, se ha seguido el Procedimiento B: Densidad aparente en seco con superficie saturada (SSD) de la UNE-EN 12697-6:2012:

1. Determinación de la masa de las probetas secas (M1).

Primero, se han pesado las probetas secas al aire utilizando una balanza de precisión y registrando la masa al 0,1 g más cercano.

2. Determinación de la densidad del agua (ρ_w).

Después, se ha calculado la densidad del agua a la temperatura de ensayo utilizando la siguiente fórmula y redondeando al 0,0001 Mg/m³ más cercano.

$$\rho_w = 1,000\,252\,05 + \frac{7,59 \times t - 5,32 \times t^2}{10^6}$$

3. DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO
(ρ_w).

donde:

- t es la temperatura del agua, en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$);
- ρ_w es la densidad del agua a la temperatura de ensayo, en megagramos por metro cúbico (Mg/m³).

3. Saturación de las probetas.

Las probetas se han sumergido en agua durante un tiempo suficiente para que se saturen completamente, generalmente 30 minutos pero no más de 3 horas.

4. Determinación de la masa saturada en agua (M2).

Se han pesado las probetas saturadas mientras están sumergidas, asegurándose de eliminar cualquier burbuja de aire.

5. Secado de la superficie de las probetas.

Por último, se han sacado las probetas del agua y se han secado las gotas adheridas a la superficie con una gamuza.

Ensayo de determinación de la sensibilidad al agua de mezclas bituminosas recicladas en frío con emulsión bituminosa Norma UNE 41215:

A su vez, el método operativo llevado a cabo en el ensayo consta de las siguientes etapas:

1. Fabricación de las probetas.

Se han preparado 8 probetas cilíndricas, con la misma edad, con un diámetro de 101,6 mm, establecido en función del tamaño máximo del fresado.

2. Compactación de las probetas.

Dichas probetas se han compactado mediante compactación estática, según la Norma UNE-EN 12697-56, con aplicación de carga constante de manera que realice un esfuerzo de compactación de 7,6 MPa durante 300 ± 5 s.

3. Curado de las probetas.

Tras la compactación se han introducido todas las probetas, desmoldadas el mismo día de la fabricación, en posición vertical en una estufa de aire forzado a 40 ± 1 ° C durante 72 h.

Transcurridas las 72 h se han dejado las probetas a temperatura de laboratorio más de 2 h antes de proceder al cálculo de las densidades y separación por lotes. Cabe destacar que, las probetas deben pasar a la fase de acondicionamiento antes de que transcurran 5 días desde el final del curado.

4. Medición de las probetas y determinación de la densidad aparente.

Seguidamente, se han determinado las dimensiones de cada probeta y se ha calculado la densidad aparente, señalando los puntos de medida, según el procedimiento de la Norma UNE-EN 12697-6.

5. División por lotes y acondicionamiento.

Se han agrupado las probetas en dos subconjuntos con alturas y densidades lo más similares posible y se han acondicionado de la siguiente forma:

- Probetas secas:

Se han almacenado dentro de la cámara de aire climatizado a 25 ± 1 ° C durante tres días.

- Probetas húmedas:

Se ha aplicado el vacío a una presión de 47 ± 3 kPa y se ha mantenido durante 60 ± 5 minutos mientras se ha permitido la entrada de agua. Se ha incrementado lentamente la presión hasta llegar a la presión atmosférica. Al sacar las probetas del agua, se han vuelto a medir las dimensiones para verificar que no se ha producido un cambio de volumen superior al 2 %. Por último, se han colocado en la cubeta de acondicionamiento a 25 ± 1 ° C durante 3 días.

6. Procedimiento de ensayo o rotura.

El ensayo de compresión simple se ha efectuado en un tiempo inferior a 2 minutos tras la extracción de cada probeta del sistema de acondicionamiento, midiendo la fuerza para el lote de probetas húmedo y el lote de probetas seco.

La Figura 39 muestra dos fotografías correspondientes al proceso de vacío realizado en el acondicionamiento de las probetas húmedas.



FIGURA 39. EJEMPLO DEL PROCESO DE VACÍO EN EL ACONDICIONAMIENTO DE PROBETAS HÚMEDAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY) siguiendo el Anexo C de la Norma UNE-EN 12697-26:

El procedimiento de ensayo consta de los siguientes pasos:

1. Preparación de las probetas.

Se han preparado 4 probetas cilíndricas, con la misma edad, con un espesor de 60 mm y 100 mm de diámetro.

2. Compactación de las probetas.

Dichas probetas se han compactado mediante compactador giratorio, según la Norma UNE-EN 12697-31, con aplicación de carga constante durante 110 ciclos.

3. Curado de las probetas.

Tras la compactación se han dejado las probetas a temperatura de laboratorio 7 días.

4. Medición de las probetas y determinación de la densidad aparente.

Seguidamente, se han determinado las dimensiones de cada probeta y se ha calculado la densidad aparente, señalando los puntos de medida, según el procedimiento de la Norma UNE-EN 12697-6.

5. Montaje de la probeta.

Las probetas, una vez llevadas a la temperatura especificada, se han instalado para el ensayo con uno de sus diámetros marcados colocado en posición vertical. Durante el procedimiento de instalación, se han ajustado los transductores y el sistema de medición.

6. Procedimiento de ensayo o rotura.

Se han aplicado 10 impulsos de acondicionamiento para permitir que el equipo se ajuste a la magnitud de la carga y a su duración.

- a. Cálculo del módulo de rigidez medido.

Utilizando las mediciones de los 5 impulsos de carga, para cada impulso de carga se ha determinado el módulo de rigidez medido, aplicando la siguiente fórmula:

$$ITSM = \frac{F x (v+0,27)}{(z x h)}$$

4. MÓDULO DE RIGIDEZ A TRACCIÓN INDIRECTA (ITSM).

Donde:

- ITSM es el módulo de rigidez medido, expresado en megapascales (MPa).
- F es el valor máximo de la carga vertical aplicada, expresado en newtons (N).
- z es la amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga, expresada en milímetros (mm).
- h es el espesor medio de la probeta, expresado en milímetros (mm).
- ν es el coeficiente de Poisson.

El valor final para cada probeta se ha hallado como la media de los 5 pulsos.

7. Obtención del módulo de rigidez.

Cada probeta se ha extraído del equipo de ensayo y se ha girado $(90 \pm 10)^\circ$ alrededor de su eje horizontal para tomar dos medidas. Si el valor medio del módulo de rigidez de este ensayo está comprendido entre el +10 % o el -20 % del valor medio registrado para el primer ensayo, el valor medio de los dos ensayos se ha calculado y registrado como el módulo de rigidez de la probeta. En cambio, si la diferencia entre los dos valores es mayor que la especificada anteriormente, se ha valorado individualmente si aceptar o rechazar estos resultados.

La Figura 40 muestra el equipo utilizado.



FIGURA 40. ENSAYO MÓDULO RESILIENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 12697-26. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

3.2.3. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYO

Tras la realización de los ensayos se ha llevado a cabo su evaluación, comparando los valores obtenidos con los criterios de aceptación definidos. Esta fase es crucial para verificar la calidad y el comportamiento de la mezcla reciclada. Al analizar detenidamente los resultados y compararlos con los estándares establecidos, se garantiza que la mezcla cumpla con los requisitos específicos de resistencia, durabilidad y comportamiento, asegurando así su idoneidad para su aplicación en el proyecto en cuestión.

El procedimiento de evaluación de los resultados en ambos casos, ha sido el siguiente:

1. Comparación con los criterios de aceptación.

Previamente, se han establecido unos criterios de aceptación basados en la normativa correspondiente, los estándares de la industria y las especificaciones del proyecto.

En consecuencia, los valores de resistencia, durabilidad y comportamiento obtenidos de los ensayos se han comparado con estos criterios. De manera que, se ha determinado si los resultados obtenidos cumplen con los requisitos específicos.

2. Análisis de los datos.

Para ello, se ha utilizado principalmente la herramienta Microsoft Excel con la intención de elaborar gráficas comparativas y analizar los resultados obtenidos.

En ellas, se han representado los valores de los parámetros más significativos en cada caso, comparando los resultados entre las diferentes pruebas realizadas (tipo de emulsión y dotación).

Dichas gráficas han permitido visualizar fácilmente las diferencias en el comportamiento de la mezcla reciclada bajo diferentes condiciones.

3. Documentación.

Todos los datos obtenidos de los ensayos se han registrado cuidadosamente. Y, se ha realizado un informe de conclusiones y recomendaciones para posibles ajustes o mejoras en la formulación de la mezcla, si fuera necesario, en un futuro.

3.2.4. PROPUESTA DEFINITIVA DE LA FÓRMULA DE TRABAJO

Finalmente, se ha realizado la propuesta definitiva de la fórmula de trabajo a partir de reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa. En esta etapa se han especificado los componentes y las cantidades exactas de la mezcla, así como los parámetros de diseño obtenidos a través de los ensayos y evaluaciones anteriores. Esta propuesta es el resultado de un análisis minucioso y detallado de los resultados de los ensayos, asegurando que la fórmula final sea óptima en términos de resistencia, durabilidad y comportamiento para su aplicación específica.

3.3. EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL

Una vez determinada la propuesta definitiva de la fórmula de trabajo, se ha llevado a cabo una evaluación medioambiental comparativa entre una solución convencional y la alternativa propuesta de reciclado en frío "in situ". El impacto ambiental se ha evaluado utilizando dos indicadores cuantitativos principales. Para ello, se han considerado previamente una serie de actividades específicas para cada caso, las cuales se detallarán más adelante en el trabajo. El objetivo es demostrar las ventajas de esta técnica desde una perspectiva de sostenibilidad.

Esta comparativa se ha realizado a partir del software francés SEVETP, desarrollado por el *Centre d'Études Techniques des Bâtiments* (CSTB). Este programa permite evaluar el desempeño ambiental de diversas soluciones constructivas, orientando a los profesionales de la construcción en la selección de materiales y técnicas que minimicen el impacto ambiental de sus proyectos.

El alcance del modelado incluye:

- **Producción de materiales:** Considera la extracción de recursos del entorno natural, los tratamientos diversos y las operaciones de transporte previas a la obra, para todos los materiales utilizados en la fabricación de los componentes de la obra.
- **Transformación de materiales:** Comprende la conversión de estos materiales en productos finales mediante procesos en plantas de mezcla en caliente, plantas de mezcla en emulsión, y otros métodos.
- **Transporte:** Abarca el transporte de materiales desde la fábrica hasta el emplazamiento de construcción, así como los movimientos de materiales tanto dentro como en el exterior de la obra.

- **Operaciones en la obra:** Considera todas las actividades realizadas durante la construcción, como demoliciones, planificación, excavaciones, movimientos de tierra y adecuaciones.
- **Tratamiento final de materiales:** Incluye el manejo y disposición de materiales al finalizar la obra.
- **Infraestructura y Equipos:** Cubre la fabricación y el uso de la infraestructura industrial y los equipos de construcción empleados durante el proyecto.

Sin embargo, el sistema no tiene en cuenta:

- El movimiento de personal (agencia o planta de fabricación), cuyo impacto se considera insignificante.
- La inmovilización relacionada con el transporte.
- La infraestructura de fábrica, excluyendo plantas de mezcla en caliente.
- La infraestructura de vehículos de transporte.

La metodología de la comparativa ambiental ha incluido los pasos presentados en la Figura 41.



FIGURA 41. METODOLOGÍA SEGUIDA PARA LA COMPARATIVA MEDIOAMBIENTAL A PARTIR DEL SOFTWARE SEVE TP.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

1. Definición de los parámetros de evaluación.

En primer lugar, se han establecido los parámetros clave a considerar en la evaluación del desempeño ambiental. En este caso, el impacto ambiental se ha evaluado sobre la base de dos indicadores cuantitativos:

- **Consumo de recursos energéticos expresado en MJ:** Este indicador corresponde a la suma de las energías primarias renovables y no renovables utilizadas para la construcción de la obra.
- **Emisiones de gases de efecto invernadero expresadas en toneladas de CO₂ equivalente:** Este indicador refleja el impacto ambiental de las soluciones técnicas sobre el cambio climático.

Cabe destacar que, por cada MJ de energía consumida “in situ” o en planta, se ha tenido en cuenta el “aprovisionamiento” de esta energía (por ejemplo para el diésel: extracción de petróleo, transporte a Europa, refinado, distribución).

Asimismo, los indicadores están segmentados según las diferentes etapas de la Figura 42.

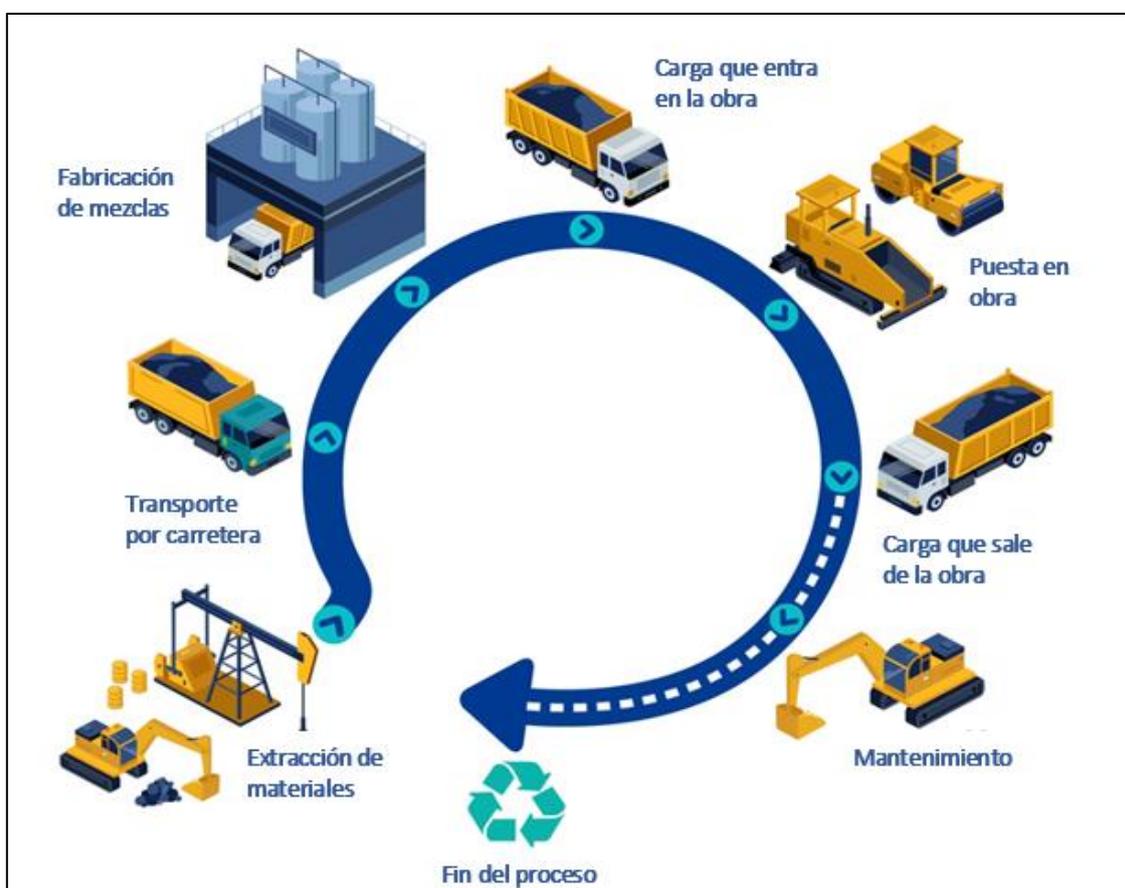


FIGURA 42. CROQUIS DE LAS FASES CONSIDERADAS EN LA EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL. FUENTE: SEVE TP.

2. Recopilación de datos.

En segundo lugar, se han recopilado datos específicos sobre ambas soluciones constructivas, incluyendo información detallada sobre los materiales utilizados, los procesos de construcción y los impactos ambientales asociados a cada uno.

Las fuentes de la base de datos disponible en el software SEVE TP para la evaluación medioambiental se presentan en la Tabla 1. No obstante, como algunos datos no son directamente accesibles, un grupo de trabajo formado por miembros de *Routes de France* colaboró en el desarrollo de los ratios, el consumo y otros datos esenciales.

TABLA 1. FUENTES DE DATOS DE LA EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL. FUENTE: SEVE TP.

DOCUMENTO	EMISOR	AÑO
FD P01-015: Folleto de datos de energía y transporte	AFNOR (Asociación Francesa de Normalización)	
Base Carbone v18.0.0	ADEME	2020
Inventario del ciclo de vida del betún	Eurobitume	2012
Declaración ambiental de producto Cementos comunes francese	ATILH (Asociación Técnica de la Industria de Consolidantes Hidráulicos)	2017
Módulos de información ambiental para la producción de áridos y áridos reciclados	UNPG (Unión Nacional de Productores de Áridos)	2017
Módulos de información ambiental para la producción de recubrimientos en emulsión	Carreteras de Francia	2022
Pavimentos de carreteras con piedra natural	CTMNC (Centro Técnico de Materiales Naturales de Construcción)	2008
FDES Bordillo y canalón de hormigón	CERIB (Centro de estudios y experiencia en la industria del hormigón)	2011
FDES Adoquín de hormigón para carretera	CERIB (Centro de estudios y experiencia en la industria del hormigón)	2011
Base Eco-Invent v2.2	-	-
Base Eco-Invent v3.6	-	-
Base de datos INIES	INIES	2020
Fichas ambientales y sanitarias para asfaltos	Oficina de Asfalto	2015
Informe ICV para cales	Unión de Productores de Lima (UPC)	

A efectos de aplicación de la Norma 6.3: Rehabilitación de Firmes se han considerado las unidades de obra más usuales y de comportamiento suficientemente experimentado.

3. Configuración de parámetros en SEVETP.

A continuación, se han introducido los datos recopilados en el software SEVETP, configurando los parámetros específicos relacionados con cada solución constructiva.

- i. Primero, se ha iniciado el software SEVE TP y se ha creado un nuevo proyecto para la comparativa ambiental.
- ii. Seguidamente, se han ingresado los datos recopilados previamente sobre las dos soluciones constructivas, incluyendo detalles sobre los materiales utilizados, los métodos de construcción y cualquier otro factor relevante.
- iii. Dentro de SEVE TP, se han seleccionado las categorías de evaluación ambiental pertinentes para la comparativa, como las emisiones de CO₂ y el consumo de energía.
- iv. Por último, se han configurado los parámetros específicos para cada solución constructiva, como la composición exacta de los materiales, los procesos de fabricación, el transporte y la instalación, entre otros.

La Figura 43 muestra el menú principal del programa durante la fase de creación de las soluciones:

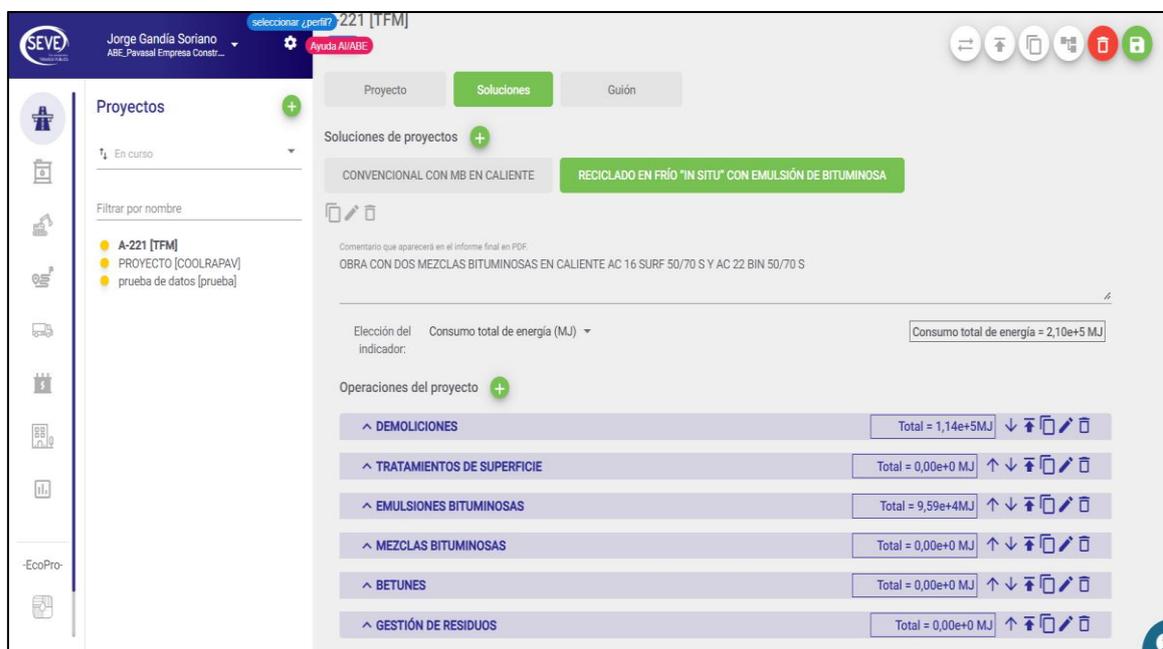


FIGURA 43. MENÚ PRINCIPAL DEL SOFTWARE SEVE TP UTILIZADO PARA LA EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL. FUENTE: SEVE TP.

4. Simulación y análisis.

Una vez se han recopilado los datos y configurado todos los parámetros, SEVETP ha utilizado los datos ingresados para simular el comportamiento ambiental de ambas soluciones constructivas. El programa ha llevado a cabo cálculos complejos para evaluar el impacto ambiental en diferentes categorías:

Productos

Los factores de emisión utilizados en la evaluación de los áridos que componen las mezclas bituminosas en caliente han provenido de los Módulos de Información Ambiental (MIE) de UNPG en 2017, proporcionando información cuantitativa sobre los impactos ambientales asociados. La unidad declarada utilizada para los MIE ha sido la producción "desde la cuna hasta la puerta de la fábrica" de una tonelada de áridos representativa del contexto francés, con un nivel de humedad entre el 0% y el 7%.

Para el análisis del betún, se han utilizado los datos del Inventario del Ciclo de Vida versión 2.0 publicado por EUROBITUME en 2012. Este inventario incluye las siguientes actividades:

- Extracción.
- Transporte.
- Refinación.
- Almacenamiento del petróleo crudo.

El betún, derivado del petróleo crudo, contiene energía "materia". Sin embargo, a diferencia de otros derivados del petróleo, el betún no se utiliza como combustible, ni siquiera al final de su vida útil. En su lugar, se reciclan, recuperan o almacenan sistemáticamente en ISDI. Por lo tanto, la energía material del betún nunca se libera. En SEVE TP, no se ha contabilizado el uso de recursos energéticos primarios utilizados como materia prima para la elaboración de betún.

La emulsificación se ha evaluado llevándose a cabo en una planta de aglutinantes especialmente dedicada, que incluye la unidad de emulsificación, así como todos los procesos para mantener la temperatura del producto, hacer circular los fluidos y controlar los sistemas. Los impactos de la etapa de producción provienen del estudio ACV realizado por encargo de *Routes de France*, lo cual permitió la publicación en 2022 del módulo de información ambiental para los recubrimientos en emulsión.

Transporte

Para el transporte por carretera, se han evaluado únicamente los impactos ambientales atribuibles al consumo de energía de los vehículos. A diferencia de las máquinas, no se ha considerado la amortización del peso del camión de acero ni su mantenimiento. Esta hipótesis simplificadora se justifica debido a que las operaciones de mantenimiento y depreciación de los camiones son significativamente menores, en relación con su consumo, que las de las máquinas de construcción sujetas a un mayor desgaste.

La energía considerada es el diésel. A partir de esta referencia, se han detallado las hipótesis y los cálculos que conducen a los datos ambientales reducidos a la tonelada.kilómetro (una tonelada transportada en un kilómetro). El factor de emisión del diésel proviene de la base de carbono ADEME. El consumo de energía utilizado se ha tomado del folleto FD P 01-015 "Provisión de un litro de diésel y su combustión en un camión de 28 toneladas". La retroalimentación de las empresas de obras viales ha permitido establecer que:

- El consumo medio de transporte por semirremolque de 40 t (carga útil 28 t) en lleno es de 45 L/100 km.
- Para determinar el consumo en vacío, se aplica un factor de 2/3.

El transporte de emulsiones se ha realizado en esparcidoras de ligantes, especialmente dedicadas a esta actividad. El consumo medio de un esparcidor depende de su capacidad (normalmente 4, 6, 8 o 10 m³). Como primera aproximación, se ha considerado el impacto de las t.km del esparcidor equivalente al de un camión de 14 t con retorno vacío. Por lo tanto, el impacto medioambiental del camión de retorno vacío de 14 t es idéntico al del transporte de emulsión en un esparcidor.

Maquinaria

El coste medioambiental de una máquina se ha establecido en base a los siguientes parámetros:

- **[U]:** Número de horas de uso promedio por día (Horas/día): Se refiere a las horas de funcionamiento registradas en el contador del equipo.
- **[DVE]:** Vida útil de la máquina (en horas): Corresponde a la primera vida útil habitual del equipo en las empresas de carreteras antes de su venta.
- **[M]:** Masa de la máquina (en toneladas).
- **[E]:** Entrevistas realizadas a expertos y operadores.

- **[T]:** Transferencias necesarias para el funcionamiento del equipo.
- **[FE]:** Factores de emisión asociados al combustible (diésel) y al acero.

Los parámetros utilizados en SEVE se adaptan específicamente a los equipos de trabajo en carretera y no son aplicables a equipos de producción industrial, como los utilizados en canteras, debido a las diferencias significativas en tasas de inactividad, vida útil y coeficientes de mantenimiento.

Para la evaluación de las máquinas, se ha tenido en cuenta la infraestructura necesaria, considerándose insignificantes los impactos del transporte por carretera y el transporte "in situ". El consumo de combustible de las máquinas (L/h) se ha obtenido a través de una encuesta realizada entre los miembros de *Routes de France*, abarcando 71 subfamilias de máquinas incluidas en SEVE. El combustible utilizado es diésel no de carretera (GNR).

Sólo es necesario trasladar máquinas no registradas mediante camiones portamáquinas. Los vehículos que utilizan diésel no se ven afectados por estas transferencias. El transporte de un camión a una obra de construcción se incluye en su horario de funcionamiento. Un "paquete de transferencia" se ha establecido sobre la base de una transferencia cada 3 días por máquina, representando 15 litros por transferencia, o 5 litros por día por máquina (datos de Routes de France).

La depreciación [A] se evalúa en toneladas de acero por día de uso, según la ecuación nº [A] =

$$\frac{[M]}{[DVE \times U]} \quad 5:$$

$$[A] = \frac{[M]}{[DVE \times U]} \quad 5. \text{ EVALUACIÓN DE LA DEPRECIACIÓN.}$$

Después de esta primera vida útil, las máquinas generalmente se reacondicionan para funcionar en el mercado de segunda mano. En SEVE, el enfoque adoptado consiste en distribuir los costes medioambientales de fabricación de las máquinas a lo largo de esta primera vida, sin considerar la etapa de reacondicionamiento y fin de vida de las máquinas.

El coste de mantenimiento [E] se estima de la siguiente manera:

$$[E] = \text{Coeficiente de mantenimiento} \times [A] \quad 6. \text{ COSTE DE MANTENIMIENTO.}$$

El coeficiente de mantenimiento es un valor que se aplica a la masa de material inicial para evaluar el coste de mantenimiento. En promedio, es 1 para equipos convencionales y 2 para equipos que consumen muchas piezas de desgaste.

Producción de las mezclas en caliente

Para calcular el impacto medioambiental vinculado a la fabricación de mezclas bituminosas en caliente, se ha considerado el uso de gas natural. Los datos relacionados con estos combustibles provienen de la ADEME Carbon Base.

El consumo energético de la planta de asfalto (excluyendo el transporte *upstream*) se ha obtenido de las siguientes fuentes: el consumo del quemador/secadora, que representa alrededor del 75% del consumo total. El consumo del quemador depende de múltiples parámetros, y se han utilizado tres datos de entrada en el modelo térmico SEVE: la temperatura de fabricación del revestimiento, el contenido de agua de los materiales y el contenido de agua residual de las mezclas (solo para mezclas fabricadas a menos de 100°C).

La temperatura del recubrimiento es la temperatura recomendada en su hoja técnica. El contenido medio de agua de los materiales se ha calculado a partir del contenido de agua de los constituyentes (arena, grava, áridos asfálticos, etc.), siendo variable para cada fórmula. El porcentaje de áridos asfálticos se ha calculado a partir de los constituyentes de la fórmula cuyo impacto en el "uso de áridos asfálticos" es igual a 1.

Se han considerado los siguientes consumos adicionales: funcionamiento del o de los cargadores que alimentan la planta, caldera para mantener los aglutinantes a temperatura, funcionamiento de las partes eléctricas en la unidad de control y en la sala del administrador/controlador de la estación, y depreciación de instalaciones (hormigón + acero). Estos consumos adicionales incluyen almacenamiento de conglomerantes, operación de la planta, operación de maquinaria y depreciación de la construcción de la planta (hormigón/acero).

Producción de la mezcla reciclada en frío

Los impactos ambientales de la etapa de producción del tren de reciclado provienen del estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) encargado por *Routes de France*, que permitió la publicación en 2022 del módulo de información ambiental para mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa. Los factores considerados incluyen:

- Consumo atribuible al funcionamiento del mezclador.

- Funcionamiento del cargador de alimentación de la fábrica.
- Funcionamiento de la fábrica (instalaciones eléctricas).
- Almacenamiento del aglutinante.

A diferencia de las plantas de asfalto, el mantenimiento y la amortización de estas instalaciones a lo largo de su ciclo de vida se consideran insignificantes.

Carga que sale de la obra

El impacto ambiental de los materiales destinados a ser reciclados es nulo, excluyendo el transporte, ya que este se contabiliza de forma independiente en SEVE.

La Figura 44 muestra un esquema completo del proceso de modelado en SEVE TP.

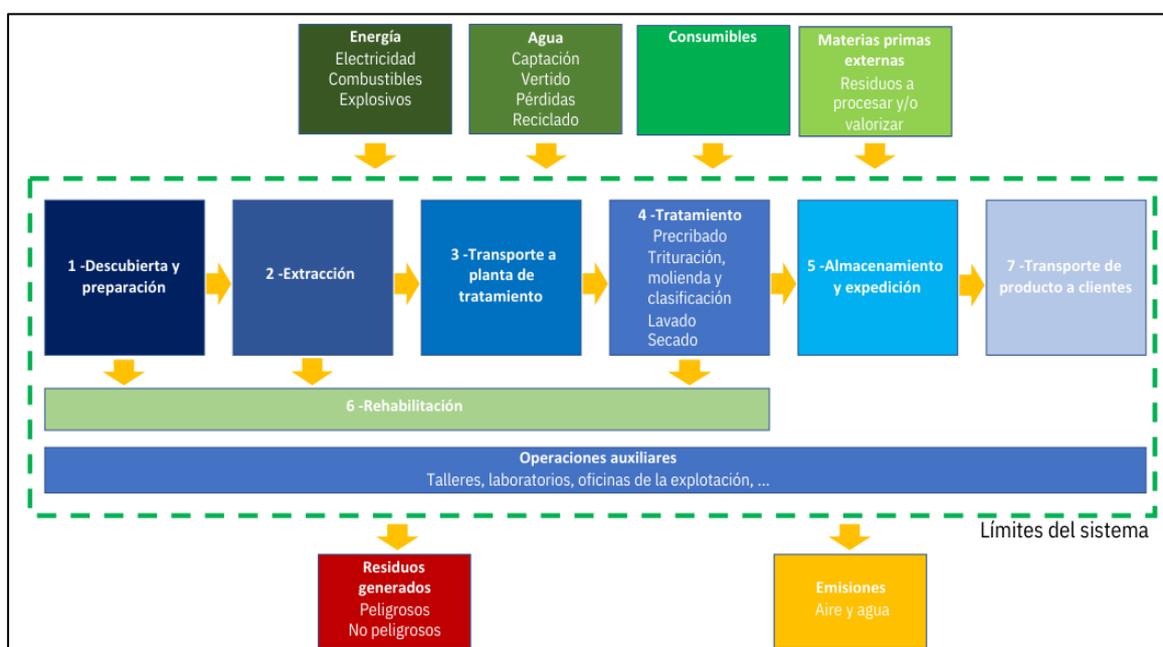


FIGURA 44. ESQUEMA DEL PROCESO DE MODELADO. FUENTE: SEVE TP.

5. Comparación de resultados.

Seguidamente, se han comparado resultados obtenidos de la simulación para identificar las diferencias significativas entre la solución convencional y la solución alternativa implementada mediante reciclado en frío "in situ". Igualmente, se han analizado las áreas donde la nueva técnica ha demostrado ventajas en términos de sostenibilidad ambiental.

6. Elaboración de conclusiones.

Basándose en los resultados de la comparativa, se han elaborado unas conclusiones que destacan las ventajas ambientales de la nueva solución implementada mediante reciclado en frío "in situ" en comparación con la solución convencional. Asimismo, se han resaltado los aspectos específicos en los que la técnica de reciclado en frío demuestra ser más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

7. Documentación de resultados.

Por último, se han guardado los resultados obtenidos de la simulación, incluyendo los datos de entrada, los parámetros configurados, los resultados de la evaluación ambiental y las conclusiones elaboradas. Esta documentación sirve como evidencia del enfoque sostenible adoptado en la selección de la nueva solución constructiva y como referencia para futuros proyectos.

3.4. DEFINICIÓN DEL PROTOCOLO DE ACTUACIÓN PARA LA APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA SOLUCIÓN

En esta última fase, se han definido los requisitos necesarios para llevar a cabo la implementación de la solución, garantizando la calidad tanto de la ejecución como de los materiales resultantes. Las tareas realizadas son las que se incluyen a continuación.

3.4.1. REQUISITOS DE MAQUINARIA Y PERSONAL

Primero, se han establecido los requisitos tanto de maquinaria como de personal necesarios para llevar a cabo el reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa. Este proceso ha implicado la especificación detallada del tipo, la cantidad y las características de la maquinaria requerida, así como la determinación y la cualificación del personal involucrado en la obra.

Para lograr una planificación adecuada, se ha recurrido a diversas fuentes de información. Se ha consultado la documentación disponible de la empresa y se han revisado informes técnicos externos debido a la naturaleza innovadora de esta técnica.

3.4.2. FASES DE EJECUCIÓN

Seguidamente, se han establecido los protocolos de ejecución detallados, definiendo claramente las fases y los procedimientos necesarios para llevar a cabo el reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa. Este proceso incluye la preparación del firme, el fresado, la adición de ligante y aditivos, la mezcla, la extensión, la compactación, el curado y el tratamiento superficial.

Para organizar y visualizar estas fases de manera eficiente, se ha elaborado un diagrama de Gantt utilizando la herramienta Project de Microsoft. Este diagrama contempla todas las etapas de la solución adoptada, con especial énfasis en las fases que involucran el reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa.

3.4.3. PLAN DE CONTROL Y ENSAYO

Finalmente, se han establecido los procedimientos de control de obra, definiendo un plan exhaustivo de control y ensayo para garantizar la calidad tanto de la ejecución como de los materiales resultantes. Este plan abarca tanto los ensayos en laboratorio como las pruebas "in situ", incluyendo varios aspectos clave:

- **Control de la dosificación:** Verificación precisa de las proporciones de materiales utilizados para asegurar la consistencia de la mezcla.
- **Control de la homogeneidad:** Aseguramiento de la uniformidad en la mezcla de materiales, garantizando una distribución adecuada del ligante y los aditivos.
- **Control de la compactación:** Evaluación de la densidad alcanzada durante el proceso de compactación para asegurar la durabilidad y estabilidad del firme.
- **Control de la resistencia:** Realización de pruebas de resistencia para verificar que el material cumple con los requisitos estructurales especificados.
- **Control de la adherencia:** Ensayos para asegurar la adecuada adhesión entre capas, evitando deslizamientos y fallos prematuros.
- **Control de la regularidad:** Evaluación de la superficie final para asegurar que cumple con los estándares de regularidad y confort de rodadura.

Adicionalmente, se han definido criterios claros de aceptación y corrección para aplicar en caso de que se detecten incumplimientos. Estos criterios incluyen tolerancias específicas y procedimientos correctivos detallados, asegurando que cualquier desviación de los estándares de calidad se aborde de manera inmediata y efectiva, manteniendo así la integridad y longevidad de la obra.

Además de la normativa correspondiente, se ha consultado el documento "Recomendaciones para el control de calidad" en materia de firmes bituminosos del Gobierno de Aragón.

3.4.4. VALORACIÓN ECONÓMICA

La valoración económica se ha llevado a cabo mediante un desglose detallado de la obra en unidades de medición y monetarias. Esto ha permitido obtener una estimación precisa del coste

total de la solución, enfocándose en la tecnología del reciclado en frío con emulsión. Para lograrlo, se ha consultado una base de datos interna y se han considerado otras fuentes estándar de información económica en el sector de la construcción como, por ejemplo, el Instituto Valenciano de la Edificación (IVE).

4. DESARROLLO

4.1. ESTABLECIMIENTO DE LA SOLUCIÓN ALTERNATIVA DEL PROYECTO CONSTRUCTIVO CON RFE III

4.1.1. SELECCIÓN Y VIABILIDAD DEL CASO DE ESTUDIO

Para la selección del caso de estudio se aplica el Artículo 20 de la Orden Ci/Cular 2/2023 del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA, 2023). En particular, la Figura 45 de dicha orden, la cual presenta las diferentes posibilidades de reutilización “in situ” con emulsión bituminosa disponibles en España actualmente.

	TIPO I	TIPO II	TIPO III
Material reutilizado del firme existente	Capa bituminosa (espesor ≤ 5 cm) + material granular	Capa(s) bituminosa(s) (espesor de 5 a 10 cm) + base no bituminosa	Mezclas bituminosas
Proporción de material bituminoso (%)	≤ 60	60-100	100
Espesor reutilizado (cm)	8-15	8-15	6-12(*)

(*) Excepcionalmente se podrá llegar a los 15 cm de espesor siempre que en el tramo de prueba se compruebe que se pueden obtener los valores de densidad y resistencia mecánica con el equipo de compactación aprobado

FIGURA 45. TIPOS DE REUTILIZACIÓN "IN SITU" CON EMULSIÓN EXISTENTES EN ESPAÑA. FUENTE: (MITMA, 2023).

Este trabajo se enfoca exclusivamente en el reciclado en frío con emulsión tipo III. La normativa indica que esta técnica solo puede emplearse en carreteras con un espesor mínimo de mezcla bituminosa de 6 cm. Para verificar el cumplimiento de esta condición, se procede al análisis de los testigos extraídos en ambos casos:

Carretera CV – 668 en Ontinyent, (Valencia)

En la carretera CV-668 se extrajeron un total de nueve testigos distribuidos entre el PK 0+000 y el PK 3+500. En el margen derecho se ubicaron cinco testigos; cuatro en el eje y uno en la rodada exterior, mientras que en el margen izquierdo se tomaron cuatro testigos; dos en el eje y dos (2) en la rodada exterior. Los testigos muestran la presencia de capas de mezcla bituminosa y macadam con espesores variables. Sin embargo, se ha observado que en muchos testigos el

espesor de la mezcla bituminosa es inferior a los 6 cm requeridos por la normativa para la aplicación del RFE tipo III. Para detalles específicos sobre el espesor de cada capa y la ubicación exacta de los testigos, se puede consultar el croquis en el APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 0 TESTIGOS Y SECCIONES ESTUDIADAS.

Carretera A – 221 en Caspe, (Zaragoza)

En la carretera A-221 se obtuvieron cinco testigos entre el PK 48+000 y el PK 52+000, distribuidos de manera similar al caso anterior. De estos, dos testigos corresponden al margen derecho y tres al margen izquierdo. En este caso, muestran una mayor homogeneidad, con dos capas de mezclas bituminosas que superan los 5 cm, llegando hasta 11 cm en algunos puntos. Este resultado confirma la viabilidad de aplicar la técnica de reciclado en frío con emulsión (RFE) tipo III en esta carretera. Los detalles específicos sobre el espesor de cada capa y la ubicación de los testigos se encuentran en el croquis del APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 0 TESTIGOS Y SECCIONES ESTUDIADAS.

En consecuencia, este análisis inicial determina que la rehabilitación del tramo de la carretera A-221 en Caspe (Zaragoza) es viable utilizando RFE tipo III, mientras que se descarta la intervención en la carretera CV-668 en Ontinyent (Valencia).

El caso de estudio seleccionado, por tanto, se corresponde con la carretera A-221 de Quinto de Ebro a Gandesa en Caspe (Zaragoza). Más concretamente, en el tramo entre el desvío a Chiprana y la intersección con la carretera A-230, del punto kilométrico 48+900 al 52+065.

Caspe es un municipio de la provincia de Zaragoza, en la comunidad autónoma de Aragón, ubicado al noreste de la península ibérica (ver Figura 46).



FIGURA 46. UBICACIÓN DE CASPE EN ESPAÑA. FUENTE: WIKIPEDIA.

Caspe es la capital de la comarca del Bajo Aragón-Caspe y se sitúa a 107 km de la capital aragonesa (ver Figura 47). Su término municipal es de 503,33 km², siendo el cuarto más extenso de Aragón. Está atravesado por la carretera N-211 entre los PK 259 y 290, además de por la carreteras autonómicas A-221, que permite la comunicación con Escatrón y Maella, y A-230, que conecta con Bujaraloz.



FIGURA 47. UBICACIÓN DE CASPE EN LA PROVINCIA DE ZARAGOZA. FUENTE: WIKIPEDIA.

El tramo de estudio, que abarca desde el PK 48+900 hasta el PK 52+065 de la carretera A-221 (ver Figura 48), forma parte de la Red de Carreteras de Aragón. Esta red está integrada por las carreteras que discurren completamente dentro del territorio de Aragón y son de titularidad de la administración autonómica. Está regulada por la Ley 8/1998, de 17 de diciembre, de Carreteras de Aragón.

La Red de Carreteras de Aragón incluye la Red Autonómica, bajo la competencia de la Diputación General de Aragón, así como la Red Provincial gestionada por las Diputaciones Provinciales de Huesca, Teruel y Zaragoza, y las redes municipales de los diversos municipios de la comunidad autónoma.

En Aragón, esta red coexiste con la Red de Carreteras del Estado, que es competencia del Ministerio de Fomento, y con otras carreteras gestionadas por las Confederaciones Hidrográficas.

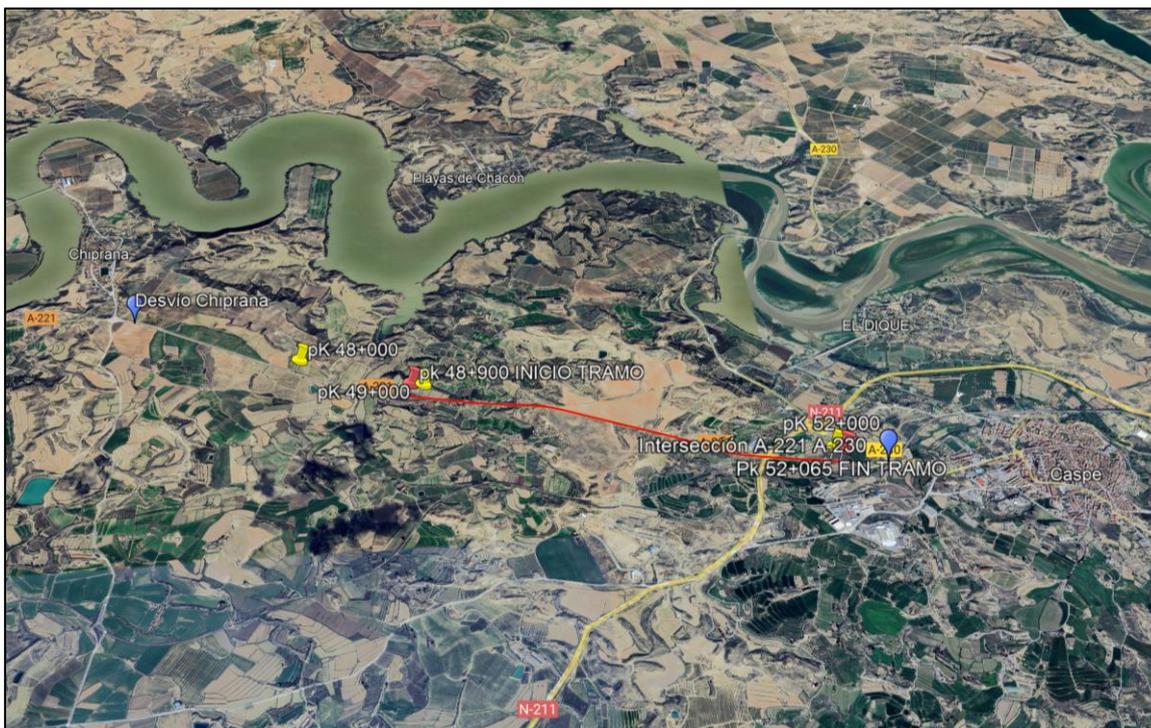


FIGURA 48. UBICACIÓN TRAMO DE ESTUDIO. FUENTE: GOOGLE EARTH PRO.

4.1.2. ESTUDIO PREVIO DE LA OBRA

El estudio previo tiene como objetivo obtener un conocimiento detallado de las condiciones actuales antes de avanzar con la formulación de la mezcla. Este proceso ha sido fundamental para identificar las particularidades del tramo específico, facilitando así una planificación adecuada y asegurando la implementación exitosa de la técnica de reciclado en el tramo seleccionado.

Revisión de la información disponible e inspección visual de la carretera

A partir de la revisión exhaustiva de la información disponible, se han obtenido datos significativos sobre diversos aspectos relacionados con el tramo de carretera seleccionado:

Características generales de la carretera:

- **Longitud total de la carretera:** La carretera A-221 tiene su inicio en la intersección N-232 (Km. 194,190), T.M. Quinto y finaliza en L.P. Tarragona, T.M. Maella, con una longitud total de 82,21 km.
- **Localización del tramo:** El tramo de la carretera está ubicado entre el desvío a Chiprana y la intersección con la carretera A-230 en Caspe, Zaragoza.

- **Tipología y clasificación de la vía:** Se trata de una vía convencional y está clasificada como básica.
- **Tipo de red vial:** La carretera forma parte de la red autonómica del Gobierno de Aragón.
- **Titular y gestor de la carretera:** La titularidad corresponde a la Diputación General de Aragón (DGA) y la gestión a la Dirección General de Carreteras (DGC).
- **Sector de conservación y explotación al que pertenece:** El tramo está asignado al sector de conservación [3Z].

Características específicas del tramo y entorno:

- **Orografía de la zona:** La Depresión del Ebro genera una extensa llanura ondulada, interrumpida por los valles de los afluentes del Río, con altitudes que oscilan entre los 200 y los 400 m.
- **Naturaleza del tramo:** Se trata de un tramo interurbano y rural.
- **Perfil longitudinal del tramo:** Presenta un perfil longitudinal bastante marcado, con una pendiente máxima del 8,7 % y una pendiente media del 3,3 %.
- **Características geométricas de la plataforma:** La plataforma está configurada con una sola calzada de 7,40 metros de ancho, dividida en dos carriles de circulación, uno por cada sentido. Los arcenes tienen un ancho de 0,8 y no cuenta con bermas adicionales.
- **Tipo de relieve:** El relieve del área varía según tramos llanos y ondulados.
- **Condiciones climatológicas de la zona:** La carretera pertenece a una zona térmica estival cálida y una zona pluviométrica poco lluviosa, es decir, < 600 mm anuales.

Características del firme existente y estado del pavimento:

- **Naturaleza y espesor de las capas del firme:** El firme existente está compuesto por dos capas de mezcla bituminosa con un espesor total de 11 cm, siendo homogéneas a lo largo de todo el tramo.
- **Inspección visual:** Se ha realizado una inspección visual detallada que ha permitido identificar diferentes tipos de deterioros a lo largo de la superficie.

Solicitaciones del tráfico:

- **IMD y IMD-p:** La Intensidad Media Diaria (IMD) de tráfico es 1.434 vehículos/día, con 141 vehículos pesados/día (9,83 %).

- **Tramo de concentración de accidentes:** Se ha identificado un tramo de concentración de accidentes entre el PK 51+000 y el 52+600, con un Índice de Peligrosidad de 85,74506. Dicho tramo registró 3 accidentes con víctimas entre los años 2017 y 2019.

Otros:

- Catálogo de la Red Autonómica de Carreteras de Aragón.
- Plan General de Carreteras de Aragón 2013 – 2024.

Los documentos detallados que respaldan esta información se encuentran en el APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 1 INFORMACIÓN DISPONIBLE, proporcionando una base sólida de datos históricos y técnicos sobre el estado del tramo en cuestión.

Por otro lado, la inspección visual realizada ha permitido identificar las condiciones actuales del firme, posibles daños y áreas que requieren especial atención durante la rehabilitación. Todas las imágenes capturadas y las observaciones detalladas se encuentran documentadas en el APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 1 INSPECCIÓN VISUAL.

Extracción de testigos y análisis de la sección

La Figura 49 muestra los testigos extraídos en el tramo de estudio.



FIGURA 49. COLLAGE FOTOS TESTIGOS CARRETERA A-221. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El análisis de dichos testigos ha permitido elaborar un croquis detallado de la sección existente, que se presenta en la Figura 50. Este croquis muestra que la sección de la carretera se compone de dos capas de mezclas bituminosas, cada una con un espesor de entre 5 y 6 cm, situadas sobre una base de zahorras. La consistencia en el espesor y composición de las capas justifica la homogeneidad observada a lo largo del tramo.

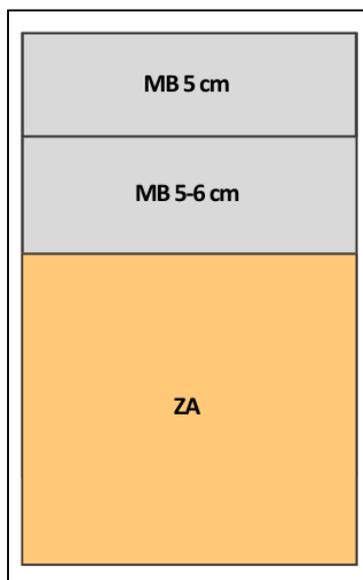


FIGURA 50. CROQUIS DE LA SECCIÓN EXISTENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Granulometría del fresado y caracterización del ligante

Los ensayos de laboratorio han permitido caracterizar la muestra de fresado obtenida y determinar el tipo de reutilización en frío "in situ" que se llevará a cabo. Tanto la granulometría del fresado como las propiedades del ligante bituminoso residual son esenciales para evaluar la capacidad del material reciclado para soportar las cargas de tráfico y las variaciones climáticas, asegurando así que mantenga su integridad y rendimiento bajo las condiciones operativas previstas.

De acuerdo con el Artículo 20 del PG-4, ***"Salvo justificación en contrario, los husos con tamaño máximo nominal de treinta y dos milímetros (32 mm) se utilizarán exclusivamente para aplicaciones con espesores superiores a diez centímetros (> 10 cm)"***. Además, dado que se pretende reciclar el 100% del material bituminoso, se ha determinado que la fórmula de reutilización en frío "in situ" con emulsión de capas de firmes corresponde a la designación RFE III 22. Por tanto, debe cumplir los husos granulométricos especificados por la norma UNE-EN 933-2, que se muestran en la Figura 51.

TIPO DE REUTILIZACIÓN	ABERTURA DE LOS TAMICES (norma UNE-EN 933-2) (mm)							
	45	32	22	16	8	2	0,5	0,063
RFE I 32	100	78-100		55-85	40-70	15-40	5-23	0-9
RFE I 22	100	100	80-100		45-73	19-42	7-25	0-9
RFE II 32	100	78-100		55-85	40-70	15-40	5-23	0-7
RFE II 22	100	100	80-100		45-73	19-42	7-25	0-7
RFE III 32	100	78-100		55-85	40-70	15-40	2-20	0-3
RFE III 22	100	100	80-100		45-73	19-42	2-20	0-3

FIGURA 51. HUSOS GRANULOMÉTRICOS. CERNIDO ACUMULADO (% EN MASA) NORMA UNE - EN 933-2. FUENTE: ARTÍCULO 20 PG-4: REUTILIZACIÓN IN SITU CON EMULSIÓN DE CAPAS DE FIRMES.

Los resultados del análisis granulométrico del material fresado se detallan a continuación, cumpliendo con los límites establecidos para un RFE III 22:

- **Granulometría cernido tamices RFE III 22 (mm):** El fresado cumple los estándares de la norma y sus tolerancias, con un porcentaje de material mayor a 2 mm del 18,6%, un porcentaje de material menor a 2 mm y mayor a 0,063 mm del 6,3%, y un porcentaje de material menor a 0,063 mm del 0,4%.
- **Contenido de ligante residual:** El contenido de ligante residual en el material fresado es del 4,17%.
- **Penetración y punto de reblandecimiento:** La penetración del ligante es de 5,7 mm y el punto de reblandecimiento es de 99,3 °C.

La Tabla 2 resume estos resultados:

TABLA 2. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE FRESADO ANALIZADA EN EL LABORATORIO I. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

CARACTERÍSTICAS		NORMAS	UNIDADES	RESULTADOS
Granulometría cernido tamices RFE III 22 (mm)	> 2	UNE - EN 933-2	% sobre mezcla	18,6
	< 2 y > 0,063			6,3
	< 0,063			0,4
Contenido de ligante residual		UNE - EN 12697-1		4,17
Penetración		UNE - EN 1426	mm	5,7
Punto de reblandecimiento		UNE - EN 1427	° C	99,3

No obstante, tanto el APÉNDICE Nº 3 DEL ANEJO 1 GRANULOMETRÍA DE FRESADO como el APÉNDICE Nº 4 DEL ANEJO 1 CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE recogen toda la información relevante de los ensayos realizados.

4.1.3. ESTUDIO ESTRUCTURAL DE LA OBRA

El estudio previo ha sido determinante para reconocer la necesidad urgente de emprender una rehabilitación estructural en el tramo de carretera en estudio. Esto se debe principalmente a que el pavimento está cerca de alcanzar su límite de resistencia estructural. Sin embargo, hay otros factores importantes que también se abordarán en este apartado.

Evaluación del estado del firme y de su nivel de agotamiento

Para evaluar el estado del firme, es fundamental identificar el tipo de pavimento existente. Según la Norma 6.3 IC, los firmes se clasifican en:

- Flexibles.
- Semiflexibles.
- Semirrígidos.
- Con pavimento de hormigón.

Para simplificar los criterios de intervención, los tres primeros tipos se agrupan bajo la denominación de firmes con pavimento bituminoso. La norma también establece que: "*Se consideran firmes flexibles los constituidos por capas granulares no tratadas y materiales bituminosos con un espesor inferior a 15 cm*". Por tanto, se ha determinado que el tramo en cuestión tiene un firme flexible o un firme con pavimento bituminoso.

Otro aspecto crucial en la evaluación del firme es el tráfico previsto. Para caracterizar la categoría de la acción del tráfico, fundamentalmente del tráfico pesado, se emplea la Intensidad media diaria de vehículos pesados (IMD-p) que se prevea en el carril de proyecto para el año de apertura al tráfico. En este caso, se ha estimado que el tráfico en el período de servicio del firme, considerando un incremento anual del 1,44% según la Orden FOM/3317/2010, corresponderá a una IMD-p de 143 vehículos en el año 2024. Esta estimación se detalla la Tabla 3.

TABLA 3. CATEGORÍA DE LA ACCIÓN DEL TRÁFICO EN EL TRAMO ESTUDIADO PARA EL AÑO 2024. FUENTE: ESTACIÓN DE AFORO 0644, RED DE CARRETERAS AUTONÓMICAS DEL GOBIERNO DE ARAGÓN.

ESTACIÓN DE AFORO 0644 CTRA. A - 221 PK 50'10 CASPE (TRÁFICO ESTIMADO PARA EL AÑO 2024)	
IMD	1.455 veh./día
IMD-P	143 veh./día
% pesados	9,83 %
Ligeros	1.248 veh./día
Motos	62 veh./día

Teniendo en cuenta la tabla 1.A (Figura 52) de la Norma 6.3 IC “Rehabilitación de firmes”, la categoría de tráfico es T3. Sin embargo, para optimizar las soluciones de rehabilitación, las categorías de tráfico pesado T3 y T4 pueden subdividirse, conforme a lo indicado en la tabla 1B (Figura 53). En este caso específico, la categoría de tráfico se puede concretar a T31.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T00	T0	T1	T2	T3	T4
IMDp (vehículos pesados/día)	≥ 4 000	< 4 000 ≥ 2,000	< 2 000 ≥ 800	< 800 ≥ 200	< 200 ≥ 50	< 50

FIGURA 52. TABLA 1.A - CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO. FUENTE: NORMA 6.3 IC: REHABILITACIÓN DE FIRMES.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO (*)	T31	T32	T41	T42
IMDp (vehículos pesados/día)	< 200 ≥ 100	< 100 ≥ 50	< 50 ≥ 25	< 25

FIGURA 53. TABLA 1.B - DIVISIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T3 Y T4. FUENTE: NORMA 6.3 IC: REHABILITACIÓN DE FIRMES.

Dadas las características del tráfico en la Red Autonómica Aragonesa expuestas en la Figura 54, que emplea los sufijos “a”, “b” y “c” para escalones decrecientes de las diferentes IMD-p, la subcategoría de tráfico es una T3b.

CATEGORÍAS DEL TRÁFICO PESADO		
CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	IMDp
T1	T1	800 - 2000
T2	T2a	600 - 799
	T2b	400 - 599
	T2c	200 - 399
T3	T3a	150 - 199
	T3b	100 - 149
	T3c	50 - 99
T4	T4a	25 - 49
	T4b	< 25

FIGURA 54. DIVISIÓN DE LAS SUBCATEGORÍAS DE TRÁFICO SEGÚN EL GOBIERNO DE ARAGÓN. FUENTE: "RECOMENDACIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES DE LA RED AUTONÓMICA ARAGONESA".

Para llevar a cabo una evaluación completa del estado del firme en el tramo de carretera en estudio, es esencial realizar una auscultación detallada sobre las condiciones estructurales y superficiales del pavimento. Esta evaluación se ha centrado en dos aspectos clave: las deflexiones y el Índice de Regularidad Internacional (IRI).

La Nota Técnica Refundida sobre los factores de corrección de los equipos de auscultación de la deflexión en explanadas, firmes y pavimentos en la Red de Carreteras del Estado, afirma que:

“... A pesar de la consideración de la deflexión patrón realizada en las normas 6.1 IC y 6.3 IC, la viga Benkelman no se emplea como equipo de medición estándar de las deflexiones por la afcción a la seguridad vial que supone su uso ... Por este motivo, la deflexión obtenida con curvímetro, **no requerirá ningún factor de corrección para ser equivalente, a efectos prácticos, a la que se refieren como deflexión patrón las normas 6.1 IC Y 6.3 IC**”.

La deflexión característica máxima medida en el tramo fue de $74 \cdot 10^{-2}$ mm. De acuerdo con los criterios de proyectos marcados por la Figura 55 de la Norma 6.3 IC para la rehabilitación de firmes con pavimento bituminoso, los umbrales del valor puntual de la deflexión patrón para el agotamiento estructural en firmes flexibles y semiflexibles están por encima de la deflexión medida. Esto indica que el firme en el tramo estudiado no está agotado estructuralmente.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
T00 y T0	T1	T2	T3	T4
50	75	100	125	150 (*) 200 (**)
(*) Firmes con espesor de pavimento bituminoso ≥ 5 cm (**) Firmes con espesor de pavimento bituminoso < 5 cm				

FIGURA 55. UMBRALES DEL VALOR PUNTUAL DE LA DEFLEXIÓN PATRÓN PARA EL AGOTAMIENTO ESTRUCTURAL EN FIRMES FLEXIBLES Y SEMIFLEXIBLES. FUENTE: NORMA 6.3 IC: REHABILITACIÓN DE FIRMES.

Los resultados de las deflexiones se presentan detallados en el APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 2 DEFLEXIONES, según los siguientes conceptos:

- Cuadro de tramos estudiados: Se detalla cada tramo analizado, incluyendo la longitud y las características específicas de cada sección del firme.
- Gráficos de deflexiones y radios de curvatura: En estos gráficos se presentan los valores de deflexión (expresados en centésimas de milímetro, 10^{-2} mm) corregidos por temperatura y humedad, así como los radios de curvatura asociados a dichas deflexiones (expresados en metros). Los gráficos muestran los resultados obtenidos cada 5 metros, facilitando una visión detallada y precisa del estado del firme a lo largo del tramo estudiado.

Los resultados del IRI obtenidos indican claramente la necesidad de rehabilitar el pavimento estudiado, ya que varias de las secciones analizadas superan los 4 puntos. Para una carretera convencional, estos valores sugieren una falta significativa de suavidad en la superficie del pavimento. Esta condición no solo afecta negativamente la comodidad de los usuarios, incrementando la incomodidad y el desgaste de los vehículos, sino que también reduce la vida útil de la carretera. Además, un pavimento irregular aumenta el riesgo de accidentes y los costes

de mantenimiento. Por lo tanto, es fundamental abordar estas deficiencias para garantizar una circulación segura y eficiente.

Estos resultados se adjuntan detallados en el APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 2 IRI siguiendo el mismo formato de presentación que las deflexiones.

En definitiva, la combinación de los datos obtenidos de la auscultación mediante curviámetro y la medición del IRI ha permitido realizar una evaluación detallada del estado del firme. Los resultados indican que, aunque el pavimento está cerca de su límite de resistencia estructural, no muestra signos de agotamiento estructural. Sin embargo, los valores altos de IRI destacan la necesidad de una intervención para mejorar la calidad del pavimento, asegurando así tanto la durabilidad de la infraestructura como el confort y seguridad de los usuarios.

Diagnóstico sobre el estado del firme

Para establecer un diagnóstico preliminar adecuado del tramo de carretera analizado, se ha elaborado una tabla resumen con información relevante sobre el estado del firme, permitiendo llevar a cabo una segmentación en tramos homogéneos. Esta tramificación se ha realizado siguiendo las directrices de la Norma 6.3 IC de Rehabilitación de Firmes, que establece que los tramos deben tener una longitud comprendida entre 200 y 1000 metros salvo justificación adicional.

Según la Norma 6.3 IC, *“El análisis conjunto de la información permitirá realizar una tramificación de la carretera en tramos homogéneos para su estudio y para la definición de las posibles actuaciones de rehabilitación. En la tramificación se estudiarán especialmente los casos en que existan discrepancias entre los valores de la deflexión en relación con la sección estructural del firme y el aspecto superficial del pavimento, con el fin de conocer las razones de tales discrepancias, efectuando eventualmente trabajos complementarios de reconocimiento (nuevas medidas de auscultación, sondeos, calicatas, etc.), que permitan evaluar con la mayor precisión posible la solución del tramo en estudio”*.

La tabla resumen realizada proporciona una visión general del estado del firme en cada subtramo, incluyendo parámetros como el tipo de relieve, los valores de deflexión máxima (DFK Máx.), el Índice de Regularidad Internacional (IRI Máx.) y los tipos de deterioros observados.

Subtramo 1 (PK 48+900 a PK 49+900, Longitud: 1000 m, Relieve: Ondulado):

- **DFK Máx.:** 74 (carril derecho) y 50 (carril izquierdo).

- **IRI Máx.:** 4,12.
- **Tipo de deterioros:** Grietas en Bloque, Grietas Longitudinales, Grietas Transversales, Hundimientos, Ahuellamientos y Desplazamientos.
- **Diagnóstico preliminar:** Combinación de eliminación parcial y reposición del firme existente, y recrecido.

Subtramo 2 (PK 49+900 a PK 50+600, Longitud: 700 m, Relieve: Llano):

- **DFK Máx.:** 61 (carril derecho) y 48 (carril izquierdo).
- **IRI Máx.:** 3,93.
- **Tipo de Deterioros:** Grietas en Bloque, Grietas Longitudinales, Grietas Transversales y Hundimientos.
- **Diagnóstico Preliminar:** Combinación de eliminación parcial y reposición del firme existente, y recrecido incrementando el bombeo.

Subtramo 3 (PK 50+600 a PK 50+900, Longitud: 300 m, Relieve: Ondulado):

- **DFK Máx.:** 68 (carril derecho) y 48 (carril izquierdo).
- **IRI Máx.:** 3,04.
- **Tipo de Deterioros:** Grietas en Bloque, Grietas Longitudinales y Grietas Transversales.
- **Diagnóstico Preliminar:** Combinación de eliminación parcial y reposición del firme existente, y recrecido.

Subtramo 4 (PK 50+900 a PK 51+100, Longitud: 200 m, Relieve: Llano):

- **DFK Máx.:** 54 (carril derecho) y 48 (carril izquierdo).
- **IRI Máx.:** 3,82.
- **Tipo de Deterioros:** Grietas Longitudinales, Grietas Transversales y Ahuellamientos.
- **Diagnóstico Preliminar:** Combinación de eliminación parcial y reposición del firme existente, y recrecido incrementando el bombeo.

Subtramo 5 (PK 51+100 a PK 51+865, Longitud: 765 m, Relieve: Ondulado):

- **DFK Máx.:** 47 (carril derecho) y 42 (carril izquierdo).
- **IRI Máx.:** 4,31.
- **Tipo de Deterioros:** Grietas en Bloque, Grietas Longitudinales, Grietas Transversales, Hundimientos, Ahuellamientos y Grietas en forma de Cocodrilo.

- **Diagnóstico Preliminar:** Combinación de eliminación parcial y reposición del firme existente, y recrecido.

Subtramo 6 (PK 51+865 a PK 52+065, Longitud: 200 m, Relieve: Llano):

- **DFK Máx.:** 60 (Carril derecho) y 42 (Carril izquierdo).
- **IRI Máx.:** 2,61.
- **Tipo de deterioros:** Grietas longitudinales y Hundimientos.
- **Diagnóstico preliminar:** Combinación de eliminación parcial y reposición del firme existente, y recrecido incrementando el bombeo.

EL APÉNDICE Nº 3 DEL ANEJO 2 DIAGNÓSTICO PRELIMINAR Y TRAMIFICACIÓN recoge los resultados detallados del diagnóstico preliminar y la tramificación, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones y la ejecución de las actuaciones específicas en los subtramos homogéneos.

Análisis de soluciones y selección del tipo más adecuado

Después de completar el diagnóstico preliminar y el análisis estructural, se procede a evaluar las soluciones específicas para la rehabilitación del firme de la carretera, con el objetivo de identificar la alternativa más adecuada en términos de calidad, sostenibilidad y rendimiento a largo plazo. Es crucial considerar los siguientes aspectos para determinar la mejor actuación de rehabilitación:

- **Homogeneidad de la sección del firme:** La sección del firme se mantiene homogénea y consistente a lo largo de todo el tramo.
- **Degradación de la capa superficial:** Se ha detectado una degradación significativa en la capa superficial del pavimento.
- **Deficiencias en el drenaje superficial:** Los patrones de deterioro sugieren deficiencias en el drenaje superficial, lo cual afecta negativamente la capacidad estructural del firme.
- **Estado estructural del firme:** El firme no está agotado estructuralmente, lo que descarta la necesidad de dimensionar la solución en base a las deflexiones.
- **Concentración de accidentes:** Se observa una concentración de accidentes en uno de los tramos analizados.

En base a estos factores, se han evaluado las siguientes actuaciones de rehabilitación estructural conforme a la Norma 6.3 IC:

- Eliminación parcial y reposición del firme existente.
- Recrecimiento aplicado sobre el pavimento actual para reforzarlo.
- Combinación de ambas actuaciones, utilizando técnicas de reciclado para optimizar recursos y reducir costes.

Estas alternativas están alineadas con la estrategia de intervenir en toda la carretera, aprovechando la homogeneidad del pavimento y evitando la demolición total debido a consideraciones de viabilidad técnico-económicas

Proyecto de la solución adoptada

Según la Orden Ci/Cular 2/2023 del (MITMA, 2023), “la reutilización in situ con emulsión de capas de firme podrá ser empleada en las categorías de tráfico pesado T1 a T4, en capas intermedias, de base y subbase. **La elección del espesor de la reutilización in situ, se hará de manera que se reutilicen capas completas de materiales bituminosos del firme existente, permitiéndose penetrar entre 1 y 2 cm en la capa inferior si también fuera bituminosa. Si esto no fuera posible, se evitará que queden sin tratar espesores de mezcla bituminosa inferiores a tres centímetros (< 3 cm), especialmente si no están adecuadamente adheridos a la capa inferior**”. Además, se indica que: “Cuando se proyecte una reutilización in situ con emulsión, de acuerdo con los criterios de la norma 6.3-IC Rehabilitación de firmes, sobre ella se proyectarán capas de mezcla en caliente o semicaliente, reutilizadas o no, en un espesor mínimo...” según la Figura 56, Tabla 11 del Anejo 2 de la Norma.

MATERIAL	COEFICIENTE DE EQUIVALENCIA	LEY DE FATIGA	LIMITACIONES CONSTRUCTIVAS
Mezcla bituminosa en caliente (Tipos D, S y G)	1	$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	<ul style="list-style-type: none"> • Espesor de capa de rodadura (D y S): <ul style="list-style-type: none"> - Para T00, T0 y T1: No admisible. - Para T2: 5-6 cm - Para T3 y T4: 5 cm. • Espesor mínimo de capa intermedia: 5 cm, excepto en capas de reposición, reperfilado y en arcenes. • Espesor mínimo de capa de base: 7 cm, excepto en capas de reposición, reperfilado y arcenes.

FIGURA 56. MATERIALES PARA REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DE FIRMES. FUENTE: NORMA 6.3 IC: REHABILITACIÓN DE FIRMES.

Además, se ha evaluado la deflexión característica medida con el curvómetro, cuyos resultados indican una zona de actuación preventiva conforme a la Figura 57, específicamente para un tráfico T3 y deflexiones calculadas entre 40 y 60×10^{-2} mm.

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

(*) Valor mínimo en cualquier punto de la sección transversal del carril de proyecto.
 (**) Ver apartado 9.7.

FIGURA 57. ESPESOR (CM) DE RECRECIMIENTO CON MEZCLA BITUMINOSA EN FIRMES FLEXIBLES Y SEMIFLEXIBLES. FUENTE: NORMA 6.3 IC: REHABILITACIÓN DE FIRMES.

De acuerdo con la Figura 58, que subdivide las categorías de tráfico T3 y T4, se estima que un tráfico T31 con deflexiones de cálculo entre 60 y 80×10^{-2} mm, requeriría un recrido de 6 cm. En este caso, el valor medio de las deflexiones es de aproximadamente 54×10^{-2} mm, superando los 60×10^{-2} mm en una de las secciones establecidas.

DEFLEXIÓN DE CÁLCULO (d_c) (10^{-2} mm)	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO(**)			
	T31	T32	T41	T42
60-80	6	ZONA DE ACTUACIÓN PREVENTIVA		
80-100	8	5		
100-125	10	8	6	5
125-150	12	10 ^(***)	8 ^(***)	6 ^(***)
150-200	15	12 ^(***)	10 ^(***)	8 ^(***)
> 200	ZONA DE ESTUDIO ESPECIAL			

(*) Valor mínimo en cualquier punto de la sección transversal del carril de proyecto.
 (***) Estas subcategorías no podrán utilizarse en el caso de las antiguas carreteras convertidas en vías de servicio no agrícolas de autopistas o autovías interurbanas, salvo que las características del tráfico lo justifiquen y con autorización expresa de la Dirección General de Carreteras.
 ****) Ver apartado 9.7.

FIGURA 58. ESPESOR (CM) DE RECRECIMIENTO CON MEZCLA BITUMINOSA EN FIRMES FLEXIBLES Y SEMIFLEXIBLES CON SUBDIVISIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE TRÁFICO T3 Y T4. FUENTE: NORMA 6.3 IC: REHABILITACIÓN DE FIRMES.

Este enfoque conjunto garantiza que la selección del tipo más adecuado de intervención en el firme de la carretera se base en criterios técnicos sólidos y normativas vigentes, asegurando una rehabilitación efectiva y duradera.

4.2. FÓRMULA DE TRABAJO

En el presente TFM se establece una fórmula de trabajo basada en la evaluación rigurosa de las propiedades y compatibilidades de los materiales disponibles, respaldada por diversas pruebas experimentales.

4.2.1. ANÁLISIS DE LAS MATERIAS PRIMAS DISPONIBLES

Como se ha detallado en el estudio previo, las pruebas de laboratorio siguiendo las normativas UNE-EN 933-1, UNE-EN 12697-1 y UNE-EN 1426 han proporcionado datos precisos sobre la granulometría, el contenido de ligante residual y la penetración del fresado. Estos resultados han sido fundamentales para asegurar la calidad del material reciclado y su comportamiento en el pavimento final. Además, como se presenta a continuación, se ha llevado a cabo una caracterización exhaustiva de las materias primas disponibles, incluyendo el fresado, el ligante, los aditivos y el agua, lo cual ha sido crucial para evaluar la idoneidad de cada componente en la mezcla reciclada.

El fresado, uno de los componentes clave, muestra características óptimas tras los ensayos. Los resultados indican una granulometría adecuada para garantizar una mezcla homogénea, un contenido de ligante residual que contribuye a la cohesión de la mezcla, y una penetración que asegura la flexibilidad necesaria para soportar las cargas de tráfico. La compatibilidad del fresado con los demás componentes también ha sido evaluada, asegurando que la mezcla resultante cumpla con los requisitos de resistencia y durabilidad establecidos. Además, se ha determinado el contenido de agua por secado en estufa, la densidad máxima y la humedad óptima, para ajustar la cantidad necesaria en la mezcla final (ver Tabla 4).

TABLA 4. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE FRESADO ANALIZADA EN EL LABORATORIO II. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

CARACTERÍSTICA	NORMA	UNIDAD	RESULTADO
Contenido de agua	UNE - EN 1097-5	% sobre mezcla	3,95
Densidad máxima	NTL 108/91	t/m ³	2,067
Humedad óptima		% sobre mezcla	8,20

Sin embargo, en el ANEJO 1. ESTUDIO PREVIO se detallan todos los resultados de los ensayos realizados para la caracterización de la muestra de fresado.

Para la selección del ligante y los aditivos, se consideran las propiedades reológicas y su capacidad de interactuar eficazmente con el fresado. La evaluación de estos componentes se ha realizado a través de pruebas experimentales y ensayos de laboratorio, asegurando una respuesta óptima en la mezcla reciclada. En este sentido, está demostrado que la incorporación de aditivos específicos puede mejorar la estabilidad y el rendimiento a largo plazo de la mezcla, adaptándose a las condiciones climáticas y de tráfico de la carretera.

Organizaciones como ASEFMA recomiendan la adición de aditivos rejuvenecedores en la fase betún de la emulsión para las reutilizaciones de tipo II y III, entre los cuales se destaca el QP FLUX. QP FLUX F es un aceite fluidificante de origen vegetal empleado para la producción de emulsiones y de mezclas asfálticas en frío. Debido a su origen natural, no emite ningún olor desagradable ni durante su empleo ni después de la aplicación del producto final, siendo respetuoso con el medio ambiente. A diferencia de los productos derivados de la destilación del crudo, no incluye ningún grupo orgánico y es compatible con todos los emulgentes para la producción de emulsiones, disolviéndose perfectamente en el betún. La Figura 59 muestra sus propiedades físicas y químicas.

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS	
Apariencia a 25°C	Líquido transparente
Densidad a 25°C, g/cm ³	0,88 ± 0.03
Punto de inflamación	> 150°C
Viscosidad a 20°C, °Engler	1,2 ± 0,1

FIGURA 59. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL QP FLUX F. FUENTE: QUÍMICA DE LOS PAVIMENTOS, QDP.

Este aditivo se utiliza para incrementar la penetración del betún en las emulsiones.

Los diversos tipos de betún asfáltico empleados en las emulsiones utilizadas cumplen con las especificaciones del artículo 211 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG-3) y las recogidas en el Anexo Nacional de la norma UNE EN 12591. La Figura 60, Figura 61 y Figura 62 muestran las especificaciones para cada uno de los diferentes tipos de betún asfáltico empleados.

Características	Unidad	Norma	Min.	Máx.
Betún Original				
Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	0,1 mm	EN 1426	35	50
Punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	50	58
Índice de penetración	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Punto de fragilidad Fraass	°C	EN 12593	-	-5
Solubilidad	%	EN 12592	99,0	-
Punto de inflamación	°C	EN 2592	240	-
Residuo después de película fina y rotativa				
Variación de masa	%	EN 12607-1	-	0,5
Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	% p.o.	EN 1426	53	-
Variación del punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	-	11

FIGURA 60. ESPECIFICACIONES CEPASAASFALT 35/50. FUENTE: CEPASA.

Características	Unidad	Norma	Min.	Máx.
Betún Original				
Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	0,1 mm	EN 1426	70	100
Punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	43	51
Índice de penetración	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Punto de fragilidad Fraass	°C	EN 12593	-	-10
Solubilidad	%	EN 12592	99,0	-
Punto de inflamación	°C	EN 2592	230	-
Residuo después de película fina y rotativa				
Variación de masa	%	EN 12607-1	-	0,8
Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	% p.o.	EN 1426	46	-
Variación del punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	-	11

FIGURA 61. ESPECIFICACIONES CEPASAASFALT 70/100. FUENTE: CEPASA.

Características	Unidad	Norma	Min.	Máx.
Betún Original				
Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	0,1 mm	EN 1426	160	220
Punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	35	43
Índice de penetración	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Punto de fragilidad Fraass	°C	EN 12593	-	-15
Solubilidad	%	EN 12592	99,0	-
Punto de inflamación	°C	EN 2592	220	-
Residuo después de película fina y rotativa				
Variación de masa	%	EN 12607-1	-	1,0
Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	% p.o.	EN 1426	37	-
Variación del punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	-	12

FIGURA 62. ESPECIFICACIONES CEPASAASFALT 160/220. FUENTE: CEPASA.

Basándose en las características del caso de estudio, se han realizado las siguientes pruebas experimentales para determinar la dosificación óptima de la mezcla.

4.2.2. DISEÑO DE LA FORMULACIÓN A PARTIR DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

Las emulsiones bituminosas utilizadas son del tipo C60B5 REC, con un contenido de betún del 60% del total de la mezcla. Para el reciclado en frío con emulsión tipo III, se recomienda el uso de betunes blandos o rejuvenecedores debido a su excelente comportamiento. En este estudio, se han evaluado ambas alternativas mediante pruebas con betunes de penetraciones elevadas (70/100 y 160/220), así como la combinación de un betún más duro (35/50) con dos diferentes cantidades de aditivo rejuvenecedor, para comparar su rendimiento con los betunes blandos.

Se propone evaluar el comportamiento de cuatro emulsiones con diferentes tipos de betún y cuatro dosificaciones distintas. Las proporciones recomendadas para el contenido de emulsión varían entre el 2,5% y el 4% del peso total de la mezcla, mientras que el aditivo debe constituir entre el 1% y el 5% del peso de la emulsión. Superar estos límites podría hacer que la operación de reciclado en frío tipo III no sea económicamente viable.

Dado que estas tecnologías son novedosas y las normativas aún no están completamente definidas, también se ha probado una dosificación del 6% de emulsión para evaluar la consistencia y la fiabilidad de los resultados de las pruebas.

En consecuencia, las pruebas propuestas son:

Tipo de ligante y aditivos

- Betún 35/50 con un 2,4% de aditivo sobre el peso de la emulsión.
- Betún 35/50 con un 4,2% de aditivo sobre el peso de la emulsión.
- Betún 70/100 con un 2% de aditivo sobre el peso de la emulsión.
- Betún 160/220 sin aditivo.

Dosificaciones empleadas

- 2,75% de emulsión sobre el peso total de la mezcla.
- 3,5% de emulsión sobre el peso total de la mezcla.
- 4% de emulsión sobre el peso total de la mezcla.
- 6% de emulsión sobre el peso total de la mezcla.

El croquis de la Figura 63 resume las distintas pruebas realizadas.

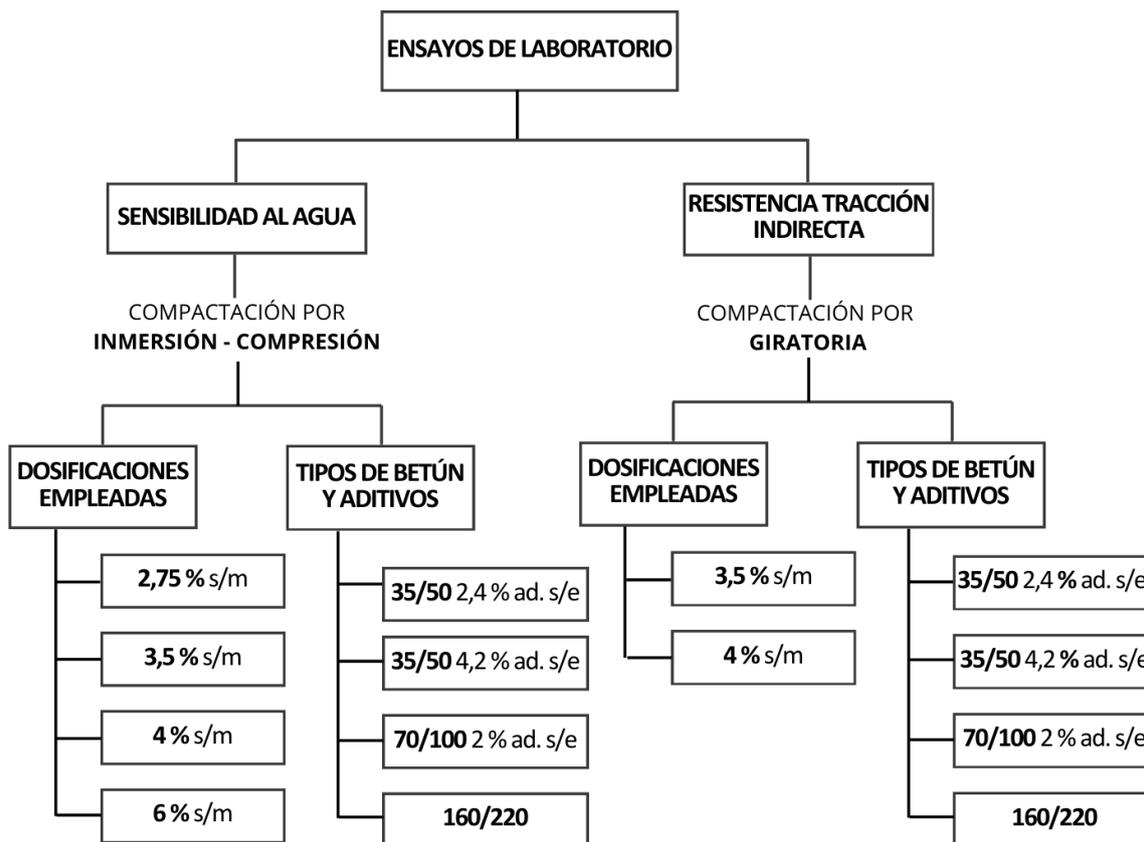


FIGURA 63. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DISEÑO DE LA FORMULACIÓN MEDIANTE PRUEBAS EXPERIMENTALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Para validar la fórmula de trabajo, se han fabricado, acondicionado y ensayado probetas de acuerdo con lo indicado en la norma UNE 41215 “Determinación de la sensibilidad al agua de mezclas bituminosas recicladas en frío con emulsión bituminosa”, que rige el Artículo 20 del PG-4. No obstante, tras el primer análisis y con el objetivo de obtener la formulación óptima, se realiza un primer descarte y se evalúan las dotaciones con mejor respuesta utilizando otro ensayo de gran utilidad: Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas, siguiendo la Norma UNE-EN 12697-26. Cabe destacar que, para cada uno de los ensayos realizados, es necesario emplear técnicas de compactación diferentes según las Normas UNE-EN 12697-56 y UNE-EN 12697-31.

4.2.3. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYO

Para realizar una evaluación completa de los resultados de los ensayos presentados, es importante tener en cuenta las limitaciones de la normativa correspondiente, así como recomendaciones de buenas prácticas. La Figura 64 del Artículo 20 del PG-4, presenta los valores mínimos de resistencia en el ensayo de compresión estática y resistencia conservada (UNE - EN 41215):

TIPO DE REUTILIZACIÓN	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	Resistencia Húmeda Cw (kPa)*	Resistencia conservada i/C (%) *
RFE III	T2 y superior	2,0	75
	T3 y T4	1,5	70
RFE II	T3 y T4	1,0	60
RFE I	T3 y T4	0,75	50

(*) Sobre un número de probetas no inferior a cuatro (≥ 4) para cada tipo de resistencia.

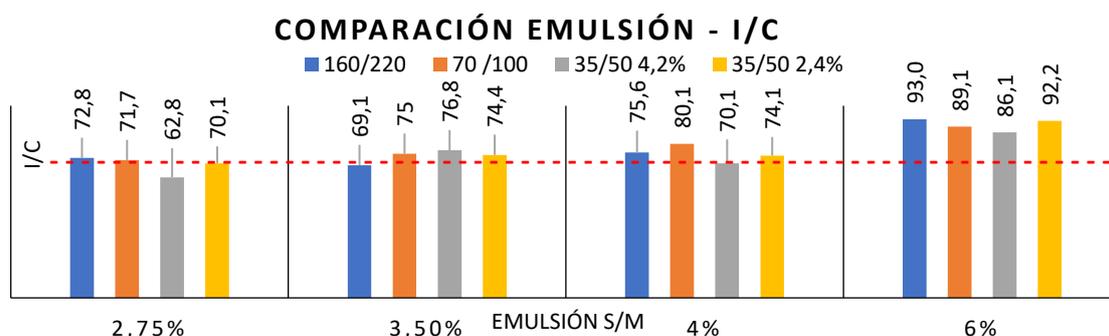
FIGURA 64. VALORES MÍNIMOS DE RESISTENCIA EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN ESTÁTICA Y RESISTENCIA CONSERVADA (UNE - EN 41215). FUENTE: ART. 20 DEL PG-4.

Considerando ambos valores límite indicados, y aunque organizaciones como ASEFMA tienden a ser más conservadoras, se procede al análisis de los resultados.

La Gráfica 1 muestra la relación de resistencias a compresión (i/C) para diferentes dosificaciones de emulsión y tipos de ligante con aditivos. Se observa que, para una dosificación del 2,75% de emulsión, los valores de i/C oscilan entre 62,8% y 72,8%, siendo los ligantes 160/220 y 70/100 los que presentan mejores resultados dentro de este rango. Al aumentar la dosificación de emulsión al 3,5%, los valores de i/C mejoran, alcanzando hasta 76,8%, con una tendencia creciente evidente.

Para una dosificación del 4%, el i/C sigue aumentando, superando el 80% en algunos casos, destacando especialmente el ligante 70/100. La dosificación más alta de 6% muestra valores de i/C superiores al 90% en la mayoría de los casos, con los ligantes 160/220 y 35/50 con 2,4% de aditivo alcanzando los máximos valores de 93,0% y 92,2%, respectivamente.

Aunque los valores más altos de i/C se logran con mayores dosificaciones de emulsión, esto también implica un sobrecoste económico significativo. La línea roja discontinua en la gráfica indica el límite de los valores establecidos por la normativa, destacando que la mayoría de los resultados con dosificaciones del 6% cumplen con estos requisitos..



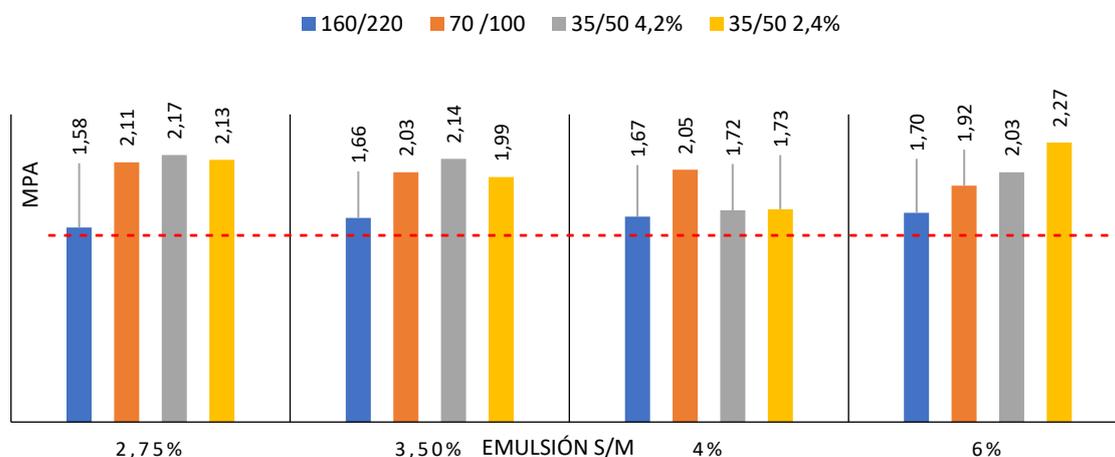
GRÁFICA 1. COMPARATIVA EMULSIÓN - I/C. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La Gráfica 2 muestra los resultados de la Resistencia Húmeda (Cw) para diferentes dosificaciones de emulsión y tipos de ligante con aditivos. Se observa que la Cw varía según la dosificación de emulsión y el tipo de ligante utilizado. Para una dosificación del 2,75%, la resistencia húmeda oscila entre 1,58 y 2,17 kPa, siendo los ligantes 70/100 y 35/50 con 2,4% de aditivo los que presentan mejores resultados.

Al aumentar la dosificación al 3,5%, la Cw mejora, variando entre 1,99 y 2,14 kPa, con el ligante 70/100 alcanzando el valor más alto. Con una dosificación del 4%, la resistencia húmeda sigue mostrando una tendencia positiva, alcanzando hasta 2,05 kPa con el ligante 70/100. La dosificación de 6% muestra los valores más altos de Cw, alcanzando hasta 2,27 kPa con el ligante 35/50 y 2,4% de aditivo.

Además destaca que, aunque las dosificaciones más altas de emulsión generalmente resultan en mayores resistencias húmedas, también se debe considerar el coste adicional que esto implica. La línea roja discontinua indica el umbral establecido por la normativa, mostrando que las dosificaciones del 4% y 6% cumplen con los requisitos, con la mayoría de los valores superando el límite normativo.

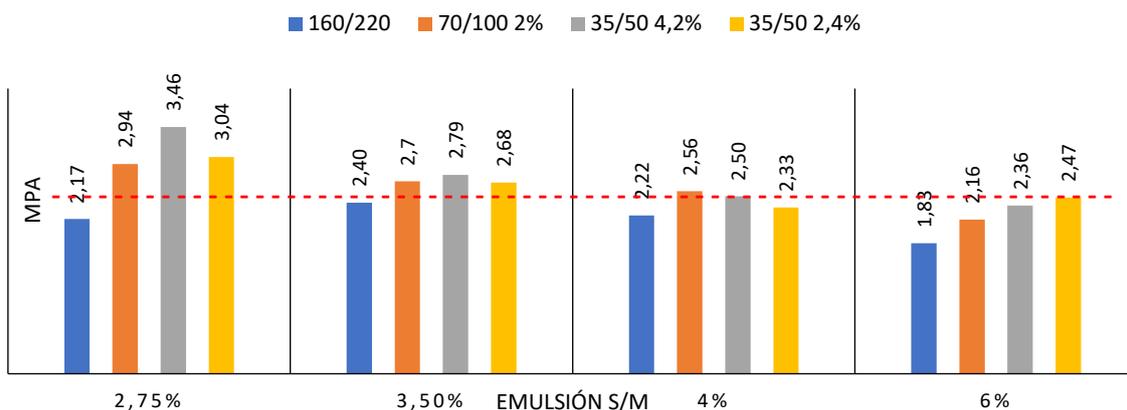
COMPARACIÓN EMULSIÓN-RESISTENCIA HÚMEDA



GRÁFICA 2. COMPARATIVA EMULSIÓN - RESISTENCIA HÚMEDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La Gráfica 3 presenta los resultados de la Resistencia en Seco, un parámetro crucial según la literatura, con un estándar límite de 2,50 MPa. Para una dosificación del 2,75%, los valores varían entre 2,17 y 3,04 MPa, cumpliendo algunos con el estándar. A 3,5%, los valores oscilan entre 2,20 y 2,79 MPa, con la mayoría superando el límite normativo. A 4%, los valores fluctúan entre 2,22 y 2,59 MPa, y finalmente, a 6%, todos los valores, entre 2,46 y 3,14 MPa, superan el estándar, demostrando una clara tendencia de mejora con el aumento de la dosificación.

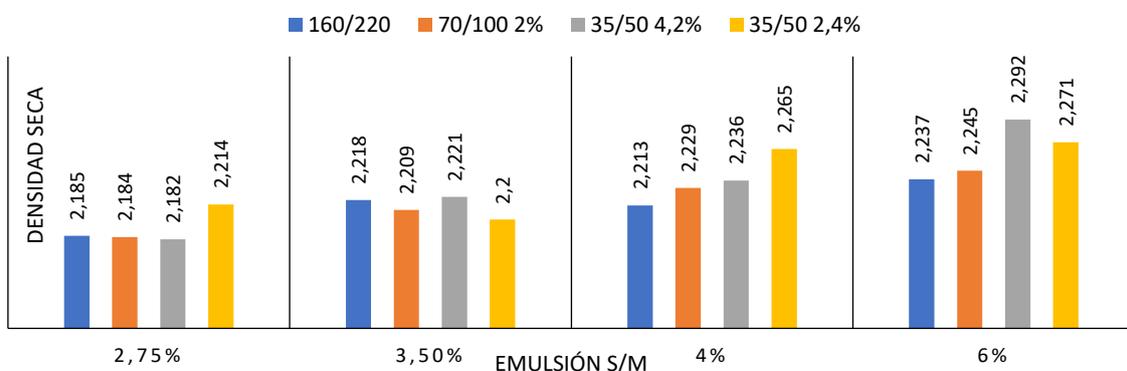
COMPARACIÓN EMULSIÓN - RESISTENCIA EN SECO



GRÁFICA 3. COMPARATIVA EMULSIÓN - RESISTENCIA SECA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La Gráfica 4 muestra la Densidad Seca, donde se observa que para una dosificación del 2,75%, los valores varían entre 2,184 y 2,214 g/cm³. A 3,5%, los valores oscilan entre 2,218 y 2,231 g/cm³. Con una dosificación del 4%, la densidad seca varía entre 2,235 y 2,246 g/cm³, y a 6%, los valores se encuentran entre 2,271 y 2,292 g/cm³. La densidad seca aumenta consistentemente con la dosificación de emulsión.

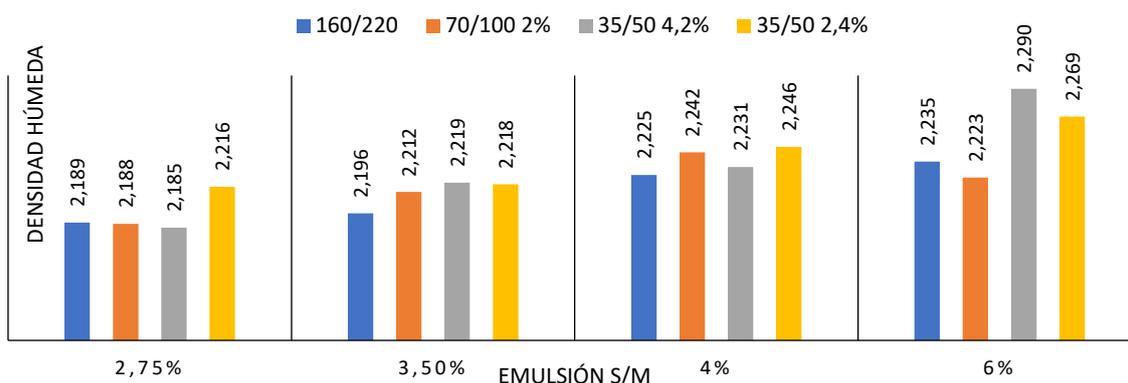
COMPARACIÓN EMULSIÓN - DENSIDAD SECA



GRÁFICA 4. COMPARATIVA EMULSIÓN - DENSIDAD SECA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La Gráfica 5 ilustra la Densidad Húmeda. Para una dosificación del 2,75%, los valores oscilan entre 2,188 y 2,216 g/cm³. A 3,5%, los valores varían entre 2,218 y 2,235 g/cm³. Con una dosificación del 4%, los valores de densidad húmeda se encuentran entre 2,231 y 2,246 g/cm³. Finalmente, a 6%, los valores varían entre 2,271 y 2,290 g/cm³, mostrando también una tendencia creciente con el aumento de la dosificación de emulsión.

COMPARACIÓN EMULSIÓN - DENSIDAD HÚMEDA



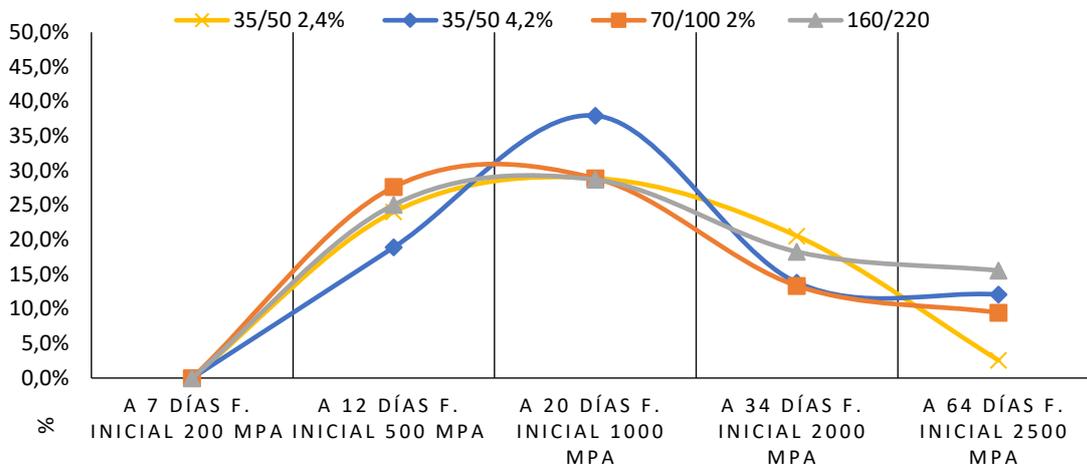
GRÁFICA 5. COMPARATIVA EMULSIÓN - DENSIDAD HÚMEDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

EL APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 3 SENSIBILIDAD AL AGUA Y DENSIDADES presenta todos los resultados obtenidos de las pruebas experimentales realizadas en forma de tabla.

No obstante, debido a la falta de normas específicas para las mezclas en frío y con la intención complementar la evaluación de los resultados obtenidos hasta ahora, se ha llevado a cabo un ensayo de rigidez según el módulo resiliente a tracción indirecta, siguiendo normas de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, para las dosificaciones que han mostrado una mejor respuesta a la sensibilidad al agua, considerando también criterios de coste. En consecuencia, se han ensayado las dosificaciones correspondientes al 3,50% y 4% en peso de emulsión sobre el total de la mezcla para todas las familias de emulsiones, teniendo en cuenta diferentes edades y el impacto inicial variado. Este enfoque permite obtener una evaluación más completa y precisa de las propiedades mecánicas del material, asegurando que las mezclas seleccionadas no solo cumplan con los requisitos normativos, sino que también ofrezcan un rendimiento adecuado a lo largo del tiempo. A continuación, se comentan los resultados obtenidos.

En la Gráfica 6, que muestra la variación porcentual del módulo resiliente para una dosificación del 4% de emulsión, se puede observar que el módulo resiliente de las mezclas bituminosas recicladas en frío aumenta con el tiempo, destacándose un incremento más significativo en algunos casos. Por ejemplo, para el ligante 35/50 con una dosificación del 2,4% de aditivo, el módulo resiliente aumenta aproximadamente un 25% a los 64 días de curado. En comparación, el ligante 35/50 con una dosificación del 4,2% de aditivo muestra un incremento del 40% en el mismo período. En contraste, el ligante 70/100 con una dosificación del 2% de aditivo presenta un aumento del 15%, mientras que el ligante 160/220 alcanza un incremento del 30%. Estos datos permiten analizar cómo la rigidez de las mezclas se estabiliza o deja de aumentar con el tiempo, proporcionando una visión sobre el proceso de curado de la mezcla.

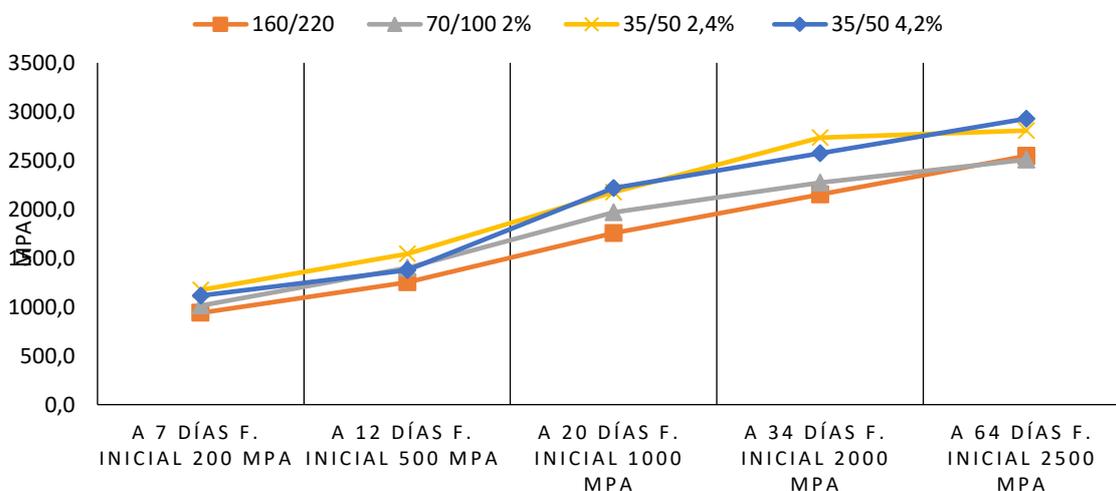
VARIACIÓN EN % DEL MÓDULO RESILIENTE (AL 4% EMUL. S/M)



GRÁFICA 6. VARIACIÓN EN % DEL MÓDULO RESILIENTE (4% EMUL. S/M). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En la Gráfica 7 de variación en MPa del Módulo resiliente (4% Emul. S/M), se puede observar que a los 64 días de curado, el ligante 35/50 con una dosificación del 2,4% de aditivo alcanza un valor de módulo resiliente de alrededor de 2500 MPa. Para el ligante 35/50 con una dosificación del 4,2% de aditivo, el módulo resiliente llega a aproximadamente 3000 MPa en el mismo período de tiempo. En el caso del ligante 70/100 con una dosificación del 2% de aditivo, se obtiene un valor de módulo resiliente de alrededor de 1500 MPa a los 64 días, mientras que el ligante 160/220 alcanza cerca de 2000 MPa.

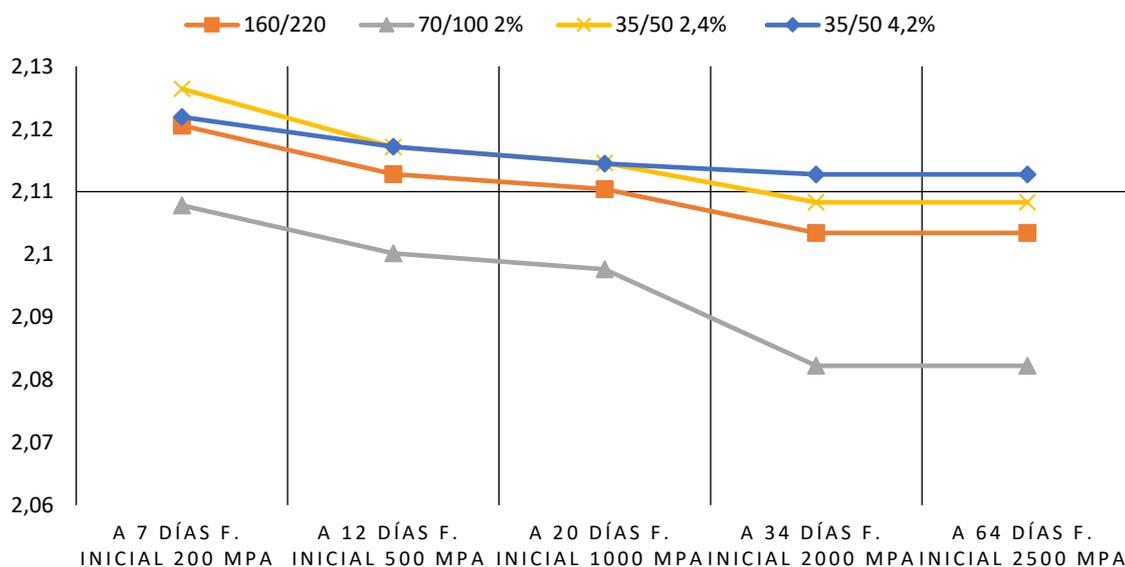
VARIACIÓN EN MPa DEL MÓDULO RESILIENTE (AL 4% EMULS. S/M)



GRÁFICA 7. VARIACIÓN EN MPa DEL MÓDULO RESILIENTE (4% EMUL. S/M). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En la Gràfica 8 de variaci3n de la densidad (4% Emul. S/M) específicamente, se puede observar que a los 64 días de curado, el ligante 35/50 con una dosificaci3n del 2,4% de aditivo alcanza un valor de densidad de alrededor de 2.10 g/cm³. Por otro lado, para el ligante 35/50 con una dosificaci3n del 4,2% de aditivo, la densidad llega a aproximadamente 2.13 g/cm³ en el mismo período de tiempo. Estos valores indican c3mo la dosificaci3n de emulsi3n influye en la densidad final de las mezclas bituminosas recicladas en frío, lo cual es crucial para la resistencia y durabilidad de las capas de pavimento en aplicaciones pràcticas. Una mayor densidad suele asociarse con una mayor resistencia estructural y durabilidad de la capa de rodadura, por lo que la selecci3n adecuada de la dosificaci3n de emulsi3n es fundamental para garantizar un rendimiento 3ptimo en campo.

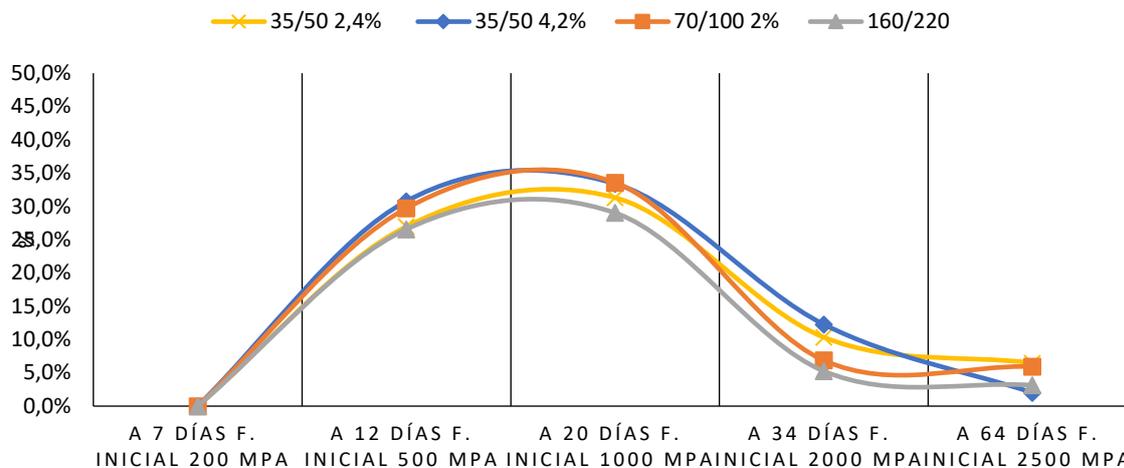
VARIACI3N DE LA DENSIDAD (AL 4% EMUL. S/M)



GRÀFICA 8. VARIACI3N DE LA DENSIDAD (4% EMUL. S/M). FUENTE: ELABORACI3N PROPIA.

En la Gràfica 9 de variaci3n en % del M3dulo resiliente (3,5% Emul. S/M), se observa que para el ligante 35/50 con una dosificaci3n del 2,4% de aditivo, el m3dulo resiliente aumenta aproximadamente un 20% a los 64 días de curado. En comparaci3n, para el ligante 35/50 con una dosificaci3n del 4,2% de aditivo, el incremento es de alrededor del 35% en el mismo período de tiempo. Por otro lado, el ligante 70/100 con una dosificaci3n del 2% de aditivo muestra un aumento del m3dulo resiliente de aproximadamente el 10% a los 64 días, mientras que el ligante 160/220 presenta un incremento del 15%.

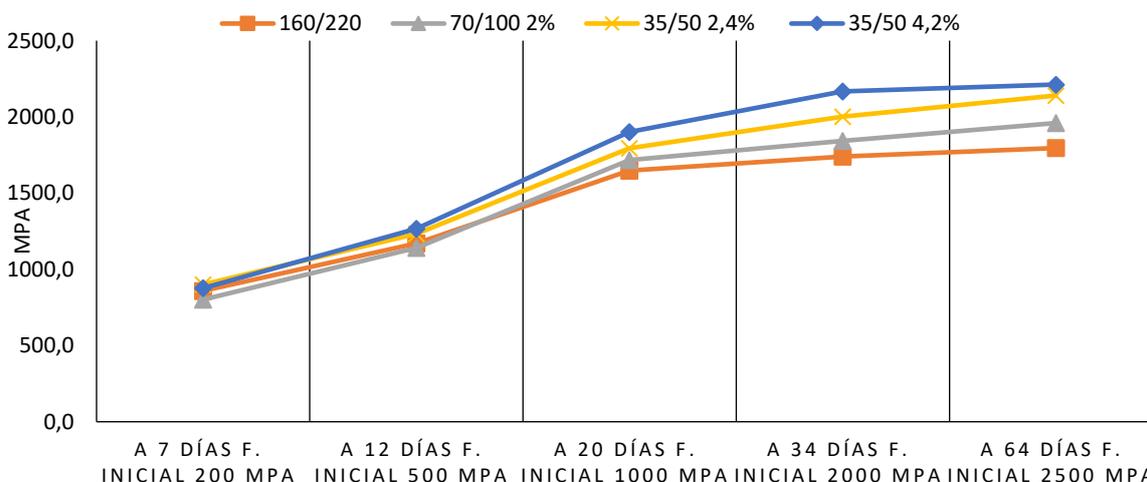
VARIACIÓN EN % DEL MÓDULO RESILIENTE (AL 3,5% EMUL S/M)



GRÁFICA 9. VARIACIÓN EN % DEL MÓDULO RESILIENTE (3,5% EMUL. S/M). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En la Gráfica 10 de variación en MPa del Módulo resiliente (3,5% Emul. S/M), se puede observar que a los 64 días de curado, el ligante 35/50 con una dosificación del 2,4% de aditivo alcanza un valor de módulo resiliente de alrededor de 2000 MPa. Para el ligante 35/50 con una dosificación del 4,2% de aditivo, el módulo resiliente llega a aproximadamente 2500 MPa en el mismo período de tiempo. En el caso del ligante 70/100 con una dosificación del 2% de aditivo, se obtiene un valor de módulo resiliente de alrededor de 1000 MPa a los 64 días, mientras que el ligante 160/220 alcanza cerca de 1500 MPa.

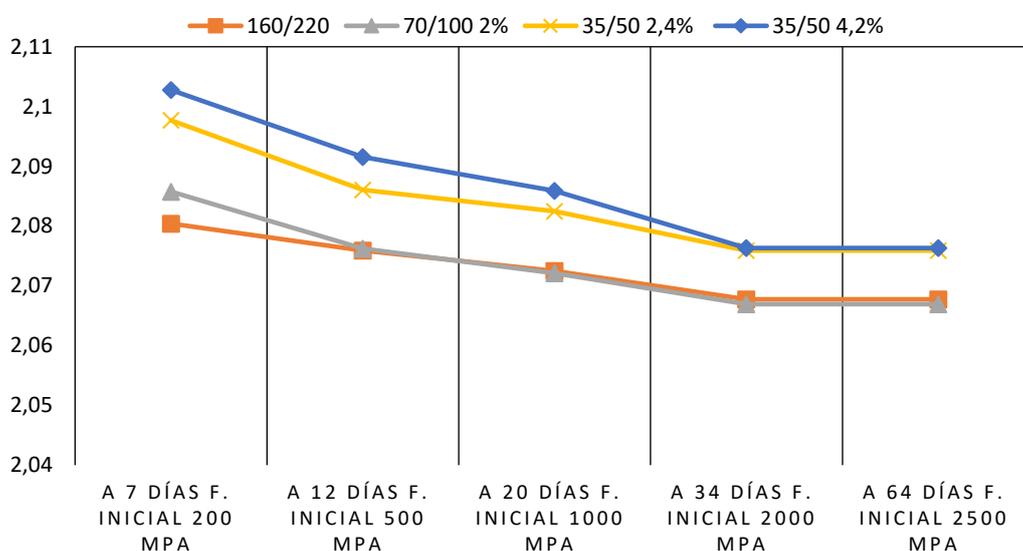
VARIACIÓN EN MPA DEL MÓDULO RESILIENTE (AL 3,5% EMULS. S/M)



GRÁFICA 10. VARIACIÓN EN MPA DEL MÓDULO RESILIENTE (3,5% EMUL. S/M). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En la Gráfica 11 de variación de la densidad (3,5% Emul. S/M), se puede observar que a los 64 días de curado, el ligante 35/50 con una dosificación del 2,4% de aditivo alcanza un valor de densidad de alrededor de 2.06 g/cm³. Para el ligante 35/50 con una dosificación del 4,2% de aditivo, la densidad llega a aproximadamente 2.11 g/cm³ en el mismo período de tiempo. En el caso del ligante 70/100 con una dosificación del 2% de aditivo, se obtiene un valor de densidad de alrededor de 2.05 g/cm³ a los 64 días, mientras que el ligante 160/220 alcanza cerca de 2.07 g/cm³.

VARIACIÓN DE LA DENSIDAD (AL 3,5% EMUL. S/M)



GRÁFICA 11. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD (3,5% EMUL. S/M). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 3 MÓDULO RESILIENTE muestra todos los resultados obtenidos durante el procedimiento de ensayo.

Esta evaluación destaca varias conclusiones clave:

- Desempeño óptimo y relación coste-eficiencia:** El análisis revela que las dosificaciones del 4% y 6% de emulsión ofrecen mejoras significativas en los parámetros de desempeño, como la resistencia a compresión (i/C) y la resistencia húmeda (Cw). Sin embargo, aunque la dosificación del 6% muestra los mejores resultados, su alto coste limita su viabilidad práctica. En contraste, una dosificación del 4% proporciona un equilibrio favorable entre rendimiento y coste, alcanzando mejoras notables sin los sobrecostes asociados con mayores dosificaciones.

- **Efecto sobre densidad y estabilidad:** La densidad seca y húmeda aumenta con la dosificación de emulsión, indicando una mayor estabilidad y durabilidad de la mezcla. Los valores obtenidos con una dosificación del 4% son suficientemente altos para garantizar un desempeño robusto, destacando la eficacia de esta dosificación en términos de densidad.
- **Influencia del tipo de ligante:** Los ligantes más duros, como el 35/50, muestran incrementos porcentuales más significativos en el módulo resiliente en comparación con los ligantes más blandos, como el 70/100. Esto sugiere que la naturaleza del ligante afecta notablemente la rigidez de la mezcla, haciendo que los ligantes más duros sean más efectivos para mejorar la rigidez.
- **Impacto de la dosificación de aditivo:** Las mayores dosificaciones de aditivo contribuyen a incrementos más notables en el módulo resiliente. Por ejemplo, una dosificación del 4,2% de aditivo en el ligante 35/50 produce un incremento del 40%, mayor que el incremento del 25% obtenido con una dosificación del 2,4%. Esto destaca la importancia de ajustar la cantidad de aditivo para optimizar la rigidez de la mezcla.
- **Estabilización del módulo resiliente:** El módulo resiliente tiende a estabilizarse tras un período inicial de curado, con incrementos más pronunciados en los primeros días y una desaceleración posterior. Conocer este patrón es crucial para definir el tiempo necesario para alcanzar el rendimiento máximo de la mezcla.
- **Comparación entre ligantes y dosificaciones:** El ligante 35/50 muestra los mayores incrementos porcentuales en relación con la dosificación de aditivo, en comparación con los ligantes 70/100 y 160/220, que presentan incrementos más modestos. Esto indica que, aunque todos los ligantes se benefician del curado, aquellos con propiedades originales menos rígidas tienen un potencial de aumento más limitado.
- **Optimización del proceso de curado y diseño de mezcla:** Los resultados sugieren que el tiempo necesario para la estabilización del módulo resiliente varía según la combinación de ligante y aditivo. Esta información es valiosa para ajustar las especificaciones de la mezcla y los tiempos de curado, optimizando su desempeño en frío.

En resumen, la fórmula que combina el 100% de material reciclado con partículas de hasta 22 mm, una dosificación de 4% de emulsión bituminosa del tipo C60B5 REC con un betún residual 35/50 al 60%, un 4,2% de aditivo rejuvenecedor tipo QP FLUX F, y un 2% de agua, representa la opción óptima. Esta mezcla ofrece un balance ideal entre resistencia, rigidez, densidad y coste, asegurando un alto rendimiento y cumplimiento de los estándares de calidad. La Tabla 5 muestra la composición de la mezcla óptima.

TABLA 5. COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

EMULSIÓN AL 60% B. RES.	AGUA DE APORTACIÓN	ADITIVO
% en peso sobre material a reutilizar		% en peso sobre la emulsión
4 % 35/50	2 %	4,2 % QP FLUX

La Tabla 6 muestra las resistencias en seco, en húmedo y conservadas obtenidas a 25 °C y una velocidad de rotura a compresión de 50 mm/min correspondientes a las probetas de la mezcla propuesta.

TABLA 6. RESULTADOS ENSAYO UNE 41215. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

CARACTERÍSTICA	NORMA	UNIDAD	RESULTADO
Resistencia conservada	UNE - EN 41215	i/c (%)	70,10
Resistencia Húmeda		Cw (kPa)	1,72
Resistencia Seca			2,50
Densidad Húmeda		t/m ³	2,231
Densidad Seca			2,236

Igualmente, la Tabla 7 muestra los resultados obtenidos del módulo resiliente de la mezcla reciclada a diferentes edades.

TABLA 7. RESULTADOS ENSAYO UNE - EN 12697-26. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

UNE - EN 12697-26						
EDAD	DÍAS	7	12	20	34	64
F. INICIAL	Mpa	200	500	1.000	2.000	2.500
MÓDULO	Mpa	1.116,50	1.376,90	2.218,80	2.574,30	2.928,20
DENSIDAD	t/m ³	2,122	2,117	2,114	2,113	2,113
VARIACIÓN MÓD.	%	-	+18,90	+37,90	+13,80	+12,10

En resumen, los resultados de los ensayos indican que la dosificación de emulsión y la presencia de aditivos tienen un impacto significativo en las propiedades mecánicas y estructurales de las mezclas bituminosas recicladas en frío, destacando la importancia de seleccionar cuidadosamente estos componentes para lograr mezclas con un desempeño óptimo en aplicaciones viales.

4.3. EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LA ALTERNATIVA PROPUESTA

La solución alternativa propuesta de reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa tipo III ha sido evaluada desde una perspectiva medioambiental, destacando sus ventajas sobre la alternativa convencional que utiliza mezclas bituminosas en caliente. Para realizar una comparativa detallada, se han definido ambas soluciones en términos de materiales y equipos de trabajo, procesos constructivos, así como aspectos ambientales y logísticos.

4.3.1. DEFINICIÓN DE LAS SOLUCIONES

La técnica de reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa tipo III permite la reutilización del material existente en la carretera, que es tratado y estabilizado con una fórmula específica. Este enfoque minimiza la necesidad de transporte de nuevos materiales y reduce el consumo de energía en los procesos de producción y colocación. La Figura 65 ilustra esta solución propuesta.

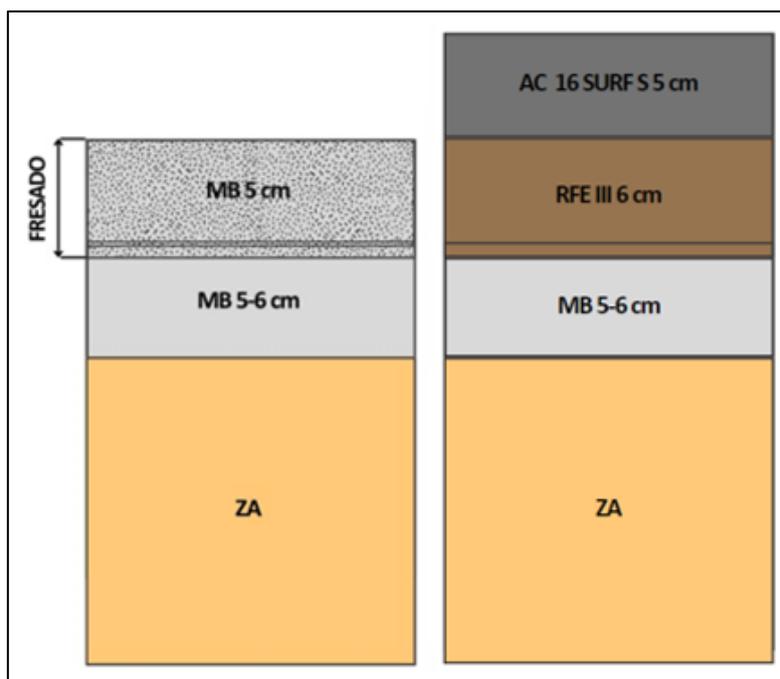


FIGURA 65. CROQUIS DE LA SOLUCIÓN DE RECICLADO EN FRÍO "IN SITU" CON EMULSIÓN BITUMINOSA III. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Por otro lado, la alternativa convencional se basa en la aplicación de dos capas de mezclas bituminosas en caliente. Este método requiere la extracción y transporte de nuevos áridos, la producción de asfalto en plantas a altas temperaturas, y la colocación del material en obra, lo cual conlleva un mayor consumo energético y mayores emisiones. La Figura 66 presenta un croquis de esta solución convencional.

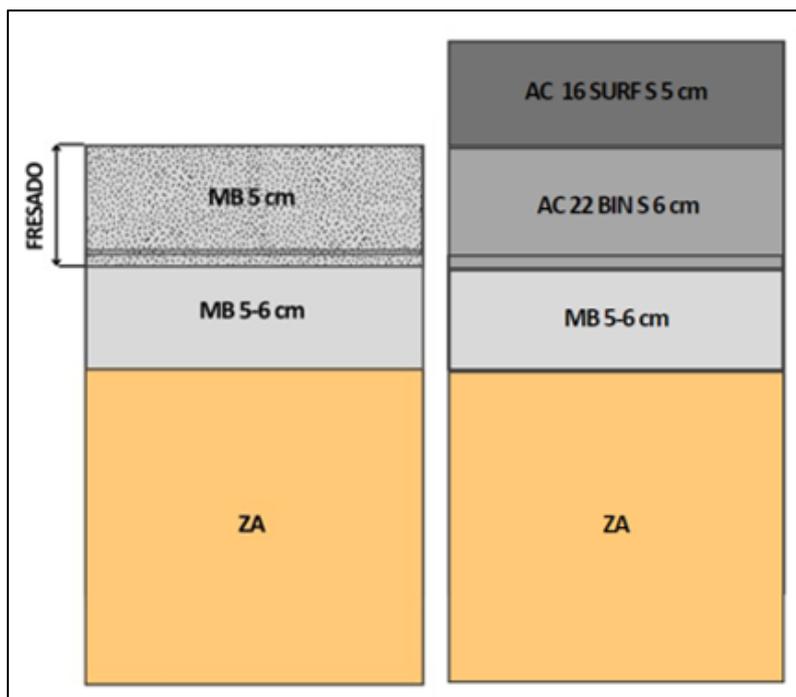


FIGURA 66. CROQUIS DE LA SOLUCIÓN DE LA OBRA CONVENCIONAL CON DOS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Para facilitar la comprensión y comparación de ambas soluciones, a continuación se presentan la Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11 que detallan los materiales utilizados, los equipos de trabajo, los procesos constructivos, y los aspectos ambientales y logísticos involucrados en cada método.

TABLA 8. MATERIALES UTILIZADOS RFE III VS CONVENCIONAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

MATERIALES UTILIZADOS			
SOLUCIÓN	RFE III		CONVENCIONAL
Emulsión Bituminosa	C60B3 CUR	C60B ADH	C60B ADH
Descripción	Riego de curado	Riego de adherencia entre dos capas	Riego de adherencia entre dos capas
Cantidad	16 toneladas	16 toneladas	15 t + 16 t (total 31 toneladas)
Transporte	Cisterna	Cisterna	Cisterna
Combustible	Diesel	Diesel	Diesel
Distancia	28 km	28 km	28 km

Mezcla Bituminosa	AC 16 SURF S	AC 16 SURF S	AC 22 BIN S
Descripción	Mezcla bituminosa en caliente para capa de rodadura	Mezcla bituminosa en caliente para capa de rodadura	Mezcla bituminosa en caliente para capa base
Cantidad	3489,41 toneladas	3489,41 toneladas	4101,84 toneladas
Transporte	Semi-remolque de 40 toneladas con carga útil de 28 toneladas	Semi-remolque de 40 toneladas con carga útil de 28 toneladas	Semi-remolque de 40 toneladas con carga útil de 28 toneladas
Combustible	Diesel	Diesel	Diesel
Distancia	28 km	28 km	28 km

TABLA 9. EQUIPOS DE TRABAJO RFE III VS CONVENCIONAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

SOLUCIÓN	RFE III	CONVENCIONAL
EQUIPOS DE TRABAJO		
Rodillo neumático	7 días	15 días
Tándem vibratorio	7 días	15 días
Extendedora	7 días	15 días
Esparcidor de ligante bituminoso	7 días	15 días
Recicladora "In Situ"	20 días	-
Barredoras	-	15 días
Cepilladora	-	8 días

TABLA 10. PROCESO CONSTRUCTIVO RFE III VS CONVENCIONAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

SOLUCIÓN	RFE III	CONVENCIONAL
PROCESO CONSTRUCTIVO		
Preparación del pavimento	Evaluación, limpieza y fresado	Fresado de pavimentos, barrido y cepillado
Tren de reciclado "in situ"	Mezcla del material reciclado con emulsión bituminosa usando el tren de reciclado "in situ"	Aplicación de mezclas bituminosas en caliente en dos capas (rodadura y base)
Compactación	Compactación con rodillo neumático y tándem vibratorio	Compactación con rodillo neumático y tándem vibratorio

TABLA 11. ASPECTOS AMBIENTALES Y LOGÍSTICOS RFE III VS CONVENCIONAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

SOLUCIÓN	RFE III	CONVENCIONAL
ASPECTOS AMBIENTALES Y LOGÍSTICOS		
Transporte de materiales	Minimiza el transporte de nuevos materiales, corta distancia de transporte	Transporte de materiales bituminosos y emulsiones con distancias cortas, residuos de fresado gestionados
Producción de mezclas	Menor consumo de energía y emisiones asociadas con la producción	Producción de mezclas bituminosas con gas natural como combustible
Residuos	Reutilización del material existente, reduciendo el impacto ambiental	Residuos de fresado reciclados, reduciendo el impacto ambiental

Estas tablas proporcionan una visión clara de las diferencias y ventajas de cada método, destacando cómo el reciclado en frío "in situ" puede ofrecer beneficios ambientales significativos en comparación con el enfoque convencional.

El APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 4 DEFINICIÓN DE LAS SOLUCIONES recoge detalladamente las unidades de obra consideradas en ambos casos.

4.3.2. CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS

La Figura 67 presenta una comparativa del consumo total de recursos energéticos entre la solución propuesta (reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa tipo III) y la alternativa convencional (obra con mezclas bituminosas en caliente). La solución propuesta muestra un consumo significativamente menor, estimado en 3.231.712,20 MJ, lo que supone una reducción del 70,31% en comparación con la alternativa convencional.

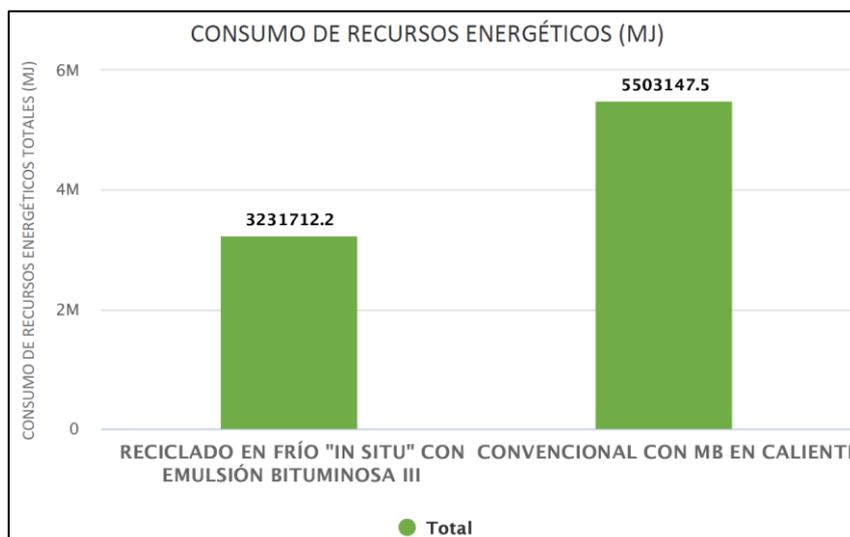


FIGURA 67. COMPARATIVA DEL CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS TOTALES (MJ). FUENTE: SEVE TP.

Esta reducción se debe principalmente a la minimización de la extracción de materiales y al menor consumo energético en el proceso de producción (ver Figura 68). El reciclado en frío "in situ" reutiliza el material existente en la carretera, reduciendo la necesidad de transportar nuevos materiales y disminuyendo la energía necesaria para producir el asfalto.

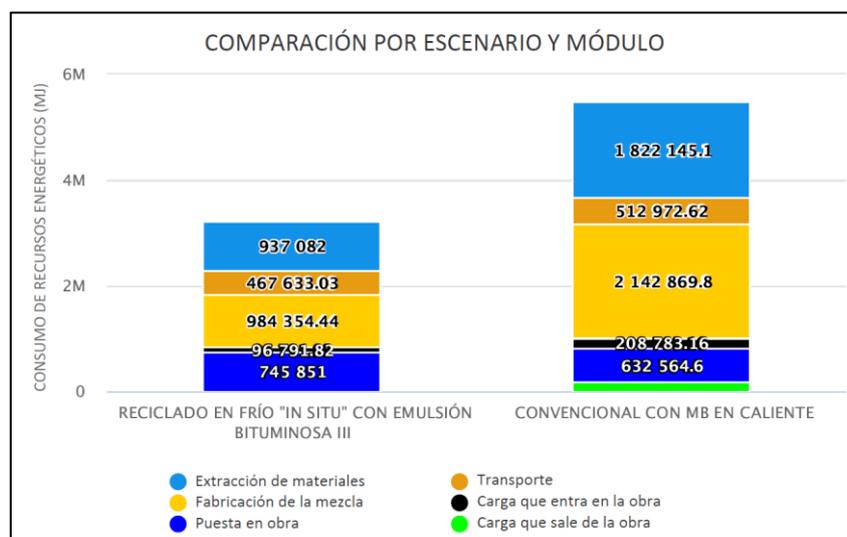


FIGURA 68. COMPARATIVA POR ESCENARIO Y MÓDULO DEL CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS. FUENTE: SEVE TP.

4.3.3. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

La Figura 69 muestra la comparativa de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) entre las dos metodologías. La solución propuesta presenta menores emisiones, reduciendo las emisiones en un 68,34% en comparación con la metodología convencional.

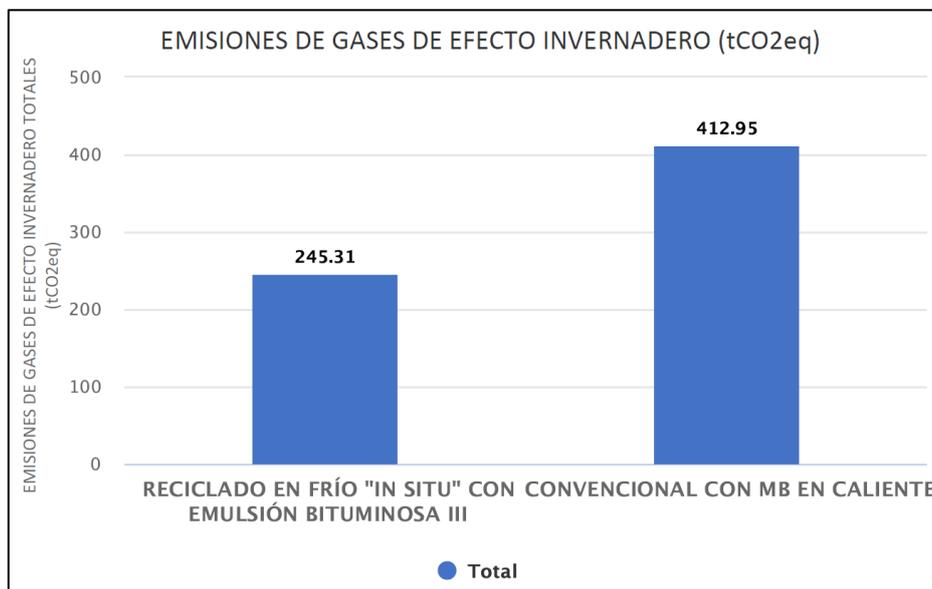


FIGURA 69. COMPARATIVA DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO TOTALES (tCO₂EQ). FUENTE: SEVE TP.

Este beneficio ambiental se debe a varios factores: la técnica de reciclado en frío reduce la necesidad de extracción y transporte de nuevos áridos y evita la producción de asfalto a altas temperaturas, lo que disminuye considerablemente la huella de carbono.

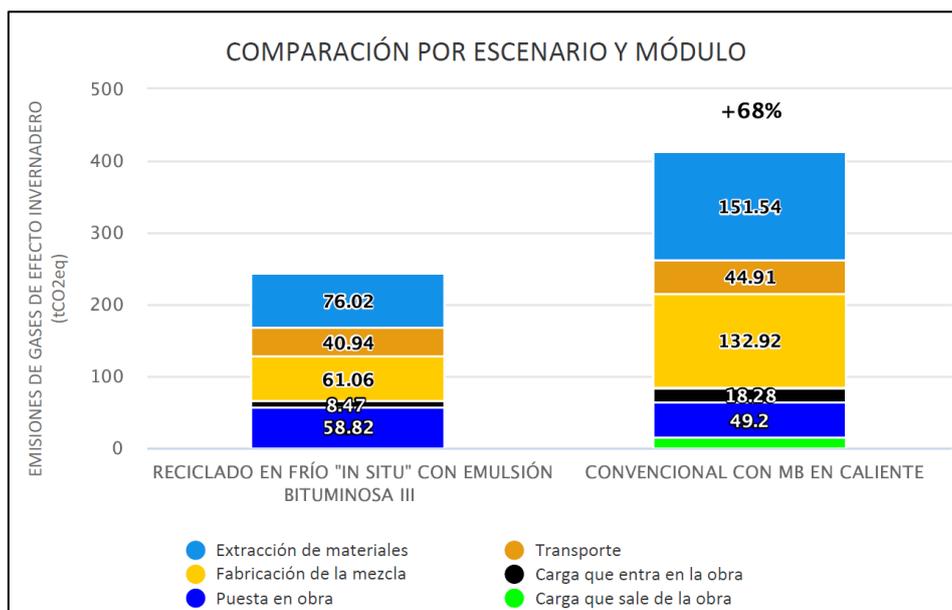


FIGURA 70. COMPARATIVA POR ESCENARIO Y MÓDULO DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO. FUENTE: SEVE TP.

5. PROTOCOLO DE ACTUACIÓN PARA LA APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA SOLUCIÓN

En consonancia con las exigencias medioambientales y con el objetivo de optimizar recursos y reducir el impacto ecológico, se propone la siguiente solución para la rehabilitación del firme: realizar un reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa tipo III. Esta técnica combina el fresado y la reposición utilizando tecnologías de reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa, complementadas con un recrecido de refuerzo. Este método sigue lo prescrito en la Orden Circular 02/2023 sobre la Reutilización de Capas de Firmes y Pavimentos Bituminosos.

El espesor de reutilización determinado es de 6 cm sobre el firme existente, permitiendo una penetración de hasta 1 cm en la capa bituminosa inferior en aquellas secciones donde se detecte variabilidad en los espesores durante la campaña de extracción de testigos. La intervención se llevará a cabo de manera homogénea en todo el ancho de la calzada, abarcando un total de 28.485 m² de fresado de las capas de rodadura.

El proceso comenzará con el fresado de las capas de rodadura existentes. Posteriormente, se procederá a la reposición mediante técnicas de reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa. Sobre la capa reciclada se aplicará una capa única de recrecido de mezcla bituminosa en caliente, con un espesor de 5 cm. Para esta capa de rodadura se ha seleccionado la mezcla AC16 SURF S, que utiliza árido silíceo y cumple con los espesores prescriptivos según la Norma 6.3 IC. La mezcla será semidensa, adecuada para carreteras situadas a una altitud inferior a 1200 metros.

La capa de rodadura se extenderá sobre toda la calzada, incluidos los arcenes, con el objetivo de mantener una rasante única. Para mejorar el drenaje superficial y corregir problemas existentes, se propone incrementar el bombeo de las secciones más llanas, ajustando la inclinación transversal de un 2% inclinado hacia uno de los márgenes a un 2,5% inclinado hacia ambos lados. Esta mejora en el drenaje es crucial para prolongar la vida útil del pavimento y evitar acumulaciones de agua que puedan deteriorar el firme.

Con esta solución, no solo se pretende prolongar la vida útil del pavimento, sino también reducir el impacto medioambiental mediante el reciclado y reutilización de materiales existentes. La estrategia optimiza los recursos disponibles y asegura un comportamiento adecuado del firme rehabilitado, alineándose con las normativas vigentes y las mejores prácticas en sostenibilidad y eficiencia en la construcción de infraestructuras viales.

A continuación, se describe el protocolo de trabajo para la aplicación práctica de la solución de reciclado en frío “in situ” con emulsión bituminosa III propuesta. Se detallan todos los pasos involucrados en la ejecución, desde los requisitos del equipo hasta las medidas de control de calidad. Además, se incluye la mezcla bituminosa en caliente para capa de rodadura, sin entrar en detalles específicos.

5.1. REQUISITOS DE MAQUINARIA Y PERSONAL

Equipo de ejecución

Para llevar a cabo la técnica desarrollada, se requiere el siguiente tren de trabajo:

- **Cisterna de emulsión:** Para el transporte y almacenamiento de hasta 30.000 litros de emulsión bituminosa. Este camión debe estar equipado para engancharse a la recicladora y conectarse mediante una manguera para la aditivación de la mezcla.
- **Cisterna de agua:** Unidad nodriza con capacidad de 16.000 litros, destinada a rellenar el depósito de agua de la recicladora, operando de manera independiente del tren de reciclado.
- **Fresadora Recicladora ROADTEC RX-700 CRI:** Máquina de cuatro orugas con una cinta transportadora de carga frontal de 36 pulgadas. Esta fresadora puede fresar hasta 12 cm de material a un ancho de 2,20 metros, ideal para las necesidades del proyecto.
- **Camión volquete:** Vehículo esencial para alimentar la tolva de la extendedora con la mezcla de material reciclado.
- **Extendedora Roadtec RP 190 E:** Equipo con regla autoextensible de 2,5 a 5 metros de ancho, capaz de aplicar la mezcla RFE III con pre-compactación vibratoria, garantizando una extensión uniforme.
- **Rodillo tándem vibratorio:** Compactador metálico articulado con sistema de vibración de alta frecuencia de 12 Tn. Este equipo es fundamental para asegurar la densidad adecuada de la mezcla durante cada pasada.
- **Rodillo neumático:** Rodillo de 27 Tn sin vibración, utilizado para la compactación final mediante carga estática, complementando el trabajo del rodillo tándem.

Igualmente, se dispondrá de la siguiente maquinaria auxiliar para completar las fases adicionales de la solución:

- **Extendedora adicional:** Para la extensión de la capa asfáltica de rodadura de refuerzo.
- **Rodillos tándem y neumáticos adicionales:** Para asegurar una compactación adecuada en la fase de extendido de la capa de rodadura.
- **Cisternas para riegos de adherencia y curado:** Para aplicar correctamente la emulsión bituminosa de adherencia entre capas y durante el curado de la mezcla reciclada.

Además de otras máquinas no consideradas en este caso por ser prescindibles, pero que pueden resultar útiles, por ejemplo:

- **Mini barredora mecánica:** Equipada con pala e implemento de fresadora para la limpieza y preparación de la superficie antes y después de la intervención.
- **Camión volquete adicional:** Para el transporte de materiales excedentes o adicionales necesarios en la obra.
- **Termómetro infrarrojo y otros equipos de mano:** Para el control preciso de la temperatura de la mezcla y otras tareas detalladas.

En cuanto a personal, será necesario al menos:

- **Ingeniero de Caminos:** Responsable de la supervisión técnica del proyecto, garantizando el cumplimiento de los estándares y especificaciones técnicas.
- **Topógrafo:** Encargado de la planificación y medición precisa de las áreas a intervenir, asegurando una correcta implementación de las técnicas propuestas.
- **Operadores de maquinaria:** Conductores capacitados para manejar la fresadora, recicladora, extendedora y compactadora.
- **Personal de laboratorio:** Encargado de realizar pruebas y ensayos de control de calidad para asegurar que los materiales y procesos cumplen con las especificaciones.
- **Encargado de obra:** Coordinador general de las actividades en el campo, asegurando una ejecución eficiente y segura del proyecto.
- **Oficiales, auxiliares y peones:** Personal de apoyo necesario para diversas tareas de asistencia en la obra, facilitando el trabajo del equipo principal.

5.2. FASES DE EJECUCIÓN

Previo a la obra

Fase 0: Tramo de prueba

Antes de iniciar el reciclado “in situ” con emulsión, se realizará un tramo de prueba para cada sección homogénea definida. Este tramo de prueba permitirá verificar la fórmula de trabajo, el rendimiento de los equipos y comprobar que el material reutilizado cumple con las especificaciones. Las acciones por realizar incluirán:

1. Verificación de la profundidad de fresado:

- Ajuste de la velocidad de avance del equipo para obtener la profundidad adecuada.
- Asegurar una granulometría dentro de los parámetros especificados.
- Lograr una mezcla uniforme y homogénea.

2. Determinación de la granulometría del material fresado:

- Verificación de que corresponde a la obtenida en el tramo de prueba.

3. Comprobación y ajuste de la fórmula de trabajo específica:

- Realización de ajustes necesarios para cumplir con las especificaciones.

Durante la ejecución del tramo de prueba, se analizarán los siguientes aspectos adicionales:

1. Correlación entre métodos de control de dosificación del ligante, densidad y humedad “in situ”:

- Establecimiento de relaciones entre humedad y densidad alcanzada.
- Evaluación del esponjamiento de la capa reutilizada.

2. Verificación de la precisión de los sistemas de dosificación de emulsión y agua:

- Ajustes necesarios para garantizar una mezcla homogénea.

3. Determinación de la fórmula de trabajo final y equipos adecuados:

- El Director de las Obras determinará si la fórmula y los equipos son aceptables.

Comienzo de la obra

Fase 1: Preparación del sitio

La preparación del sitio comenzará con la limpieza y señalización del área de trabajo. Se identificarán y marcarán las áreas que se deben fresar y reciclar, incluyendo zonas de trapas, donde la recicladora pasará por alto y se realizará el trabajo con la extendedora, requiriendo ayuda manual. Las actividades que se llevarán a cabo son:

1. Limpieza del área de trabajo:

- Retiro de escombros y materiales sueltos.
- Preparación de superficies para fresado.

2. Señalización del área de trabajo:

- Colocación de señales de advertencia y delimitación del área de intervención.

3. Identificación y marcado de áreas a fresar y reciclar:

- Inclusión de zonas de trapas y pozos.
- Pre-milling en laterales y alrededor de las trapas y pozos.

Fase 2: Fresado y reciclado

El fresado se llevará a cabo utilizando la recicladora ROADTEC RX-700 CRI a una velocidad constante de 5 m/min, garantizando una profundidad uniforme y una mezcla homogénea del material. Para ello, será necesario:

1. Fresado del pavimento existente:

- Disgregación del pavimento a una profundidad de 6 cm y un ancho de 2,20 m.
- Producción de material suelto y homogéneo con un tamaño máximo de partículas de 22 mm.

2. Verificación frecuente de la granulometría del material fresado:

- Asegurar correspondencia con la fórmula de trabajo.

3. Tratamiento de áreas donde no se puede utilizar la fresadora:

- Demolición con medios mecánicos y tratamiento según la legislación ambiental vigente.
- Relleno con materiales que cumplan con los requisitos establecidos en el PG-3.

4. Abastecimiento de emulsión y agua sin afectar al tráfico:

- Realización desde cubas o depósitos móviles para evitar paradas del equipo.
- Garantizar dotaciones continuas y uniformes.

5. Combinación del material fresado y la emulsión bituminosa:

- Mezcla del material fresado y la emulsión bituminosa C60B5 REC aprovechando la energía del rotor.
- La composición de la mezcla propuesta:
 - **Emulsión al 60% B. Res.:** 4% en peso sobre material a reutilizar.
 - **Agua de aportación:** 2% en peso sobre material a reutilizar.
 - **Aditivo QP FLUX F:** 4,2% en peso sobre la emulsión.
- Utilización de equipo de dosificación con control automático programable.

6. Limpieza de bombas y difusores del ligante y agua:

- Limpieza de difusores en cada parada del equipo, mínimo dos veces al día.

Fase 3: Extensión, nivelación y compactación

La extensión, nivelación y compactación de la mezcla requerirá:

1. Extensión de la mezcla reciclada:

- Vertido de la mezcla en un camión hasta generar espacio suficiente para la extendedora.
- Repetición del proceso cuando la tolva de la extendedora se llene.

2. Nivelación:

- Utilización de un sistema de nivelación con dos sensores de ultrasonido.
- Copiado de referencia de la capa a fresar.

3. Compactación:

- Uso de compactador de rodillo tándem metálico articulado con sistema de vibración de alta frecuencia de 12 Tn.
- Control de densidad mediante el Troxler.
- Realización de aproximadamente 5-6 pasadas.
- Compactación final con rodillo neumático de 27 Tn sin vibración.

Fase 4: Riego de curado y adherencia

Los riegos de curado y adherencia se aplicarán entre las capas recicladas y la nueva capa de rodadura. Los pasos a seguir serán:

1. Aplicación de emulsión bituminosa de curado:

- Emulsión tipo C60B3 CUR con dotación de 250 g/m² y árido de cobertura de 5 l/m².
- Aplicación al terminar la compactación y antes del tráfico sobre la mezcla reciclada.
- Esparcimiento de arena si es necesario.
- Tráfico a baja velocidad para evitar proyecciones de material fresco.
- Utilización de camión cisterna con sistema de riego automático.

2. Aplicación de emulsión bituminosa de adherencia:

- Aplicación de emulsión C60B3 TER antes de la capa de rodadura con una dotación de 0,0007 t/m².
- Utilización de cisternas para el riego uniforme sobre la capa reciclada.
- Distribución a través de boquillas de control de dosificación.
- Tiempo de curado suficiente para permitir la evaporación del agua.

Fase 5: Capa de rodadura

La mezcla bituminosa en caliente para la nueva capa de rodadura se aplicará sobre la base reciclada y compactada. Las actividades incluirán:

1. Preparación de la superficie reciclada:

- Verificación de la adherencia adecuada.
- Limpieza de la superficie si es necesario.

2. Extensión y compactación de la mezcla bituminosa:

- Fabricación, transporte y puesta en obra de la mezcla AC 16 SURF S.
- Uso de extendidora adicional para aplicar la capa de rodadura.
- Compactación con rodillos tándem y neumáticos adicionales.

Fase 6: Finalización

La ejecución de la obra finalizará con la limpieza del sitio y apertura al tráfico de la carretera. No obstante, posteriormente se llevará a cabo la inspección y verificación del trabajo realizado a partir del plan de control de calidad y ensayo.

5.3. PLAN DE CONTROL Y ENSAYO

Control de calidad

El control de calidad es esencial para asegurar el cumplimiento de las especificaciones técnicas a lo largo de toda la obra. Las actividades que se llevarán a cabo incluyen:

1. Control de procedencia de los materiales:

- La emulsión bituminosa deberá cumplir con las especificaciones establecidas en el artículo 214 del PG-3.

2. Control de ejecución:

Dosificación de la emulsión y agua de aporte

- Se controlará el funcionamiento de las boquillas de inyección al menos dos veces al día (mañana y tarde) y antes de iniciar los trabajos.
- Se controlará el consumo efectivo de ligante y agua en cada camión de suministro, contrastando con la información del equipo de control de volumen.

Dosificación de aditivos

- La dosificación de aditivos específicos se controlará según el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

Fresado y mezcla reutilizada

- Por cada lote y al menos dos veces al día se realizarán las siguientes determinaciones:
 - Granulometría (norma UNE-EN 933-1) del material a reutilizar.
 - Contenido de ligante (normas UNE-EN 12697-1 o UNE-EN 12697-39) del material a reutilizar.
 - Contenido de humedad de la mezcla reutilizada (norma UNE EN 1097-5).
 - Dosificación de ligante (normas UNE-EN 12697-1 o UNE-EN 12697-39) de la mezcla bituminosa reutilizada.
 - Fabricación y curado de probetas para determinar la resistencia a compresión estática y resistencia conservada según el apartado 20.3. del art. 20 del PG-4.
- La adición de agua y emulsión se controlará mediante el caudalímetro del equipo de reutilización, con registro automático del sistema.
- Se verificarán la profundidad y anchura de reutilización, velocidad del rotor y del equipo, aspecto de la mezcla, espesor extendido y más.

Compactación

- Se verificará que el equipo de compactación cumple con las aprobaciones del Director de las Obras.
- Se controlará el número y tipo de compactadores, dispositivos de humectación y limpieza, lastre y masa total, frecuencia y amplitud, y el número de pasadas de cada compactador.
- El control de compactación rápida se contrastará en el tramo de prueba.

Curado y protección superficial

- Se comprobará diariamente la ausencia de deformaciones y pérdida de partículas por tráfico.
- En caso de riego de protección con árido de cobertura, se controlará según el apartado 20.5.8. del art. 20 del PG-4.

3. Control de recepción de la unidad terminada:

Lotes de recepción

- El lote aceptado o rechazado se definirá según:
 - 500 metros de calzada.
 - 3,500 m² de calzada.
 - La fracción construida diariamente.

Espesor, Densidad y Humedad

- Se comprobarán mediante extracción de testigos cilíndricos según norma UNE-EN 12697-27 después del curado y antes de la capa siguiente.
- Se comprobará que los testigos sean homogéneos y compactos.
- Se verificarán la rasante, anchura y espesor de la capa reutilizada.

Regularidad Superficial

- Se comprobará mediante el índice de regularidad internacional (IRI) según norma NLT-330 en tramos de 1,000 metros, asegurando que cumple con las especificaciones del apartado 20.7.3 del art. 20 de la OC 2/2023.

Especificaciones de la unidad terminada

Densidad

- La densidad mínima será $\geq 98\%$ de la densidad de referencia.
- La diferencia de densidades entre la superficie y la base de la capa no superará $\leq 3\%$.

Terminación, Rasante, Anchura y Espesor

- La textura será uniforme, sin segregaciones ni ondulaciones, y con pendientes adecuadas.
- La rasante no superará la teórica ni será inferior en más de 15 mm.
- La anchura no superará ni será inferior en más de 10 cm a la establecida.
- El espesor no será inferior al previsto.

Regularidad Superficial

- El índice de regularidad internacional (IRI) deberá cumplir los valores indicados en la tabla 20.7 del art. 20 de la OC 2/2023 del PG-4.

Criterios de Aceptación o Rechazo

Densidad

- Si la densidad media es inferior a la especificada, se aplicarán penalizaciones o se procederá a la demolición y reposición según los criterios establecidos.

Espesor

- Si el espesor es inferior al especificado, se compensará con una capa adicional a cargo del Contratista.

Rasante

- Se corregirán las tolerancias rebasadas por exceso mediante fresado y se compensarán las mermas por defecto con una capa adicional.

Regularidad Superficial

- Se aplicarán penalizaciones o correcciones mediante fresado si los límites establecidos se sobrepasan.

Medición y Abono

Emulsión bituminosa

- Se abonará por toneladas realmente empleadas.

Aditivos

- Se abonarán por toneladas si están explícitamente recogidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

Ejecución de la reutilización “in situ”

- Se abonará por metros cuadrados de material reutilizado, considerando todos los procesos involucrados.

Ligante Bituminoso para protección superficial

- Se abonará por toneladas realmente empleadas.

Árido de cobertura superficial

- Se abonará por toneladas, incluyendo extensión, apisonado y barrido posterior.

El protocolo descrito asegura una ejecución eficiente y de alta calidad del proyecto de reciclado en frío “in situ” con emulsión bituminosa III, cumpliendo con los estándares y especificaciones técnicas establecidas. Este plan de control y ensayo es fundamental para garantizar que todas las fases del proyecto se lleven a cabo con precisión, asegurando resultados duraderos y de calidad.

5.4. VALORACIÓN ECONÓMICA

La valoración económica del protocolo de actuación para la aplicación técnica del trabajo se basa en una evaluación detallada de los costos por unidad de obra necesarios para la rehabilitación propuesta, reflejando una estimación del presupuesto de ejecución material (PEM) de la solución. Este análisis financiero es crucial para garantizar la viabilidad económica del proyecto, proporcionando una visión clara de los recursos financieros requeridos para llevar a cabo la rehabilitación de manera efectiva.

Componentes del presupuesto

El presupuesto estimado incluye varios componentes esenciales que abarcan desde la adquisición y transporte de materiales hasta la ejecución de los trabajos en el sitio. A continuación se detalla cada uno de estos componentes:

1. Emulsiones bituminosas.

- **Emulsión C60B ADH en riesgos de adherencia:** Se requieren 15,83 toneladas de esta emulsión, con un costo unitario de 5.065,42 €/t, lo que da un total de 80.188,24 €. Esta emulsión es crucial para mejorar la adherencia de las capas de mezcla bituminosa a la superficie existente.
- **Emulsión C60B REC para reciclado en frío:** También se necesitan 15,83 toneladas, con el mismo costo unitario de 5.065,42 €/t, resultando en 80.188,24 €. Esta emulsión se utiliza para el proceso de reciclado en frío, asegurando una correcta integración de las mezclas recicladas.

2. Mezclas bituminosas.

- **Fabricación y transporte de AC 16 SURF S silíceo:** Se han estimado 3.489,41 toneladas a un costo unitario de 69,718.46 €/t, lo que suma 243.415,47 €. Esta mezcla bituminosa es fundamental para la capa de rodadura, proporcionando durabilidad y resistencia.

- **Puesta en obra de la mezcla bituminosa (MB) con extensión > 300 t:** Para la aplicación de 3.489,41 toneladas de mezcla bituminosa, el costo unitario es de 18.773,04 €/t, totalizando 65.507,72 €. Este costo incluye la mano de obra y maquinaria necesarias para la correcta aplicación y compactación de la mezcla en el sitio.

3. Betunes.

- **Betún asfáltico 35/50:** Se requieren 182,22 toneladas a un costo unitario de 69.418,57 €/t, resultando en 12.654,85 €. Este betún es utilizado para asegurar la cohesión y durabilidad de las mezclas bituminosas.

4. Reciclado de firmes.

- **Reciclado de firme “in situ” con emulsión bituminosa:** La superficie a reciclar es de 28.485 metros cuadrados, con un costo unitario de 350,650.35 €/m², lo que da un total de 350.650,35 €. Este proceso de reciclaje es fundamental para la reutilización de materiales existentes y la mejora de la estructura del firme.

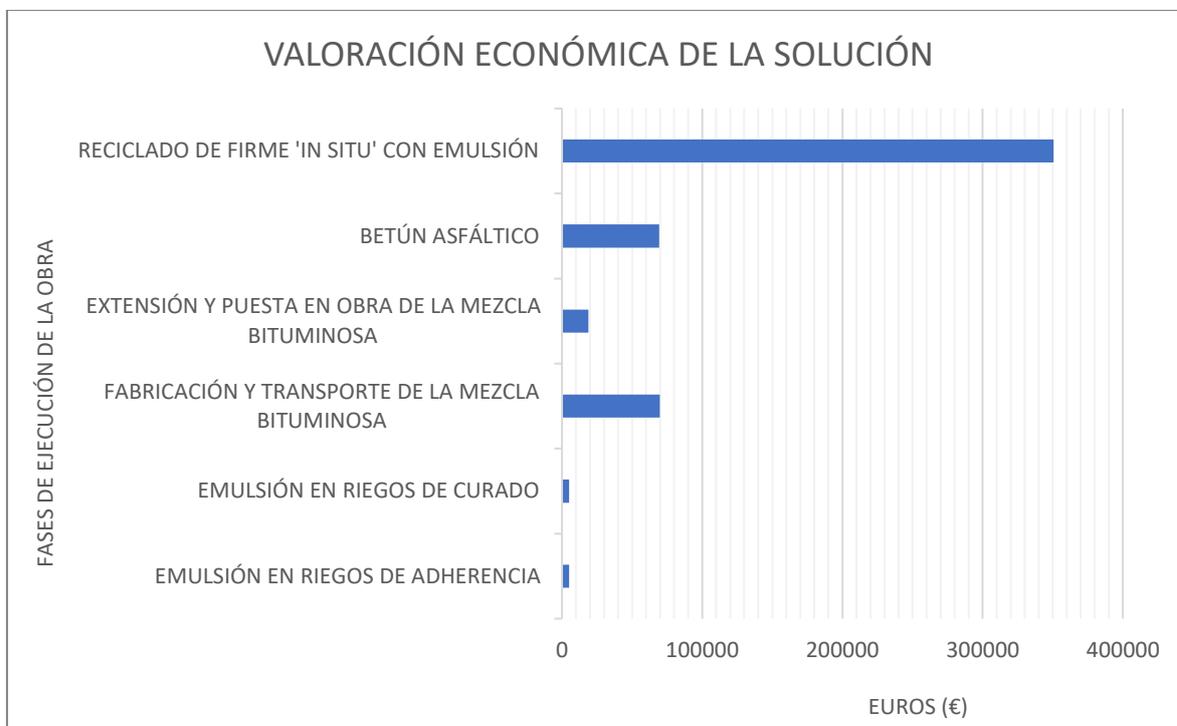
Coste total estimado

Al sumar los costos de todos los componentes mencionados, como se muestra en la Tabla 12, el coste total estimado para la rehabilitación asciende a **518.691,27 €**. Esta cifra representa una estimación integral de los recursos financieros necesarios para implementar la solución técnica propuesta, garantizando que cada fase del proyecto se ejecute conforme a los estándares de calidad y eficiencia establecidos.

TABLA 12. VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA EJECUCIÓN MATERIAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

0404	UNIDAD	EMULSIONES BITUMINOSAS	PRECIO/UD.	MEDICIÓN	PRECIO
P040401	t	EMULSIÓN C60B ADH EN RIEGOS DE ADHERENCIA	320,09 €	15,83	5.065,42 €
P040407	t	EMULSIÓN C60B3 CUR EN RIEGOS DE CURADO	320,09 €	15,83	5.065,42 €
0405		MEZCLAS BITUMINOSAS			
P04050105	t	AC 16 SURF S SILÍCEO EXCEPTO LIGANTE	19,98 €	3.489,41	69.718,46 €
P04050204	t	PUESTA EN OBRA DE MB CON EXTENSIÓN T> 300 t	5,38 €	3.489,41	18.773,04 €
0406		BETUNES			
P040602	t	BETÚN ASFÁLTICO 35/50	380,95 €	182,22	69.418,57 €
0409		RECICLADO DE FIRMES			
P04090101	m ³	RECICLADO DE FIRME IN SITU CON EMULSIÓN	12,31 €	28.485,00	350.650,35
				TOTAL EM	518.691,27 €

La Gráfica 12 ilustra la distribución de los costes y demuestra el compromiso con la eficiencia en la ejecución de cada fase del proyecto. Además, proporciona una representación visual de los costes y ayuda a garantizar la correcta asignación de recursos, facilitando la optimización del presupuesto y la consecución de resultados duraderos y funcionales en la red vial.



GRÁFICA 12. VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA EJECUCIÓN MATERIAL DE LA SOLUCIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

6. CONCLUSIONES

El Reciclado en Frío con Emulsión bituminosa (RFE) ha demostrado ser una técnica en constante evolución, impulsada por la crisis del petróleo. Durante la década de 1990, el RFE logró consolidarse como una solución efectiva y prometedora para la rehabilitación de pavimentos, estableciendo un importante precedente en su adopción. Hoy en día, la normativa española, junto con las directrices del Fondo de Recuperación *Next Generation* EU y el respaldo de organizaciones como ASEFMA en su compromiso por la transición global hacia un crecimiento económico, sostenible y resiliente, promueven su uso generalizado. En particular, el RFE Tipo III por su eficiencia energética y reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) al permitir el reciclado "in situ" de pavimentos asfálticos.

En este contexto, el presente Trabajo de Fin de Máster propone el desarrollo de tecnologías sostenibles para el reciclado de pavimentos en frío "in situ" utilizando emulsión bituminosa, mediante métodos analíticos. Esta metodología se posiciona como una estrategia alternativa, sostenible y eficaz de mantenimiento preventivo para carreteras con fatiga pero sin agotamiento estructural, en contraste con los métodos convencionales de rehabilitación de carreteras. Además, destaca la importancia de seleccionar cuidadosamente los materiales y las dosificaciones para maximizar el rendimiento de las mezclas asfálticas recicladas. La propuesta, centrada en el tramo del PK 48+900 al PK 52+065 de la carretera A-221 en Caspe, Zaragoza, se basa en un análisis exhaustivo de la información disponible, complementado con una inspección visual detallada y una evaluación precisa de la condición estructural y superficial del pavimento, que incluye la medición de las deflexiones y el Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

Los resultados obtenidos muestran que una mezcla del 100% de material reciclado con partículas de hasta 22 mm y una emulsión bituminosa C60B5 REC con betún residual al 60%, combinada con aditivos rejuvenecedores en proporciones específicas, mejora significativamente la resistencia y la capacidad estructural de las capas recicladas. En concreto, las mezclas con un 4% de emulsión proporcionan una resistencia húmeda superior y un incremento notable en el módulo resiliente, optimizando la capacidad estructural sin incurrir en sobrecostes. Igualmente, la incorporación del 4,2% de aditivo rejuvenecedor QP FLUX F y un 2% de agua al betún 35/50 contribuye positivamente a la resistencia húmeda, destacando significativamente la relevancia de estos componentes en la mejora de las propiedades mecánicas.

El estudio de caso ha corroborado la eficacia del RFE III en la rehabilitación de un tramo de 3,165 km en la carretera A-221. La intervención planteada, que incluye el fresado de 6 cm y la reposición con la tecnología de reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa III desarrollada, junto con un recrido de 5 cm de refuerzo con mezcla AC16 SURF S, ha logrado una reducción del 70,31% en el consumo de recursos energéticos y del 68,34% en las emisiones de GEI comparado con métodos convencionales que utilizan mezclas bituminosas en caliente. Con una valoración económica de 518.691,27 €, el proyecto no solo cumple con las estrictas normativas técnicas, sino que también representa una solución robusta y sostenible, ofreciendo mejoras significativas en términos medioambientales.

En conclusión, la implementación del RFE III no solo representa un avance significativo en la rehabilitación de pavimentos, sino que también se alinea con los objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética. Este trabajo destaca la importancia de adoptar prácticas innovadoras en la industria de la construcción, promoviendo un desarrollo más resiliente y respetuoso con el medio ambiente.

Recomendaciones y futuro de la investigación

Para continuar avanzando en la mejora de las prácticas del Reciclado en Frío con Emulsión bituminosa (RFE) III, se recomienda considerar las siguientes medidas estratégicas:

- 1. Exploración de nuevas combinaciones de ligantes y aditivos:** Investigar nuevas formulaciones permitirá optimizar las propiedades mecánicas y medioambientales de las mezclas recicladas, asegurando una mayor durabilidad y rendimiento en diversas condiciones climáticas y de tráfico.
- 2. Estudios a largo plazo:** Realizar investigaciones prolongadas para evaluar el comportamiento y la durabilidad de las capas recicladas en frío, monitorizando la resistencia a la fatiga, el envejecimiento, la estabilidad estructural y la respuesta a condiciones ambientales variables.
- 3. Análisis del Ciclo de Vida (ACV):** Profundizar en el análisis del ciclo de vida para cuantificar de manera precisa el impacto ambiental del reciclaje en frío en comparación con otras alternativas. Realizar estudios económicos detallados que evalúen los costes de implementación, mantenimiento y los beneficios a largo plazo en términos de sostenibilidad económica.

4. **Implementación de técnicas avanzadas de control de calidad:** Adoptar métodos más precisos para evaluar y garantizar la calidad de las mezclas recicladas durante todas las etapas del proceso de fabricación y mantenimiento de carreteras.
5. **Uso de Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS):** Integrar sistemas de gestión de pavimentos para optimizar la toma de decisiones en el proceso de mantenimiento, mejorando la eficiencia y efectividad de las intervenciones.

Estas recomendaciones fortalecerán la posición del reciclado en frío como una técnica innovadora y eficiente en la construcción de carreteras, contribuyendo al desarrollo de infraestructuras más resilientes y sostenibles. Avanzar en estas áreas garantizará un crecimiento infraestructural que sea tanto ambientalmente responsable como económicamente viable a largo plazo.

REFERENCIAS

- Asf, R. D. E. P. (2011). *Nombre en inglés : Reclaimed Asphalt Pavements*. 1–22.
- BOE. (2022). Ley 7/2022 , de 8 de abril , de residuos y suelos contaminados para una economía
ci/Cular. *Boletín Oficial Del Estado*, 85, 1–137.
- Dirección General de Carreteras. (2019). *Orden ci/Cular OC 3-2019 sobre mezclas bituminosas
tipo SMA*.
- EAPA. (2022). *Asphalt-in-Figures-2022-Regular*.
- European Asphalt Pavement Association. (2014). The use of Warm Mix Asphalt. *Position Paper*,
1–23. www.eapa.org
- FHWA. (2011). Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. *Report
No. FHWA-HRT-11-021*, FHWA, McLean, Virginia.
- Fomento, M. de. (2003). *Norma 6.1 IC Secciones de Firme*. 1–33.
- Galvis, R. (2021). *Una visión sobre el procesamiento del material RAP para su reutilización en
planta*. 13–23.
- Gobierno de España. (2024). *Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible*.
<https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>
- In, R., Con, S., Cemento, E. Y., & Asfálticos, D. E. P. (2015). *A TÉCNICA*. 1–21.
- James W, Elston D, T. J. et al. (20 C.E.). 濟無No Title No Title No Title. *Andrew’s Disease of the
Skin Clinical Dermatology*.
- Llopis Castelló, D., & Pérez Zuriaga, A. M. (2020). Deterioros en pavimentos urbanos.
Universidad Politécnica de Valencia, 1.
- Ministerio de Fomento. (2003). Instrucción de carreteras. Norma 6.3 IC: Rehabilitación de
firmes. *Normativas. Instrucciones de Construcción*, 70 000, 74.
- MITMA. (2023). *Ci/Cular Order OC 2/2023 on reuse of bituminous pavements and layers (PG-4)*.
Article 20. Cold in place recycling with bituminous emulsion.
- Orosa, P., Civil, I., Pérez, I., Titular, P., María, A., Profesora, R., & Universidad, T. (n.d.). *Texto
completo Mezclas bituminosas recicladas en frío con emulsión : Sostenibilidad y
Ci/Cularidad en el sector de la Autores :*
- Peraka, N. S. P., & Biligiri, K. P. (2020). Pavement asset management systems and technologies:
A review. *Automation in Construction*, 119(June).
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103336>
- Restrepo, H. Stephens, S. (2015). *3.-Estudio de las Ventajas Económicas del Reciclaje en frío in
situ de pavimentos asfálticos*. 86.

- Soto, J. A., & Peña, J. L. (2017). Reciclado En Frio Con Emulsion. *Asociación Técnica de Emulsiones Bitulimosas (ATEB)*, 1–30.
http://ateb.es/images/pdf/monografias/6._RECICLADO_EN_FRIO_CON_EMULSION.pdf
0Ahttps://www.ateb.es/
- Technical Association for Bituminous Emulsions (ATEB). (2018). *Las emulsiones de betún. Su química y su física*.
- Wirtgen, G. (2004). *Wirtgen Manual de Reciclado en Frío*.
- Zuriaga, P., & María, A. (n.d.). *Los firmes en carreteras : características generales y funciones. 1*, 1–8.



ANEJOS

ANEJOS

ANEJO Nº 0 CASO DE ESTUDIO

APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 0 TESTIGOS Y SECCIONES ESTUDIADAS
APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 0 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRAMO

ANEJO Nº 1 ESTUDIO PREVIO

APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 1 INFORMACIÓN DISPONIBLE
APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 1 INSPECCIÓN VISUAL
APÉNDICE Nº 3 DEL ANEJO 1 GRANULOMETRÍA DE FRESADO
APÉNDICE Nº 4 DEL ANEJO 1 CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE
APÉNDICE Nº 5 DEL ANEJO 1 CONTENIDO DE AGUA
APÉNDICE Nº 6 DEL ANEJO 1 DENSIDAD MÁX. Y HUMEDAD ÓPTIMA

ANEJO Nº 2 ESTUDIO ESTRUCTURAL

APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 2 DEFLEXIONES
APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 2 IRI
APÉNDICE Nº 3 DEL ANEJO 2 DIAGNÓSTICO PRELIMINAR Y TRAMIFICACIÓN

ANEJO Nº 3 ENSAYOS DE LABORATORIO

APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 3 SENSIBILIDAD AL AGUA Y DENSIDAD
APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 3 MÓDULO RESILIENTE

ANEJO Nº 4 EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL

APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 4 DEFINICIÓN DE LAS SOLUCIONES
APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 4 CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS
APÉNDICE Nº 3 DEL ANEJO 4 EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

ANEJO Nº 5 PROTOCOLO DE ACTUACIÓN

APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 5 UNIDADES DE OBRA
APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 5 FASES DE EJECUCIÓN
APÉNDICE Nº 3 DEL ANEJO 5 PLAN DE CONTROL Y ENSAYO

ANEJO Nº 6 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

PLANOS

PLANO Nº 1.1 PLANTA DE SITUACIÓN E ÍNDICE DE PLANOS
PLANO Nº 1.2 PLANTA GENERAL – DISTRIBUCIÓN DE HOJAS
PLANO Nº 2 PLANTA GENERAL - ACTUACIONES
PLANO Nº 3 SECCIONES TIPO



ANEJO 0. CASO DE ESTUDIO



APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 0 TESTIGOS Y SECCIONES ESTUDIADAS

TESTIGO N° 1

Pk 1+400 - MD - EJE



TESTIGO N° 4

Pk 2+400 - MD - EJE



TESTIGO N° 7

Pk 2+300 - MI - EJE



TESTIGO N° 2

Pk 1+800 - MD - EJE



TESTIGO N° 5

Pk 3+300 - MD - EJE



TESTIGO N° 8

Pk 1+900 - MI - ROD. EXT.



TESTIGO N° 3

Pk 1+950 - MD - ROD. EXT.



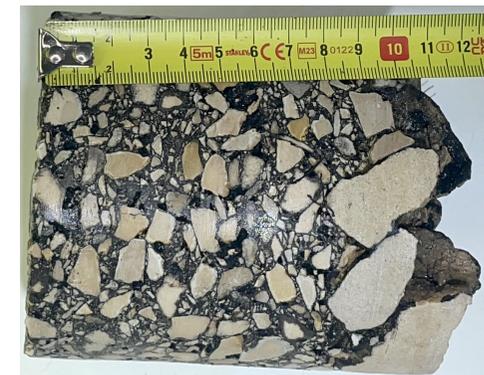
TESTIGO N° 6

Pk 2+900 - MI - EJE



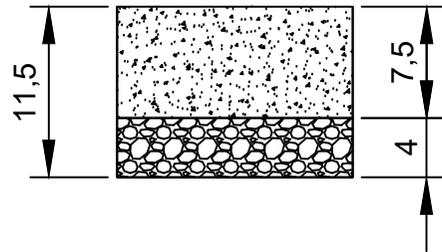
TESTIGO N° 9

Pk 1+700 - MI - ROD. EXT.



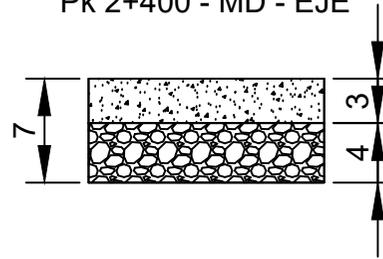
TESTIGO N° 1

Pk 1+400 - MD - EJE



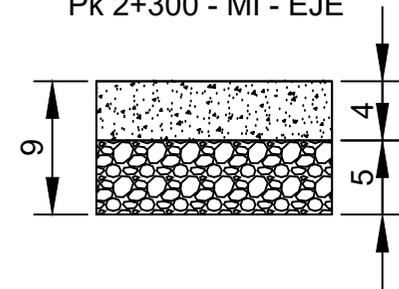
TESTIGO N° 4

Pk 2+400 - MD - EJE



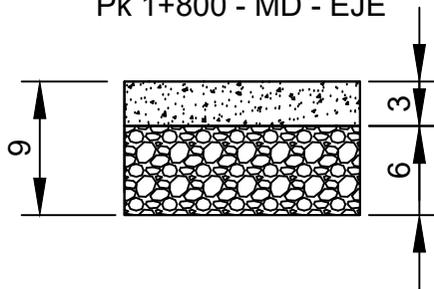
TESTIGO N° 7

Pk 2+300 - MI - EJE



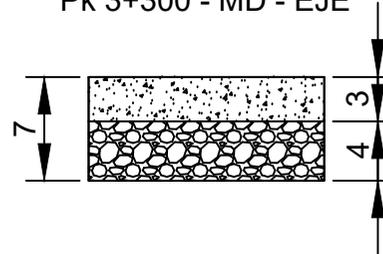
TESTIGO N° 2

Pk 1+800 - MD - EJE



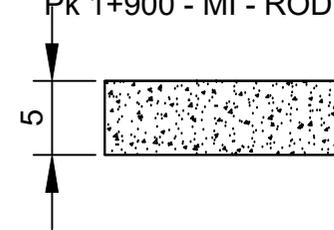
TESTIGO N° 5

Pk 3+300 - MD - EJE



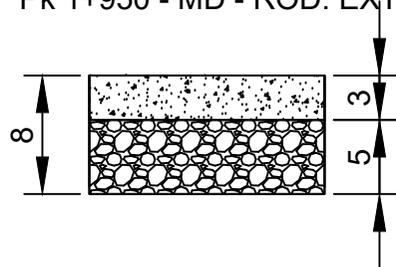
TESTIGO N° 8

Pk 1+900 - MI - ROD. EXT.



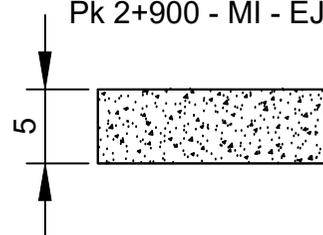
TESTIGO N° 3

Pk 1+950 - MD - ROD. EXT.



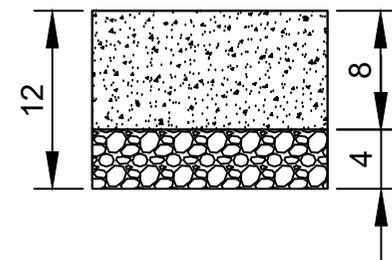
TESTIGO N° 6

Pk 2+900 - MI - EJE



TESTIGO N° 9

Pk 1+700 - MI - ROD. EXT.



LEYENDA:

 MB

 MAC

TESTIGO N° 1

Pk 47+300 - MI



TESTIGO N° 4

Pk 50+400 - MD



TESTIGO N° 3

Pk 49+100 - MI



TESTIGO N° 2

Pk 48+100 - MD



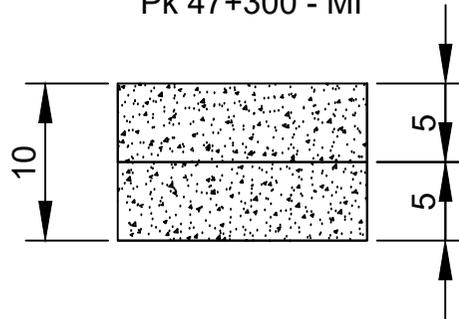
TESTIGO N° 5

Pk 51+000 - MI



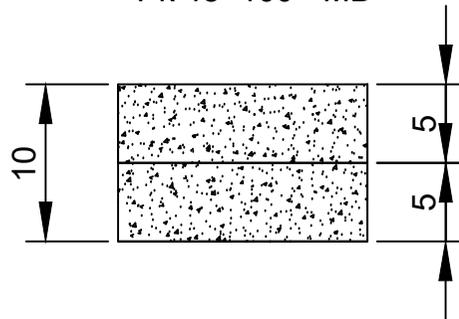
TESTIGO N° 1

Pk 47+300 - MI



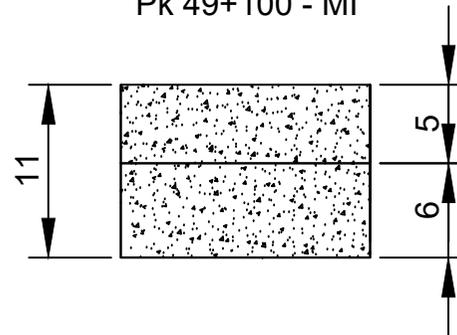
TESTIGO N° 2

Pk 48+100 - MD



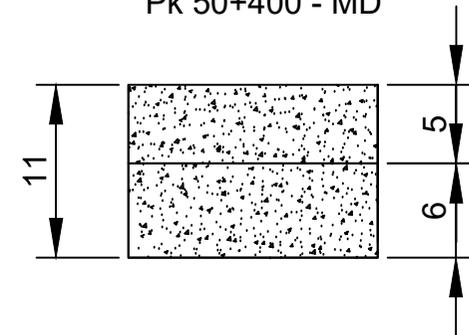
TESTIGO N° 3

Pk 49+100 - MI



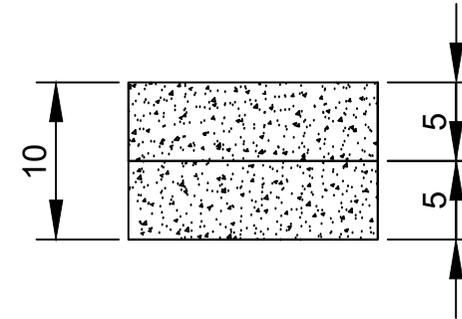
TESTIGO N° 4

Pk 50+400 - MD



TESTIGO N° 5

Pk 51+000 - MI



LEYENDA:

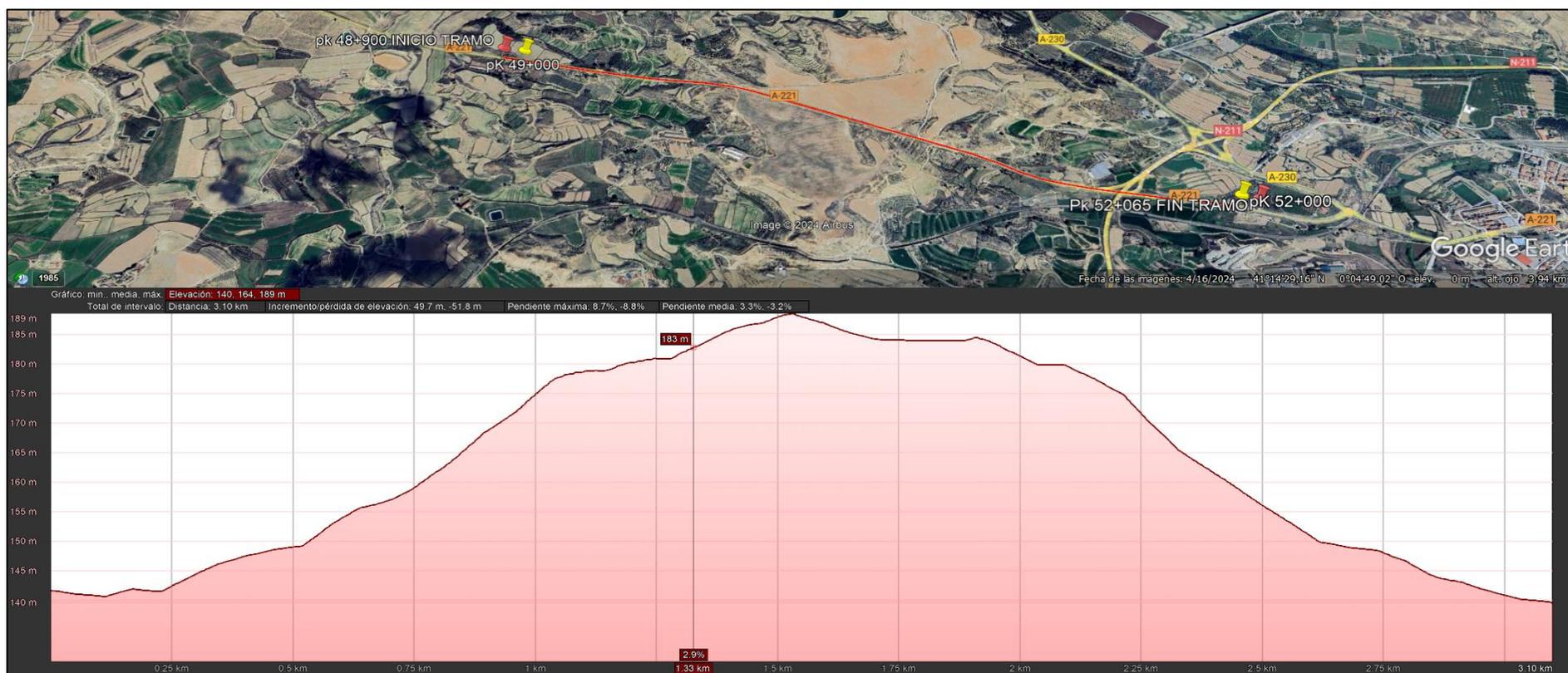
 MB



APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 0 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRAMO

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CASO DE ESTUDIO

PK		LONGITUD (m)	SECCIÓN TRANSVERSAL		SUPERFICIE TOTAL (m ²)	DESCRIPCIÓN		
INICIO	FIN		CALZADA	ARCENES		VÍA	TIPO DE TRÁFICO	TRAMO
48+900	52+065	3.165	7,40	0,80	28.485	CONVENCIONAL	T 31	Desvío Chiprana - Intersección A-230





ANEJO 1. ESTUDIO PREVIO



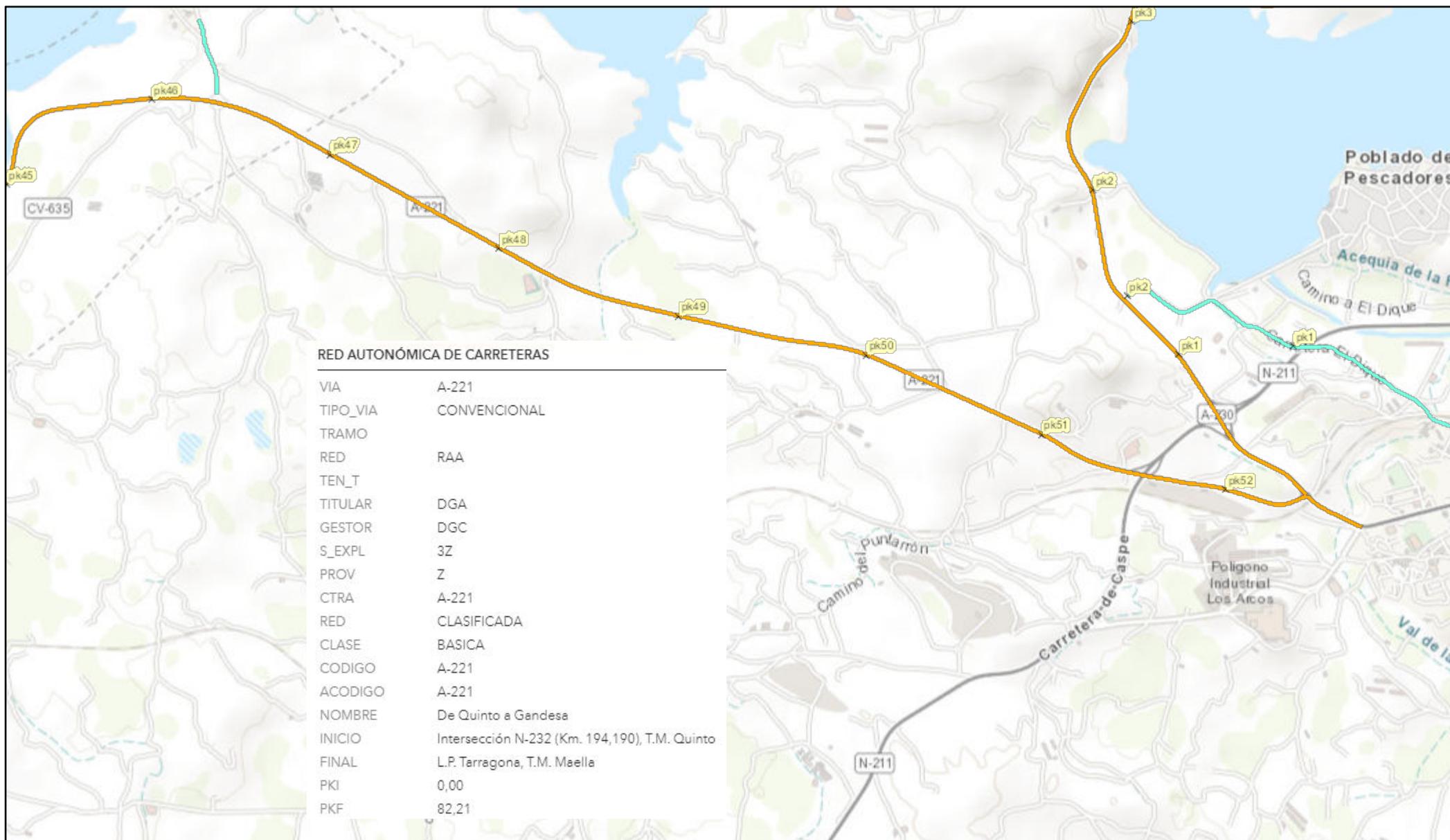
APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 1 INFORMACIÓN DISPONIBLE



GOBIERNO DE ARAGÓN. PUNTOS KILOMÉTRICOS DE LA RED DE CARRETERAS



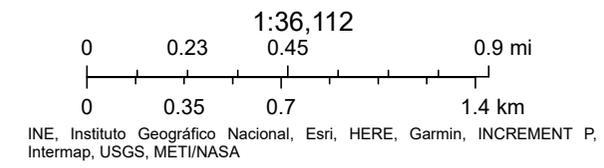
RED AUTONÓMICA DE CARRETERAS DE ARAGÓN, TRAMO CARRETERA A-221



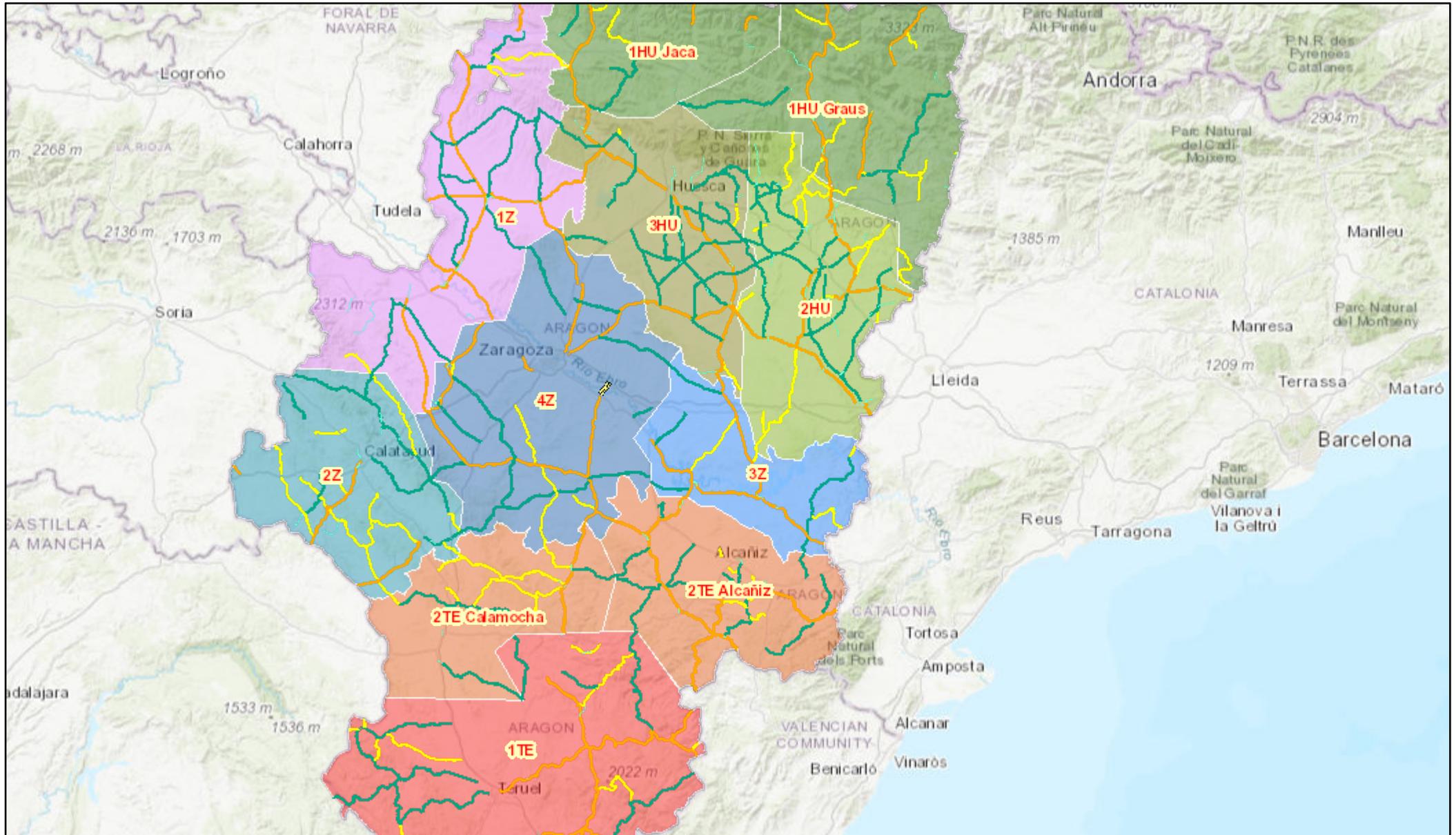
7/6/2024, 13:43:36

- × SI
- CARRETERAS.RAA_CARRETERAS
- ALTA CAPACIDAD

- BASICA
- COMARCAL
- LOCAL
- ANTIGUA LOCAL
- ANTIGUA CARRETERA
- ACCESO



SECTORES DE CONSERVACIÓN Y EXPLOTACIÓN



14/6/2024, 12:06:49

SECTORES DE CONSERVACIÓN Y EXPLOTACIÓN

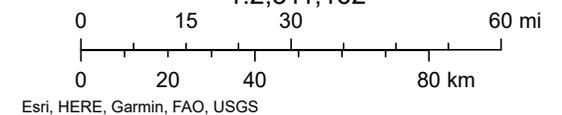
- 1HU Graus
- 1HU Jaca
- 1TE
- 1Z

- 2HU
- 2TE Alcañiz
- 2TE Calamocha
- 2Z
- 3HU

- 3Z
- 4Z
- CARRETERAS POR SECTOR
- ALTA CAPACIDAD
- BASICA

- COMARCAL
- LOCAL
- ANTIGUA CARRETERA
- ANTIGUA LOCAL
- ACCESO

1:2,311,162

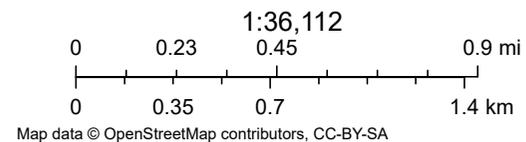


TIPO DE RELIEVE



7/6/2024, 13:55:42

- × SI
- CARRETERAS.RAA_RELIEVE
- Llano
- Ondulado
- Accidentado
- Muy accidentado



ANCHO DE LA PLATAFORMA



10/6/2024, 18:01:27

CARRETERAS.RAA_PLATAFORMA

< 4

4 - 5

5 - 6

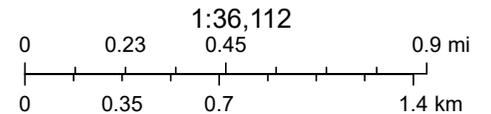
6 - 7

7 - 8

8 - 9

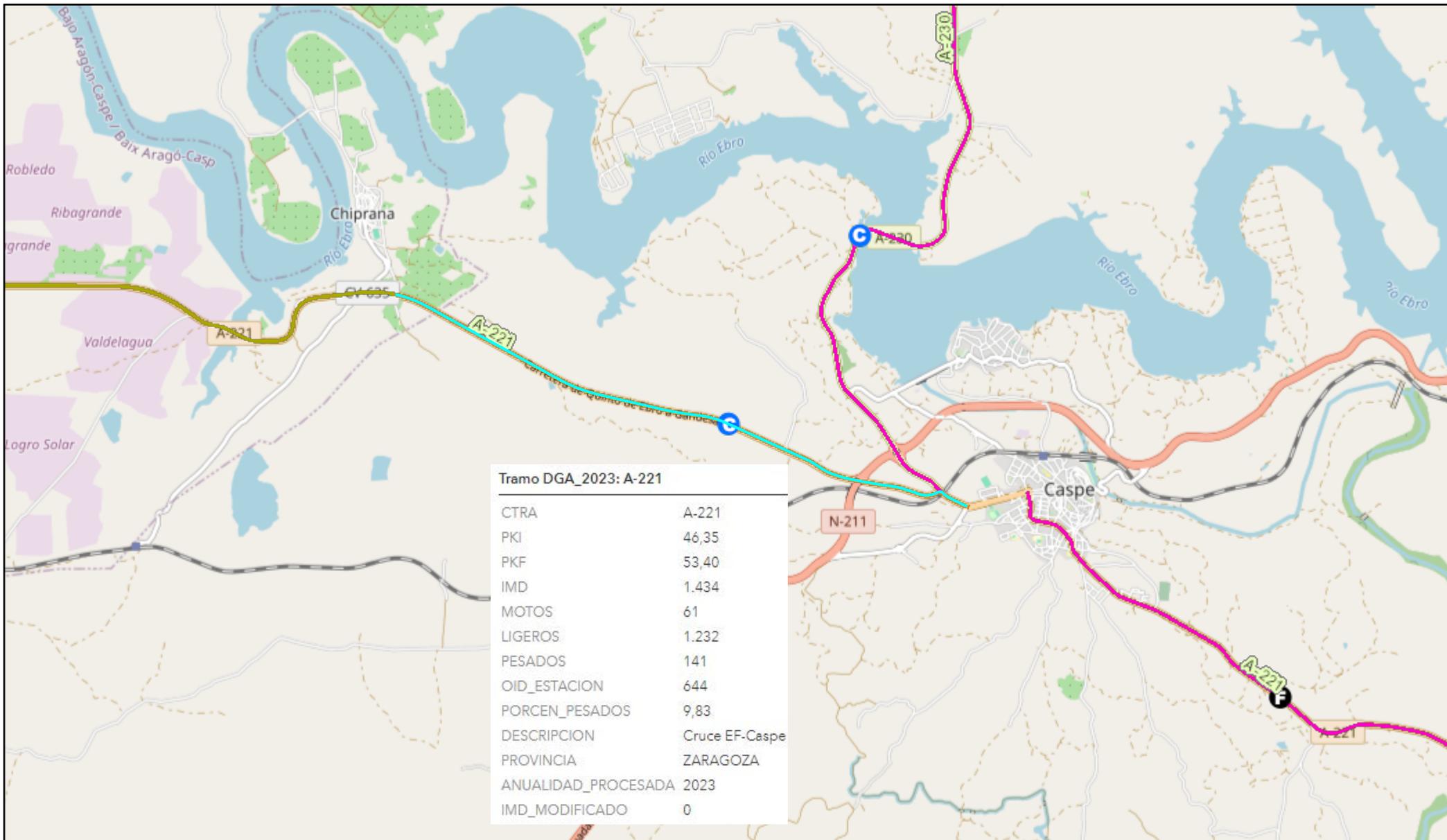
9 - 10

> 10



INE, Instituto Geográfico Nacional, Esri, HERE, Garmin, INCREMENT P, Intermap, USGS, METI/NASA

AFORO 2023 TRAMO A-221



7/6/2024, 13:36:25

CARRETERAS.TramosDGA_2023

0 - 200

201 - 500

501 - 1000

1001 - 2000

2001 - 5000

5001 - 10000

CARRETERAS.ESTACIONES2023

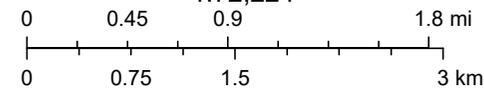
F Permanente

P Primaria

S Secundaria

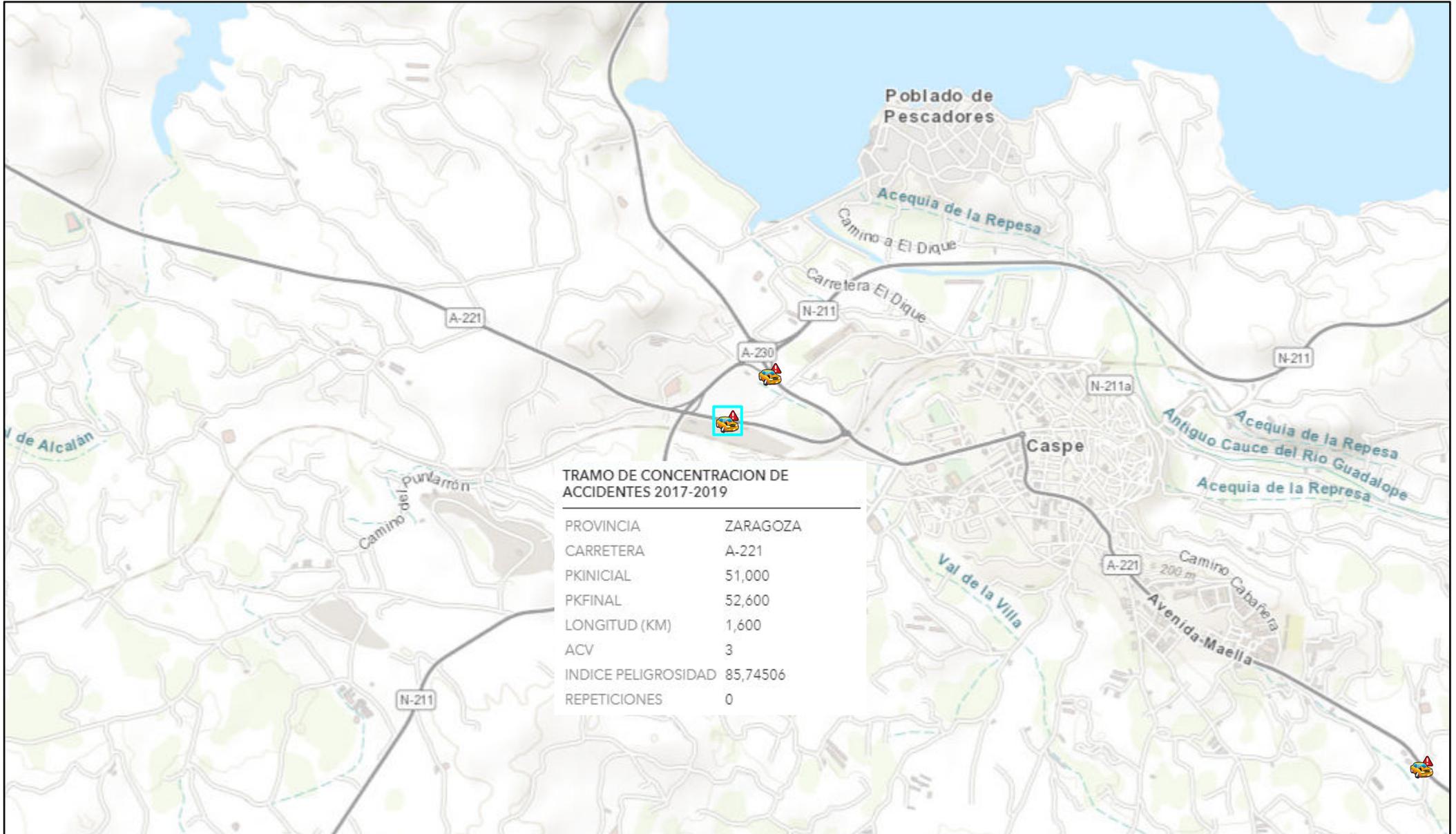
C De cobertura

1:72,224



Map data © OpenStreetMap contributors, CC-BY-SA

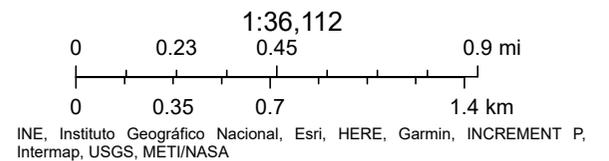
TRAMO DE CONCENTRACION DE ACCIDENTES 2017-2019



7/6/2024, 13:27:39



TRAMOS DE CONCENTRACION DE ACCIDENTES 2017-2019





APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 1 INSPECCIÓN VISUAL

INSPECCIÓN VISUAL MEDIANTE FOTOGRAFÍAS

TIPO DE DAÑO	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	SIMBOLOGÍA
Grietas Longitudinales	GL	Las fisuras longitudinales son paralelas al eje central del pavimento, y las transversales se extienden a través del ancho del pavimento formando ángulos rectos con el eje central del pavimento.	
Grietas Transversales	GT		
Grietas Piel de Cocodrilo	GC	Se refiere a una serie de fisuras interconectadas causadas por acción de la fatiga de la superficie de pavimento asfáltico sometida a repeticiones de carga o tráfico. Es considerado como un daño estructural importante y suele ir acompañado de ahuellamiento.	
Grietas Bloque	GB	Son fisuras interconectadas que dividen el pavimento en piezas rectangulares. Son causadas principalmente por las variaciones diarias de temperatura y evolucionan a grietas de cocodrilo con el paso del tiempo.	
Ahuellamiento	A	Es una depresión superficial en las huellas de la rueda debida a la repetida carga del tráfico, manifestándose como surcos longitudinales en la superficie de la carretera.	
Hundimiento	H	Son pequeños desplazamientos localizados del pavimento hacia abajo que generan una superficie ondulada, y se diferencian de los baches o huecos, al no suponer una pérdida de material en la capa de rodadura.	
Desplazamiento	D	Es un corrimiento longitudinal y permanente de un área localizada de la superficie del pavimento causado por acción de la carga de tráfico o por fatiga.	

ACTUACIONES PREVIAS	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	SIMBOLOGÍA
Sellado de grietas	SG	El sellado de grietas en pavimentos bituminosos es una técnica de mantenimiento de carreteras que consiste en limpiar y rellenar las grietas con un material sellador adecuado para prevenir la filtración de agua y otros agentes que puedan deteriorar la estructura del pavimento.	



FIGURA 71. INICIO DEL TRAMO PK 48+900. FUENTE: GOOGLE EARTH PRO.



FIGURA 72. PK 49+000. FUENTE: GOOGLE EARTH PRO.



FIGURA 73. PK 50+000. FUENTE: GOOGLE EARTH PRO.

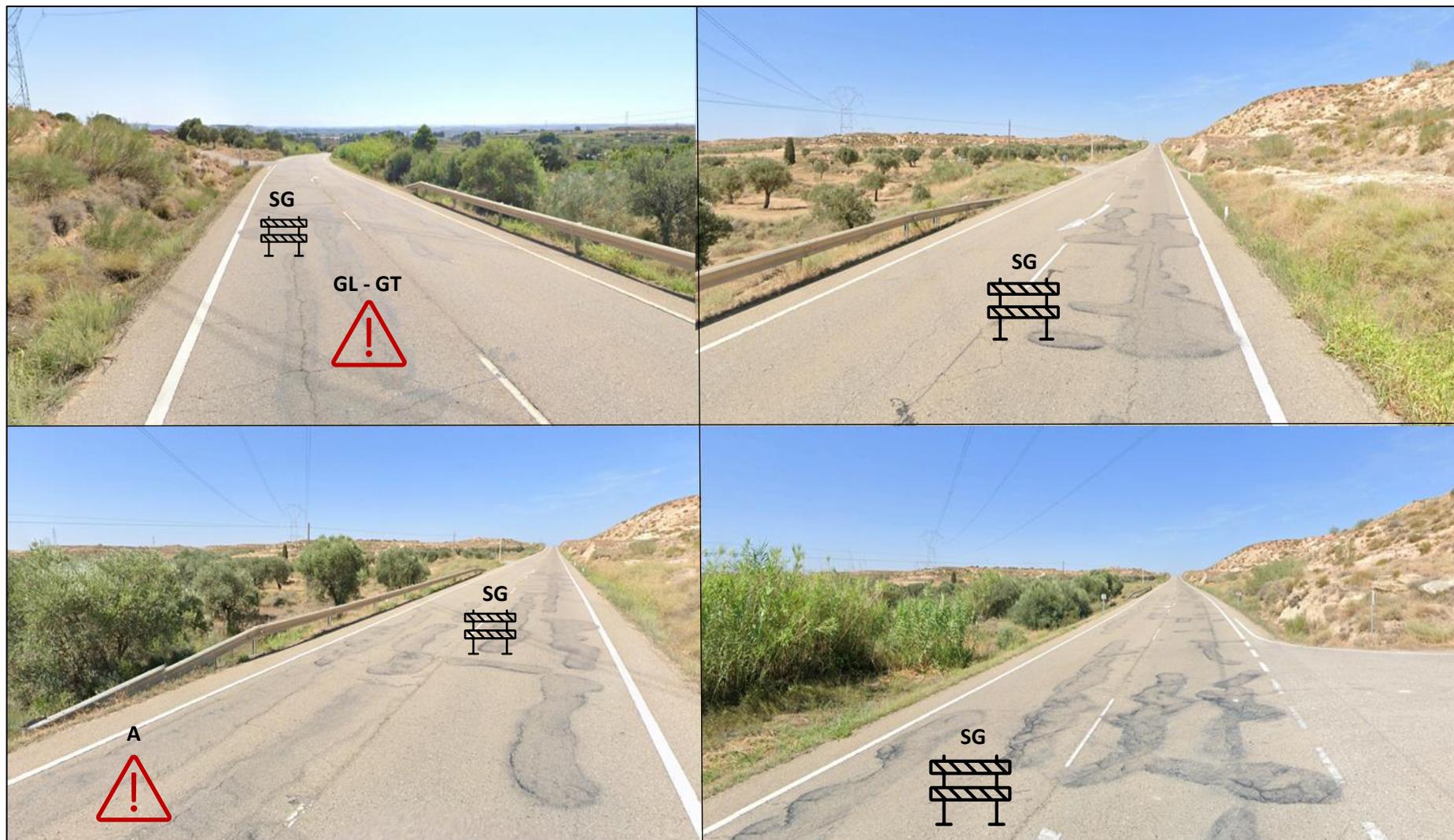


FIGURA 74. PK 51+000. FUENTE: GOOGLE EARTH PRO.

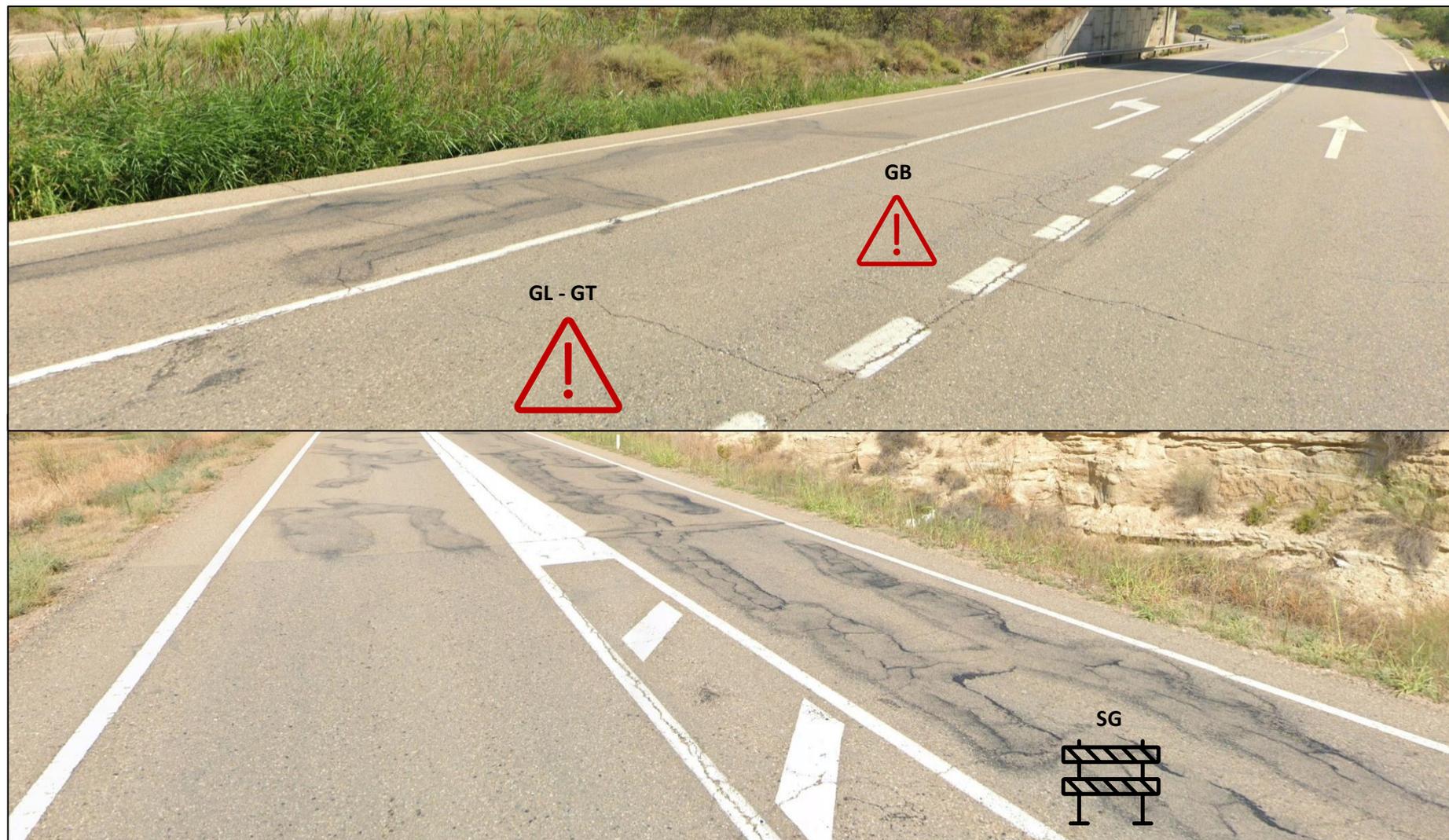


FIGURA 75. PK 51+500. FUENTE: GOOGLE EARTH PRO.

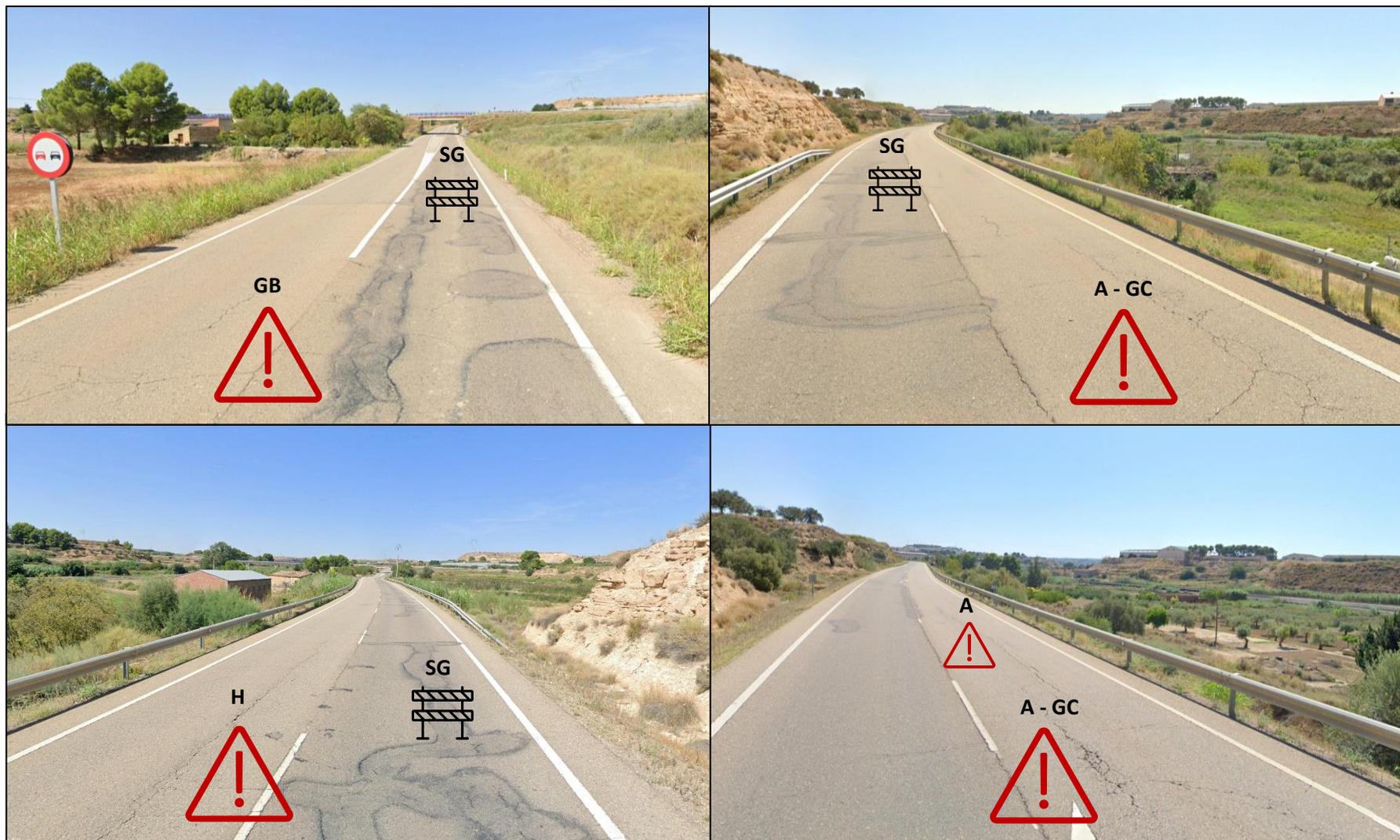


FIGURA 76. PK 52+000. FUENTE: GOOGLE EARTH PRO.



FIGURA 77. FIN DEL TRAMO PK 52+065. FUENTE: GOOGLE EARTH PRO.



APÉNDICE Nº 3 DEL ANEJO 1 GRANULOMETRÍA DE FRESADO

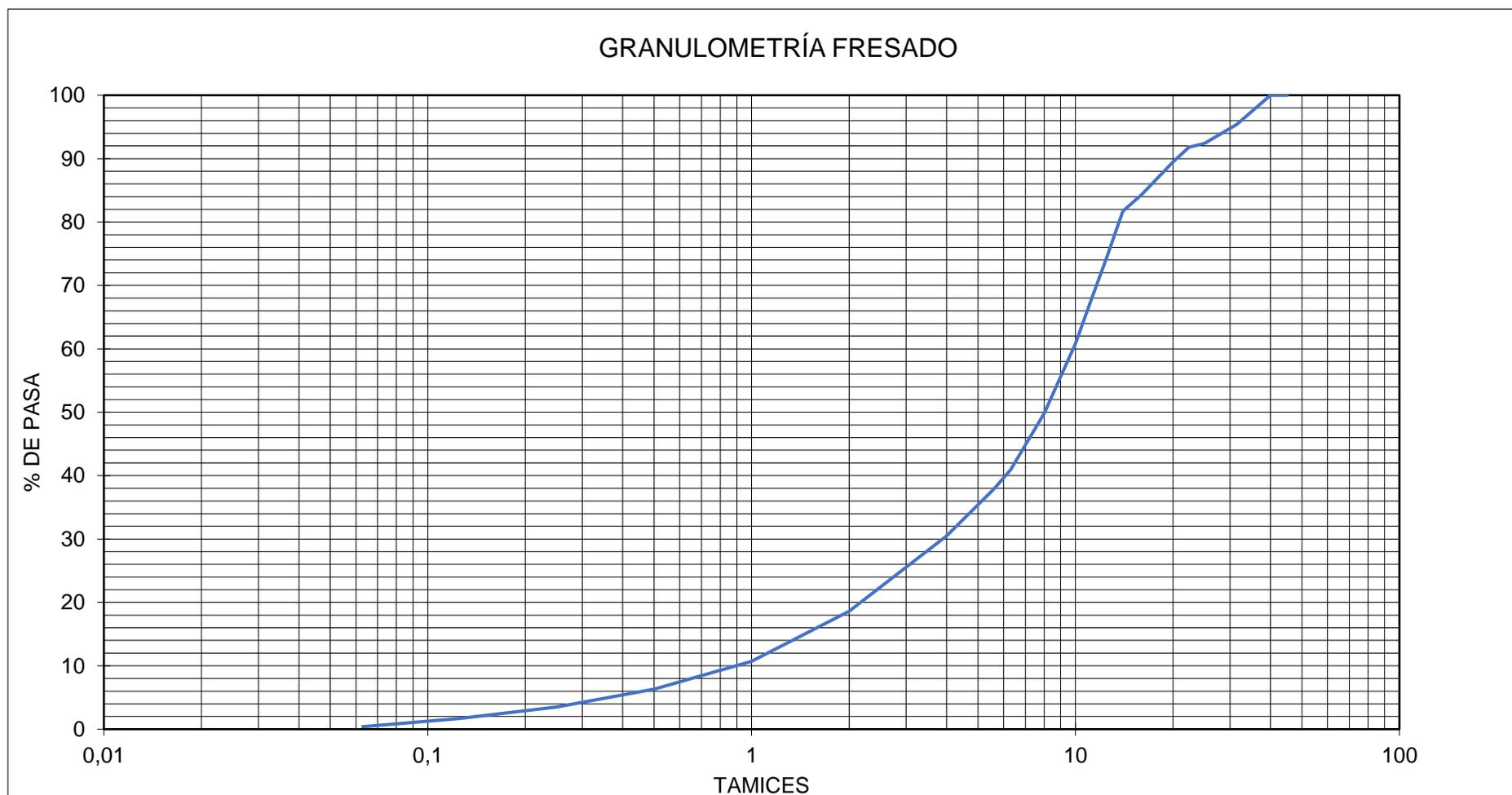


ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO NORMA UNE – EN 933-1

Nº REFERENCIA:	24050305
FECHA DE RECEPCIÓN:	03/05/24
NATURALEZA:	FRESADO TODO EN 1
PROCEDENCIA:	A-221 CASPE (ZARAGOZA)
LABORATORIO:	QUART DE POBLET (VALENCIA)

MÉTODO DE ENSAYO:	LAVADO Y TAMIZADO
--------------------------	-------------------

Tamiz UNE LUZ mm	Masa retenida		Masa que pasa
	(g)	%	%
63	0,0	0,0	100,0
45,00	0,0	0,0	100,0
40,00	0,0	0,0	100,0
31,50	121,6	4,6	95,4
25,00	197,5	7,6	92,4
22,40	215,7	8,2	91,8
20,00	274,8	10,5	89,5
16,00	410,1	15,7	84,3
14,00	479,1	18,3	81,7
12,50	667,2	25,5	74,5
11,20	839,5	32,1	67,9
10,00	1024,9	39,2	60,8
8,00	1311,6	50,2	49,8
6,30	1546,4	59,1	40,9
5,60	1624,1	62,1	37,9
4,00	1818,3	69,5	30,5
2,00	2129,5	81,4	18,6
1,00	2336,5	89,3	10,7
0,50	2451,7	93,7	6,3
0,25	2523,3	96,5	3,5
0,125	2571,6	98,3	1,7
0,063	2603,6	99,6	0,4
CANTIDAD INICIAL	2615,3		





APÉNDICE Nº 4 DEL ANEJO 1 CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE

CONTENIDO DE LIGANTE RESIDUAL NORMA UNE - EN 12697-1
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA:
ENSAYADA
PROCEDIMIENTO DE ENSAYO:

Nº REFERENCIA:	24050305
FECHA DE RECEPCIÓN:	03/05/24
NATURALEZA:	FRESADO TODO EN 1
PROCEDENCIA:	A-221 CASPE (ZARAGOZA)
LABORATORIO:	QUART DE POBLET (VALENCIA)

PREPARACIÓN DE MUESTRA:	UNE-EN 12697-8	
MÉTODO DE ENSAYO:	CENTRIFUGA	o IGNICIÓN

MÉTODO DE ENSAYO	CENTRIFUGA	CENTRIFUGA	CENTRIFUGA	CENTRIFUGA	CENTRIFUGA	CENTRIFUGA
		1	2	3	4	MEDIA
Nº de extracción						
Recipiente	A	698,6	696,9	707,3	755,6	714,6
Recipiente + mezcla	D	1725,2	1699,3	1932,1	1899	1813,9
Mezcla	C=D-A	1026,6	1002,4	1224,8	1143,4	1099,3
Materia mineral + bandeja	P1	1394,2	1264,1	1477,2	1385,0	1380,1
Bandeja	P2	493,6	390,1	396,4	390,3	417,6
Materia mineral lavada	P3=P1-P2	900,6	874	1080,8	994,7	962,525
Cápsula + filler	X	859,4	852,9	878,3	874	866,15
Cápsula	Y	773,8	769,4	783,4	773,8	775,1
Filler	P4=X-Y	85,60	83,50	94,90	100,20	91,05
Materia mineral total	M=P3+P4	986,2	957,5	1175,7	1094,9	1053,575
Betún	B=C-M	40,4	44,9	49,1	48,5	45,7
% BETUN S.MEZCLA	Bm=B/C*100	3,94	4,48	4,01	4,24	4,16
% BETUN S.ARIDOS	Ba=B/M	4,10	4,69	4,18	4,43	4,34

% BETUN S.MEZCLA	REAL 4,17
-------------------------	------------------

% BETUN S.ARIDOS	REAL 4,35
-------------------------	------------------

PENETRACIÓN NORMA UNE-EN 1426 Y PUNTO DE REBLANDECIMIENTO NORMA UNE-EN 1427 DEL LIGANTE RECUPERADO (UNE-EN 12697-1)

UNE - EN 1426

**DETERMINACIÓN DE LA PENETRACIÓN
CON AGUJA**

TIPO DE PENETRÓMETRO	AUTOMÁTICO	TIEMPO (s)	5
Carga (g)	100	T ^a (°C)	25
Nº Muestra	1	2	3
Penetración	7	5	5

PENETRACION	5,7	TOLERANCIA	2
--------------------	-----	-------------------	---

UNE - EN 1427

**DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE
REBLANDECIMIENTO
MÉTODO DEL ANILLO Y BOLA**

Nº Muestra	1	2
Temperatura	99,3	99,3

PUNTO ANILLO BOLA	99,3
--------------------------	------

NOTA: El agua ha llegado a hervir y las bolas han tardado bastante tiempo en caer.



APÉNDICE Nº 5 DEL ANEJO 1 CONTENIDO DE AGUA

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA POR SECADO EN ESTUFA NORMA UNE – EN 1097-5

N° REFERENCIA:	24050305
FECHA DE RECEPCIÓN:	03/05/24
NATURALEZA:	FRESADO TODO EN 1
PROCEDENCIA:	A-221 CASPE (ZARAGOZA)
LABORATORIO:	QUART DE POBLET (VALENCIA)

	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4	MEDIA
Recipiente	698,6	696,9	707,3	755,6	714,6
Recipiente + muestra ensayo húmeda	1764,6	1740,7	1979,8	1944,5	1857,4
Recipiente + muestra ensayo seca	1726,3	1700	1933	1900	1814,825
Recipiente + muestra ensayo seca 2ª pesada	1725,5	1699,3	1932,1	1899	1813,975
Diferencia pesadas	0,8	0,7	0,9	1	0,85
% Diferencia	0,078	0,070	0,073	0,087	0,077
Masa de agua	39,1	41,4	47,7	45,5	43,425
Masa de la muestra de ensayo seca	1026,9	1002,4	1224,8	1143,4	1099,375
CONTENIDO EN AGUA %	3,81	4,13	3,89	3,98	3,953

RESULTADO	3,95 %
------------------	---------------



APÉNDICE Nº 6 DEL ANEJO 1 DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD ÓPTIMA

DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD ÓPTIMA - PROCTOR MODIFICADO NTL 108/91

N° REFERENCIA:	24050305
FECHA DE RECEPCIÓN:	03/05/24
NATURALEZA:	FRESADO TODO EN 1
PROCEDENCIA:	A-221 CASPE (ZARAGOZA)
LABORATORIO:	QUART DE POBLET (VALENCIA)

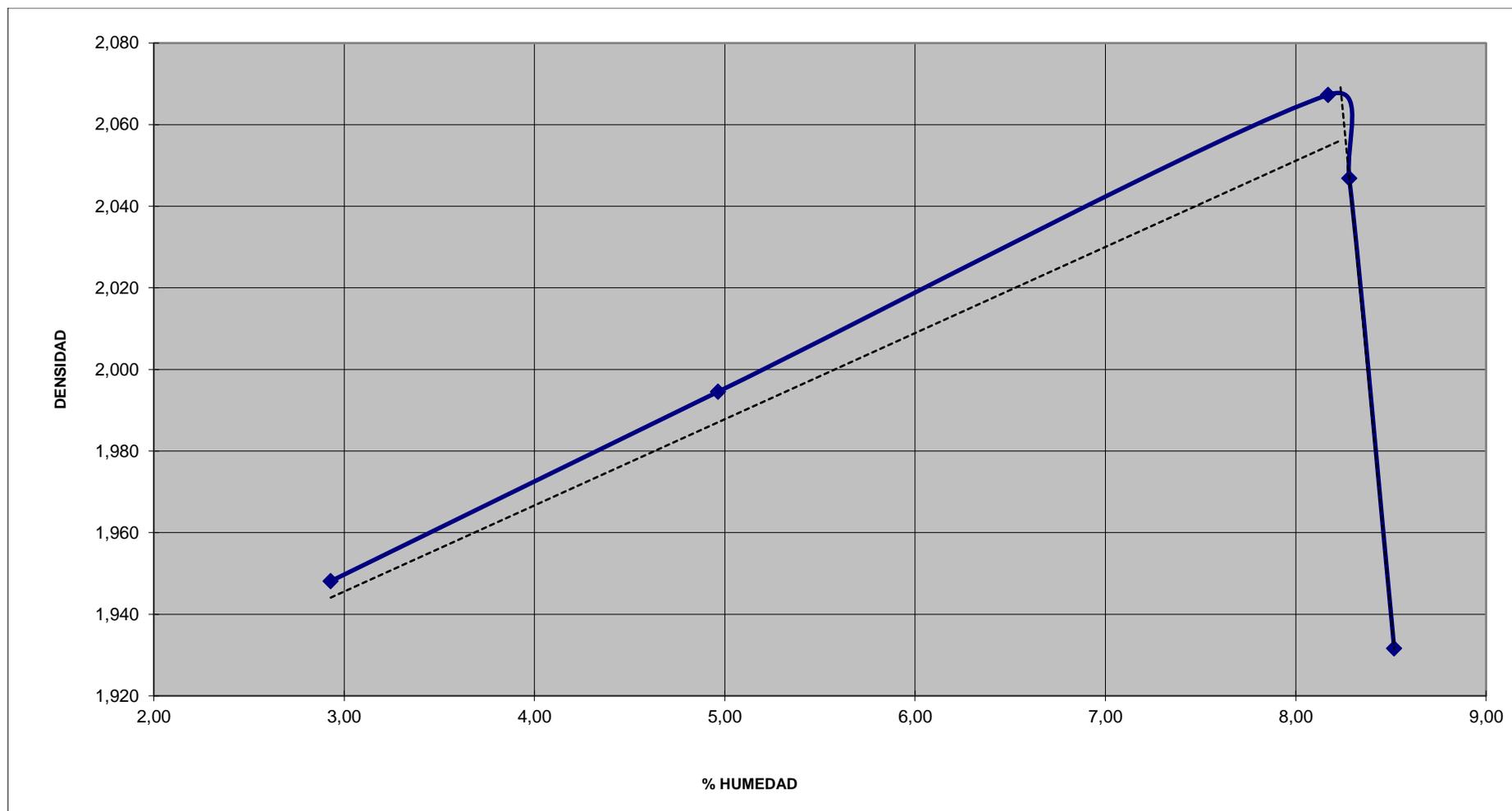
MÉTODO DE ENSAYO:	ENSAYO DE APISONADO DE PROCTOR
TIPO:	MODIFICADO

MOLDE: 2320	ALT. CAÍDA: 457	N° GOLPES: 5
MAZA: 4518	MOLDE: PROCTOR	N° GOLPES POR CAPA: 4518

-----	Punto n°	1	2	3	4	5
-----	% agua añadido	0	2	4	5	6
M+S+A	Molde+suelo+agua	10712	10917	10976	11202	10923
M	Molde	6060	6060	6060	6060	6060
S+A=(M+S+A)-M	Suelo+agua	4652	4857	4916	5142	4863
S=(S+A)100/100+h	Suelo	4520	4627	4622	4749	4481
D=S/V	DENSIDAD	1,948	1,995	1,992	2,047	1,932
-----	Ref. Tara	A	B	B	C	D
T+S+A	Tara+suelo+agua	602	789	659	971	712
T+S	Tara+suelo	587,4	755,8	625	903,7	665,3
T	Tara	89	87	91	91	117
S=(T+S)-T	Suelo	498,4	668,8	534	812,7	548,3
A=(T+S+A)-(T+S)	Agua	14,6	33,2	34	67,3	46,7
h=A100/S	% HUMEDAD	2,93	4,96	6,37	8,28	8,52

DENSIDAD MÁXIMA	2,067 t/m³
------------------------	------------------------------

HUMEDAD ÓPTIMA	8,20 %
-----------------------	---------------





ANEJO 2. ESTUDIO ESTRUCTURAL



APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 2 DEFLEXIONES

ENSAYO PARA LA MEDIDA DE LAS DEFLEXIONES EN FIRMES DE CARRETERA NORMA UNE-EN 41250-4

- CUADRO DE LOS TRAMOS ESTUDIADOS:

CARRETERA	TRAMO	CALZADA	CARRIL	P.K.INICIAL	P.K.FINAL	FECHA DE MEDICIÓN	LONGITUD MEDIDA
A-221	50A221012	0	1	48+900	52+065	45272	3165
A-221	50A221021	0	2	52+065	48+900	45272	3165

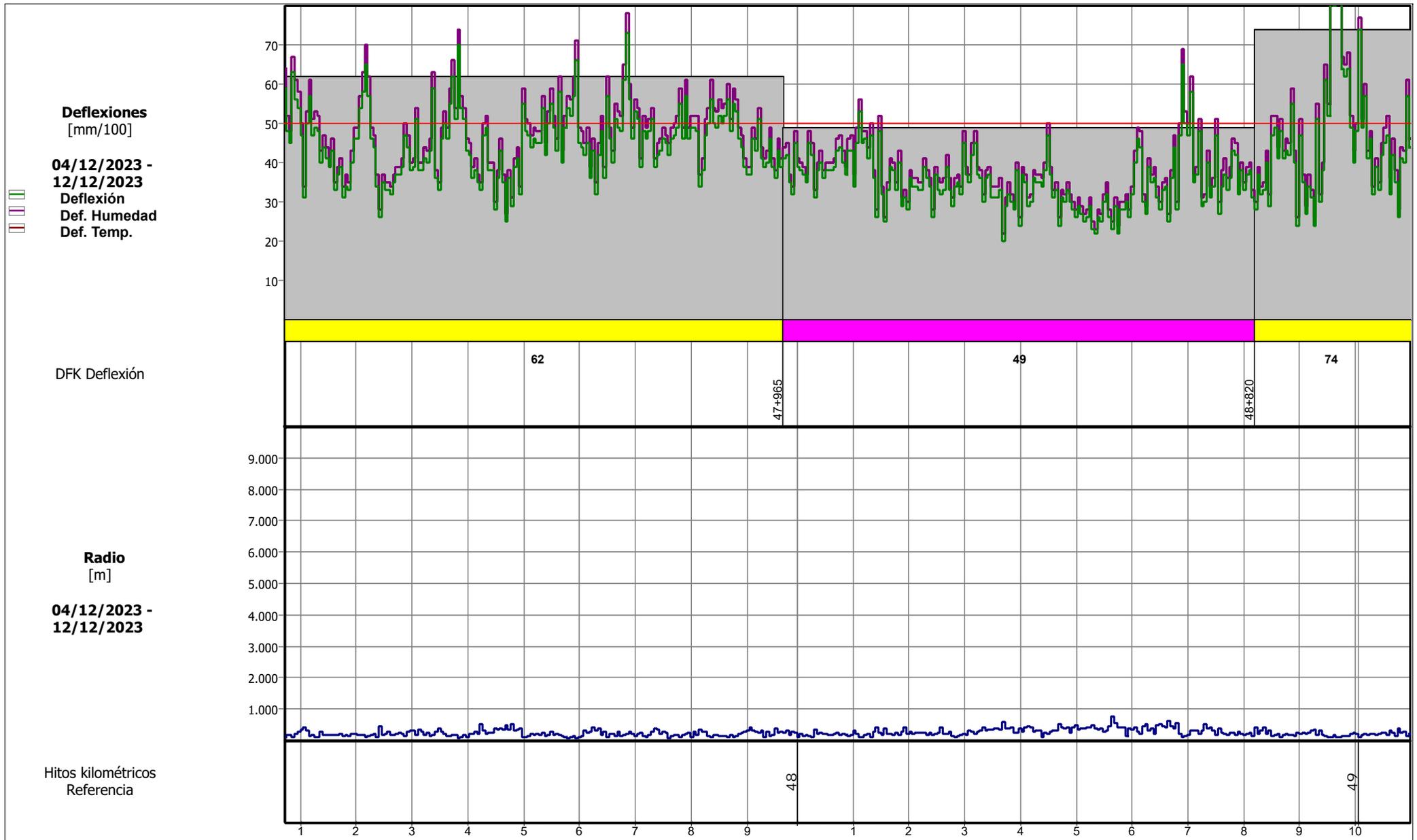
P.K.I.	P.K.F.	DIST. INI.	DIST. FIN.	LONGITUD	DFK	DESV	MEDIA	COEF. VARIACIÓN
48+820	49+210	21730	22125	395	74	13,6	46,8	0,3
49+210	49+815	22125	22730	605	53	7,8	37,4	0,2
49+815	50+455	22730	23370	640	61	8,3	44,8	0,2
50+455	50+660	23370	23575	205	44	6,1	31,8	0,2
50+660	51+045	23575	23960	385	68	11,4	45	0,3
51+045	51+260	23960	24175	215	54	8	38	0,2
51+260	51+870	24175	24785	610	47	10,8	25	0,4
51+870	52+420	24785	25345	560	60	10,7	38,3	0,3

P.K.I.	P.K.F.	DIST. INI.	DIST. FIN.	LONGITUD	DFK	DESV	MEDIA	COEF. VARIACIÓN
52+415	51+360	29680	30700	1020	42	7,5	27,1	0,3
51+360	50+360	30700	31700	1000	48	7,8	32,3	0,2
50+360	49+345	31700	32700	1000	48	7,2	33,2	0,2
49+345	48+345	32700	33700	1000	50	8,3	33,0	0,3

- GRÁFICOS DE DEFLEXIONES Y RADIOS DE CURVATURA:

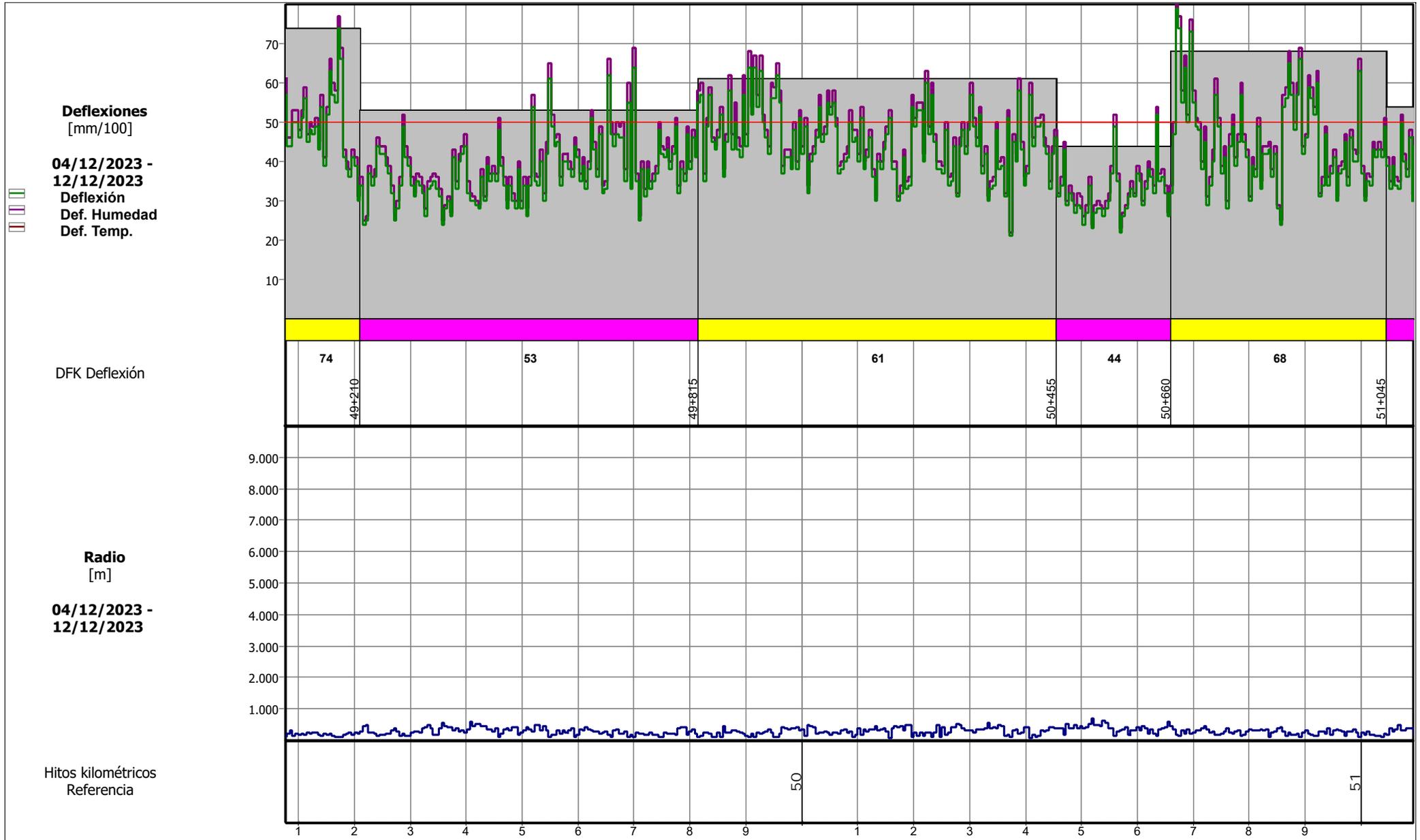
Gráficos de Deflexiones UNE 41250-4

Fecha: 04/12/23 - ZARAGOZA - Carretera: A-221 Calzada: 0 Carril: 1 Tramo: 50A221012



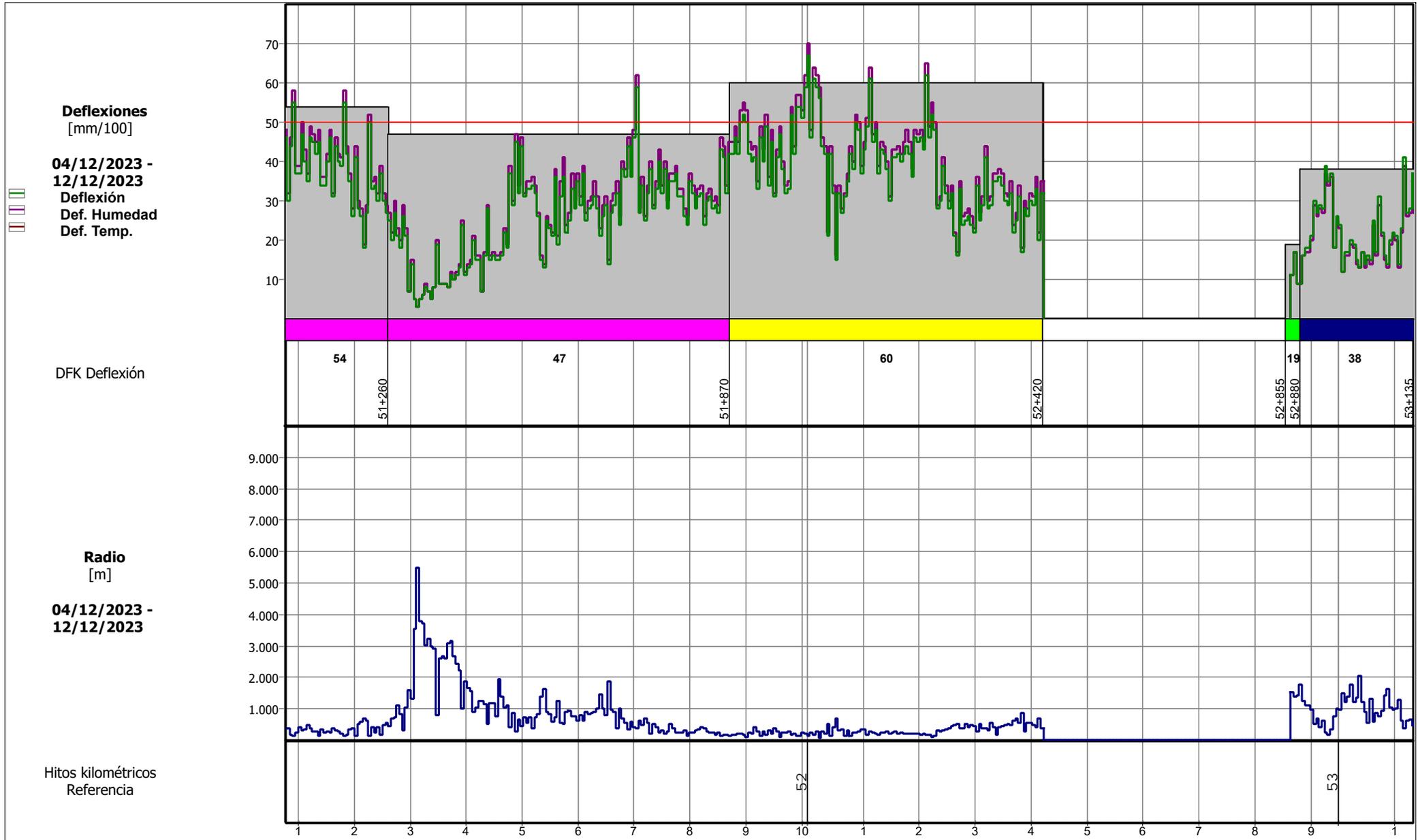
Gráficos de Deflexiones UNE 41250-4

Fecha: 04/12/23 - ZARAGOZA - Carretera: A-221 Calzada: 0 Carril: 1 Tramo: 50A221012



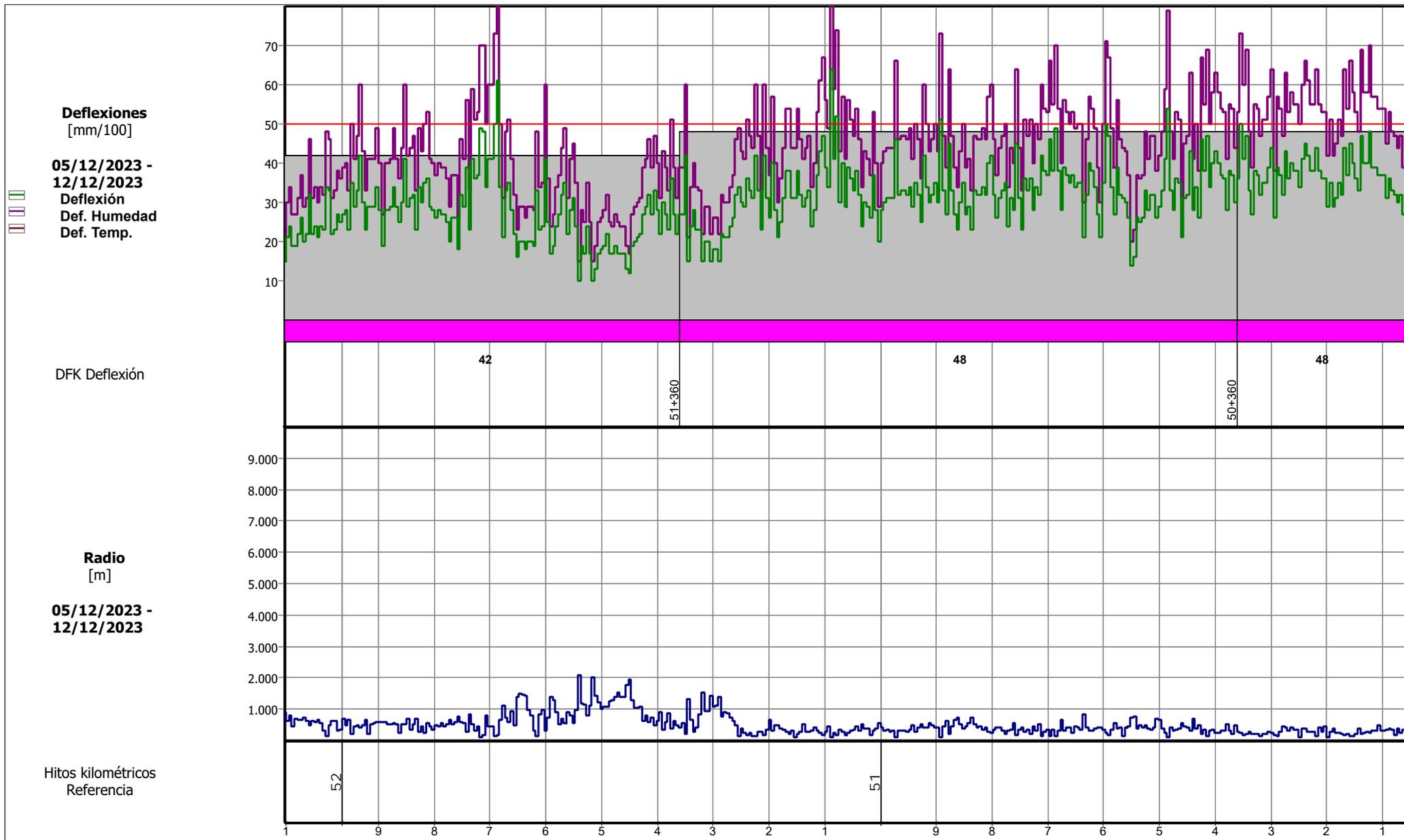
Gráficos de Deflexiones UNE 41250-4

Fecha: 04/12/23 - ZARAGOZA - Carretera: A-221 Calzada: 0 Carril: 1 Tramo: 50A221012



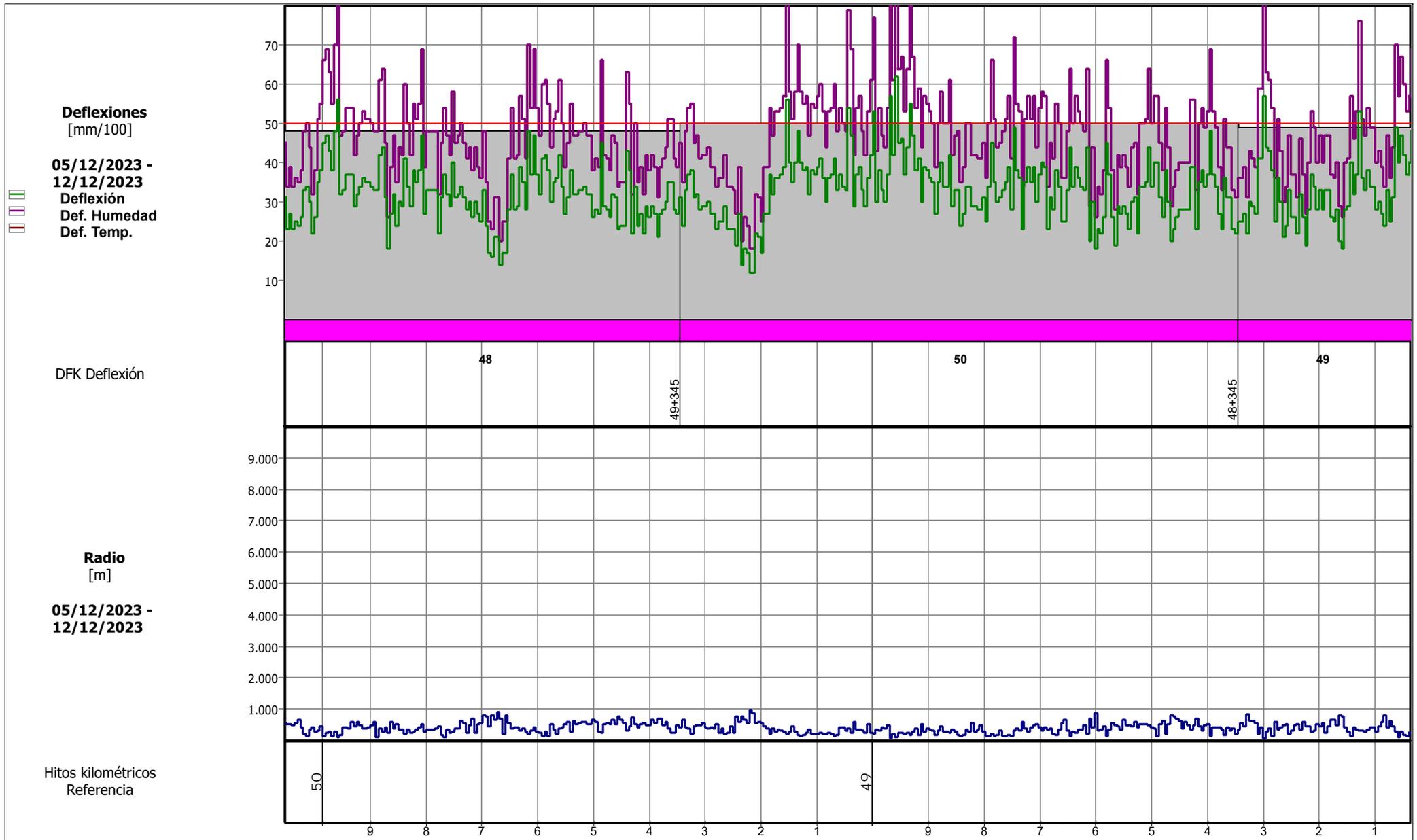
Gráficos de Deflexiones UNE 41250-4

Fecha: 05/12/23 - ZARAGOZA - Carretera: A-221 Calzada: 0 Carril: 2 Tramo: 50A221021



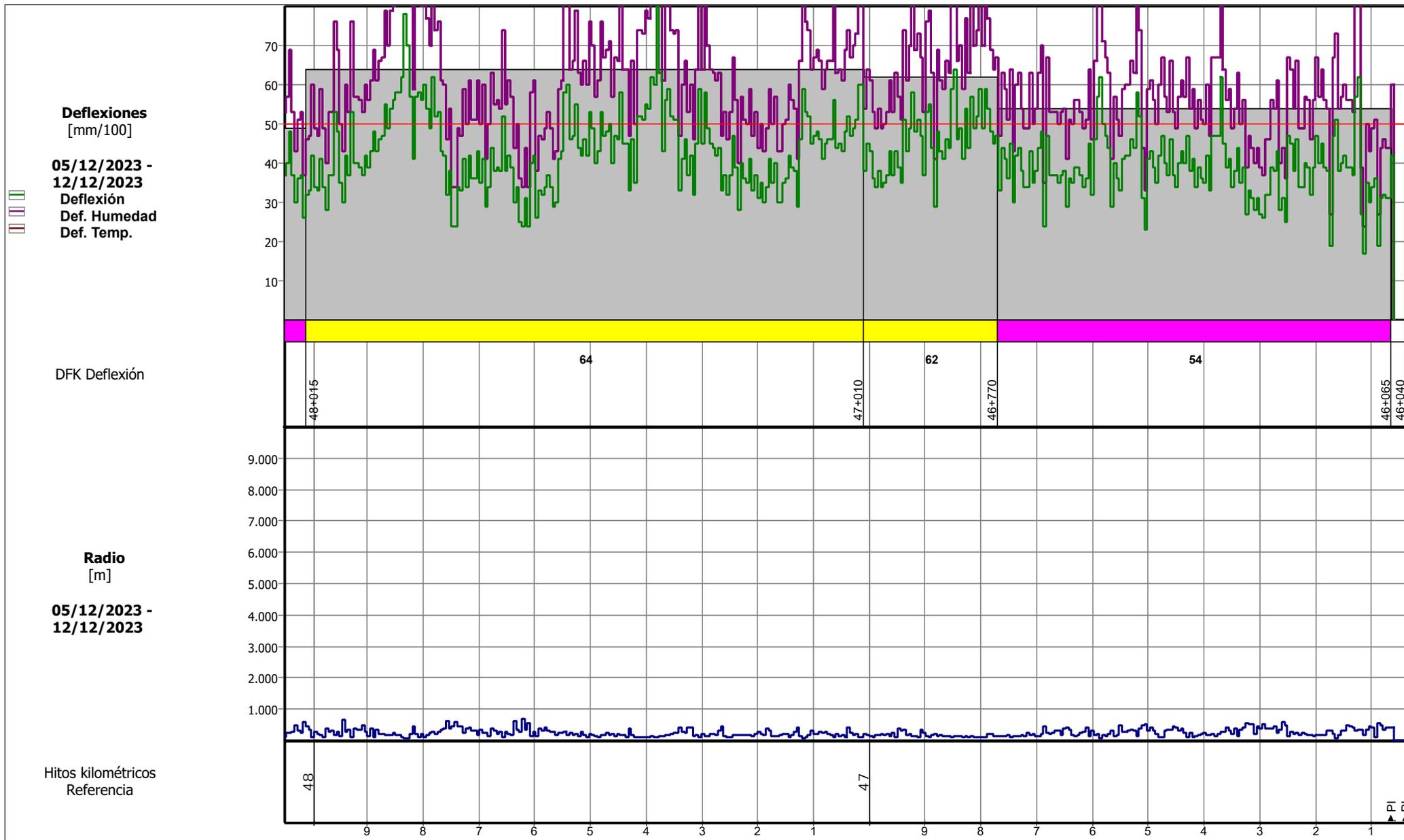
Gráficos de Deflexiones UNE 41250-4

Fecha: 05/12/23 - ZARAGOZA - Carretera: A-221 Calzada: 0 Carril: 2 Tramo: 50A221021



Gráficos de Deflexiones UNE 41250-4

Fecha: 05/12/23 - ZARAGOZA - Carretera: A-221 Calzada: 0 Carril: 2 Tramo: 50A221021





APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 2 IRI

ENSAYO NLT-330/98 "CÁLCULO DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI) EN PAVIMENTOS DE CARRETERAS"

- CUADRO DE LOS TRAMOS ESTUDIADOS:

CARRETERA	TRAMO	CAPA	CALZADA	CARRIL	P.K.Inicial	P.K.Final	FECHA DE MEDICIÓN	LONGITUD MEDIDA
A-221	50A221013	RODADURA	0	1	48+900	52+065	45272	3,165
A-221	50A221023		0	2	52+065	48+900	45272	3,165

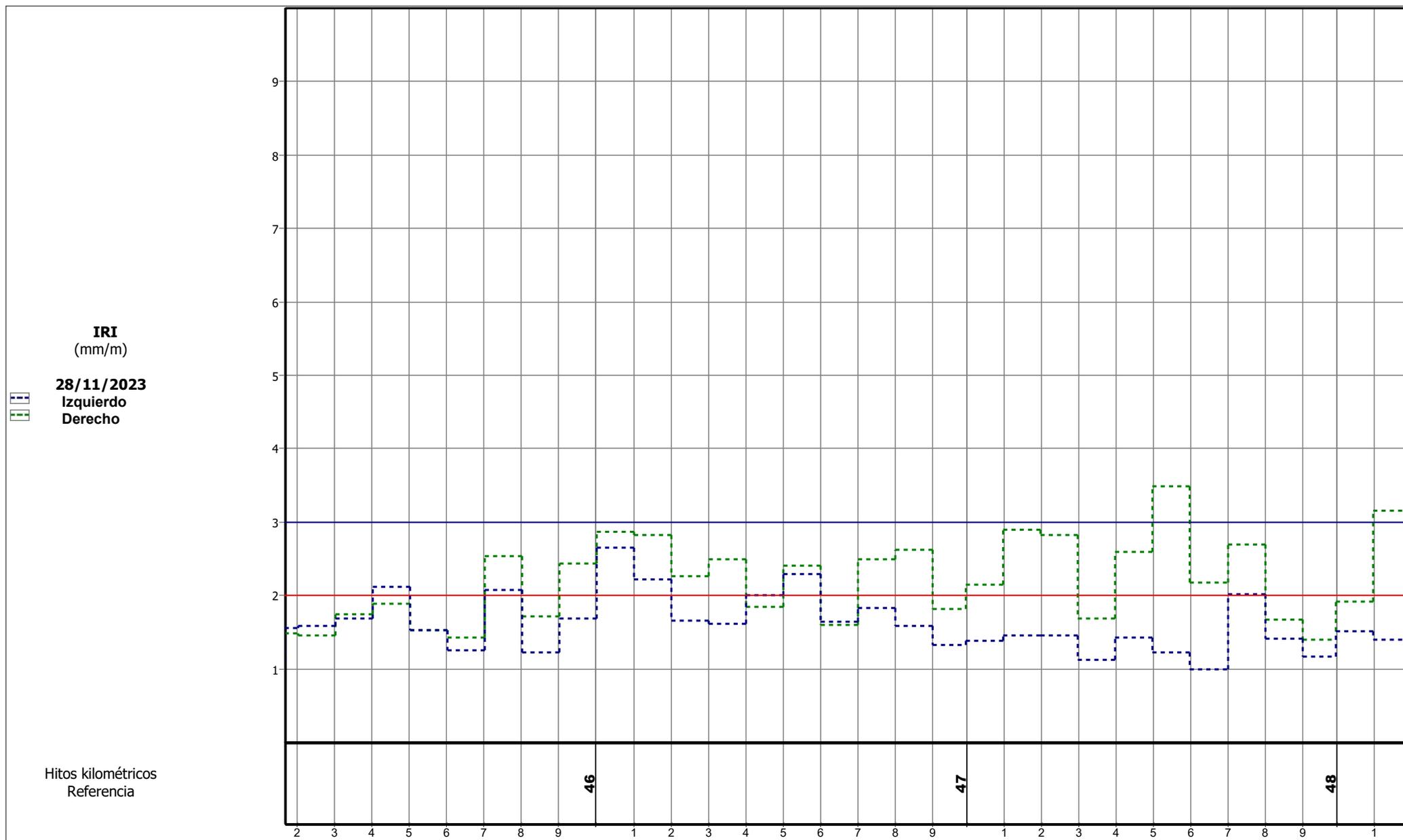
P.K.I.	IRI Derecho	IRI Izquierdo	IRI Máx.
52+000	2,38	1,56	2,38
51+900	2,61	1,70	2,61
51+800	3,59	2,18	3,59
51+700	4,31	2,54	4,31
51+600	3,11	2,13	3,11
51+500	3,15	2,40	3,15
51+400	3,85	2,89	3,85
51+300	4,1	3,45	4,10
51+200	3,72	3,07	3,72
51+100	3,82	3,00	3,82
51+000	2,72	2,57	2,72
50+900	2,18	2,29	2,29
50+800	3,04	2,17	3,04
50+700	2,64	2,02	2,64
50+600	2,62	2,16	2,62
50+500	3,93	2,56	3,93

P.K.I.	IRI Derecho	IRI Izquierdo	IRI Máx.
50+400	3,06	2,39	3,06
50+300	3,24	1,82	3,24
50+200	2,98	2,39	2,98
50+100	3,31	2,50	3,31
50+000	3,09	2,10	3,09
49+900	3,28	1,48	3,28
49+800	3,02	1,46	3,02
49+700	4,12	2,34	4,12
49+600	2,88	1,50	2,88
49+500	2,23	1,41	2,23
49+400	2,93	1,95	2,93
49+300	2,64	2,00	2,64
49+200	3,57	1,97	3,57
49+100	3,69	1,60	3,69
49+000	3,7	2,69	3,70
48+900	2,47	2,49	2,49

- GRÁFICOS DE REGULARIDAD SUPERFICIAL:

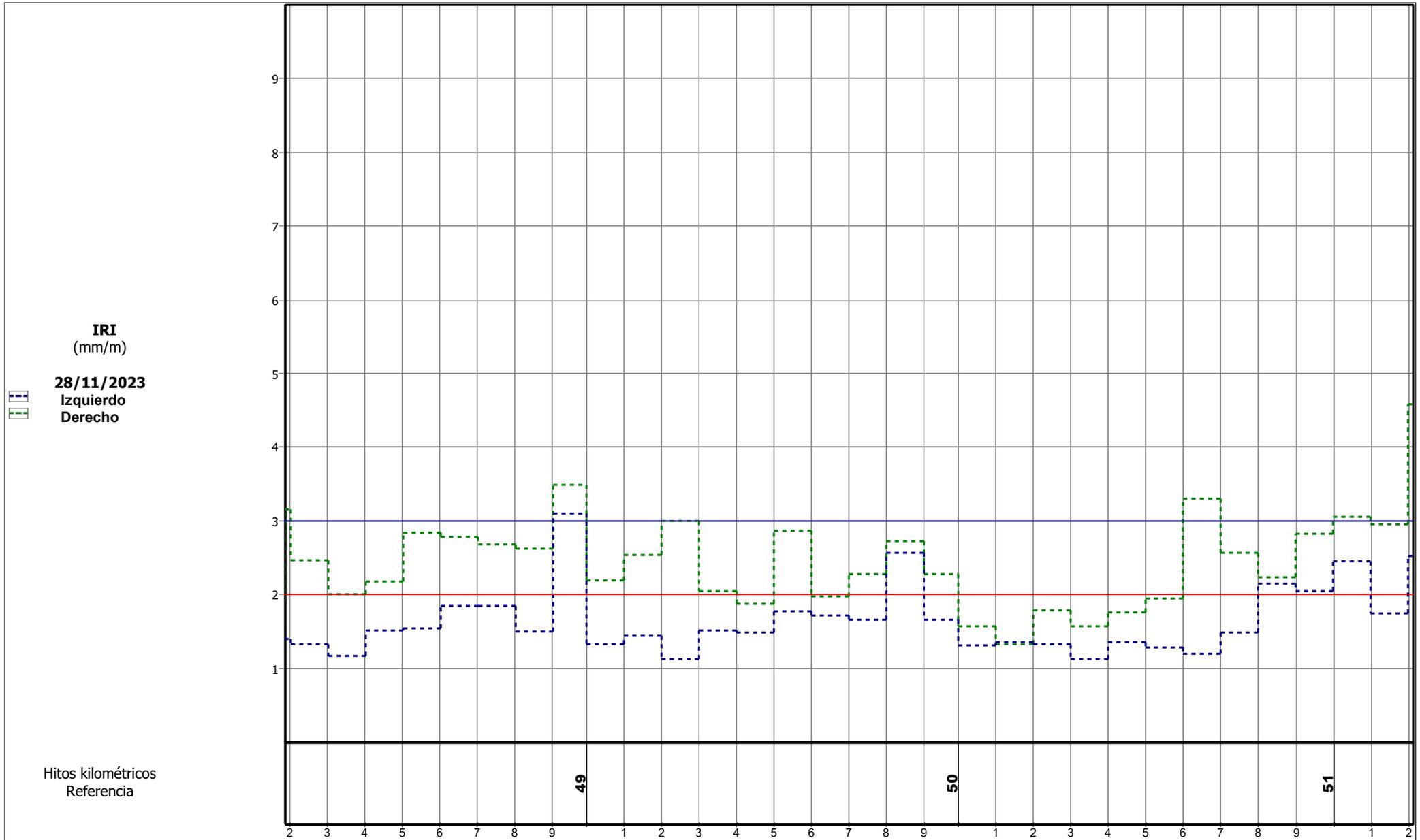
Gráficos de Regularidad Superficial (100 m)

Fecha: 28/11/23 - ZARAGOZA - Carretera: A-221 Calzada: 0 Carril: 1 Tramo: 50A221013



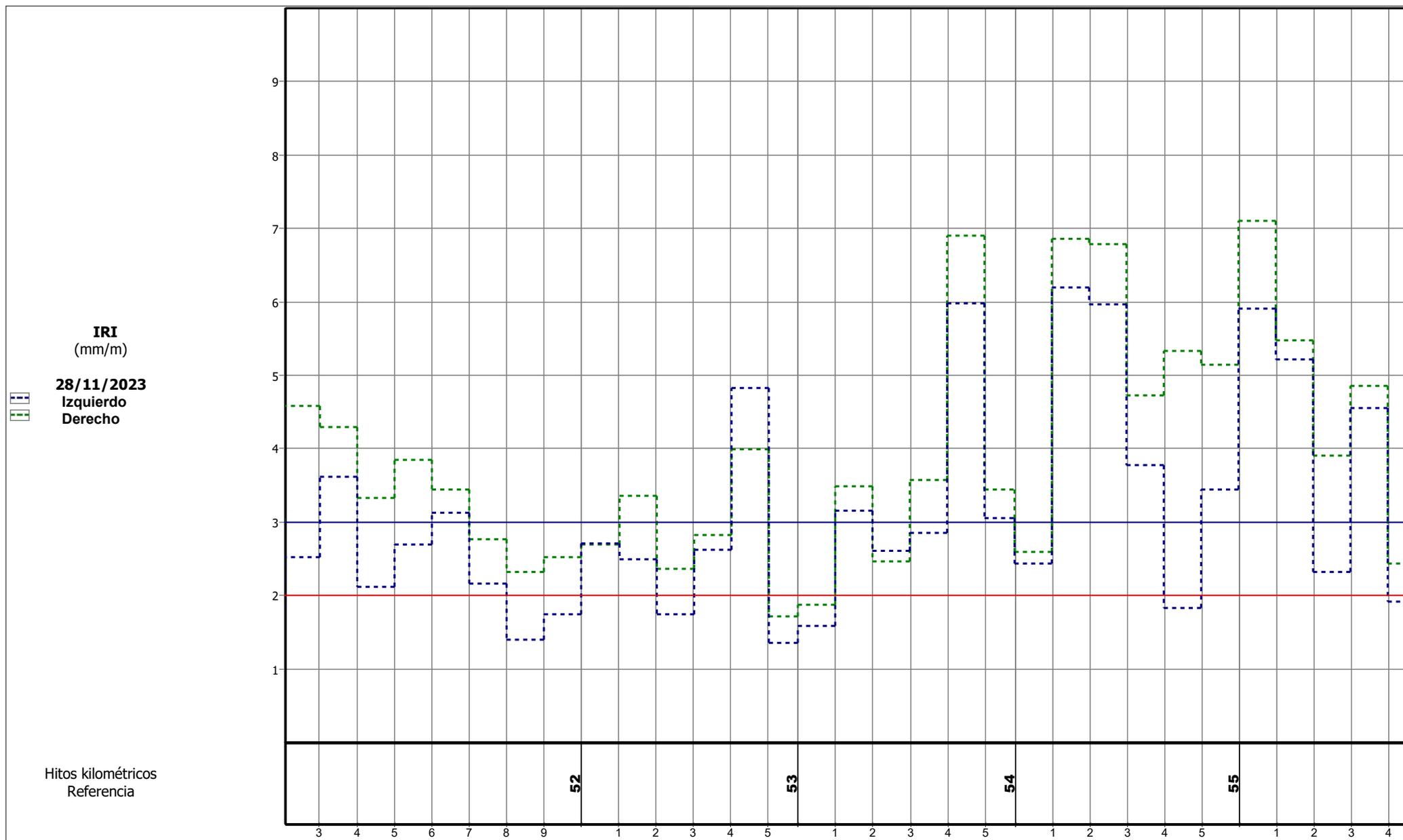
Gráficos de Regularidad Superficial (100 m)

Fecha: 28/11/23 - ZARAGOZA - Carretera: A-221 Calzada: 0 Carril: 1 Tramo: 50A221013



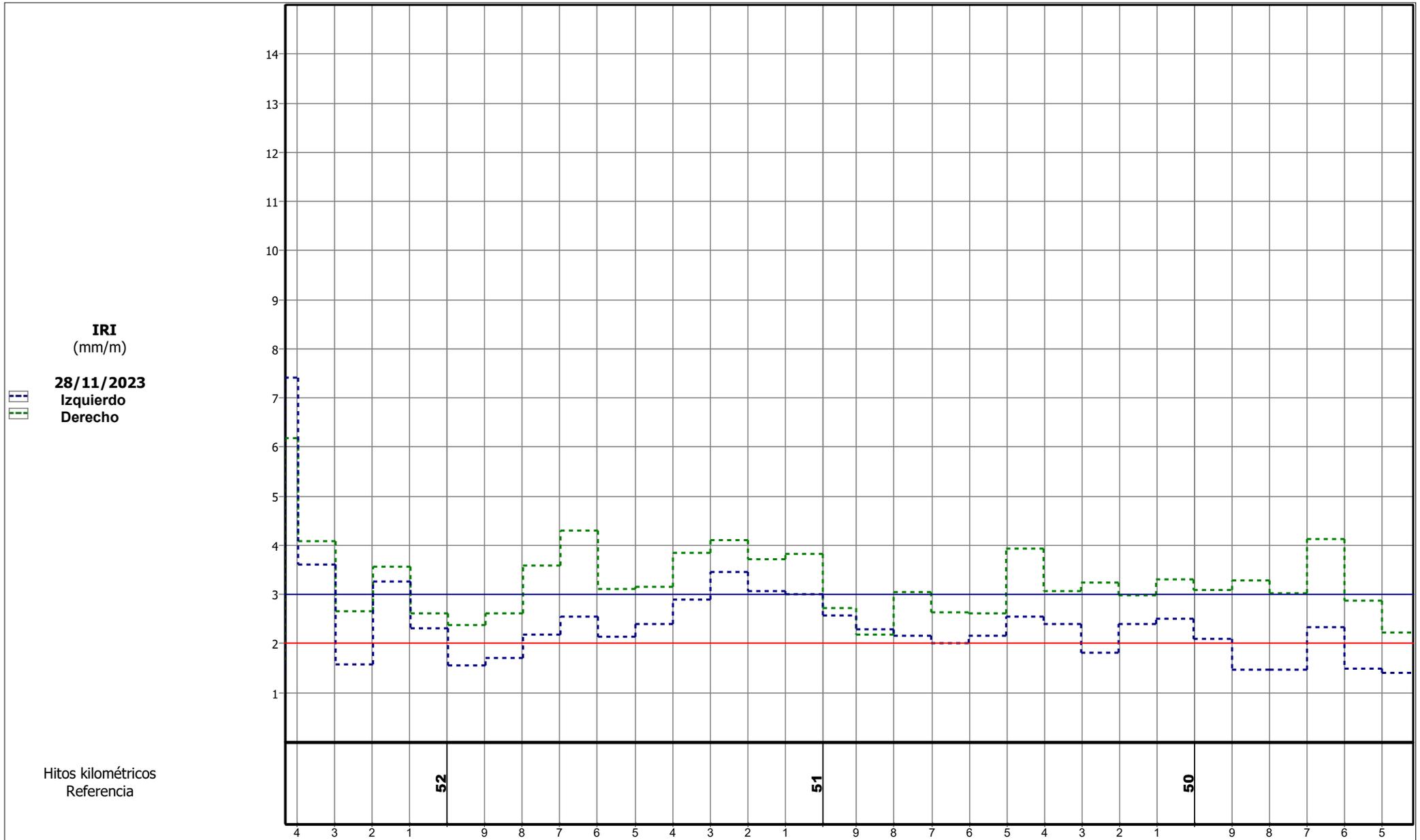
Gráficos de Regularidad Superficial (100 m)

Fecha: 28/11/23 - ZARAGOZA - Carretera: A-221 Calzada: 0 Carril: 1 Tramo: 50A221013



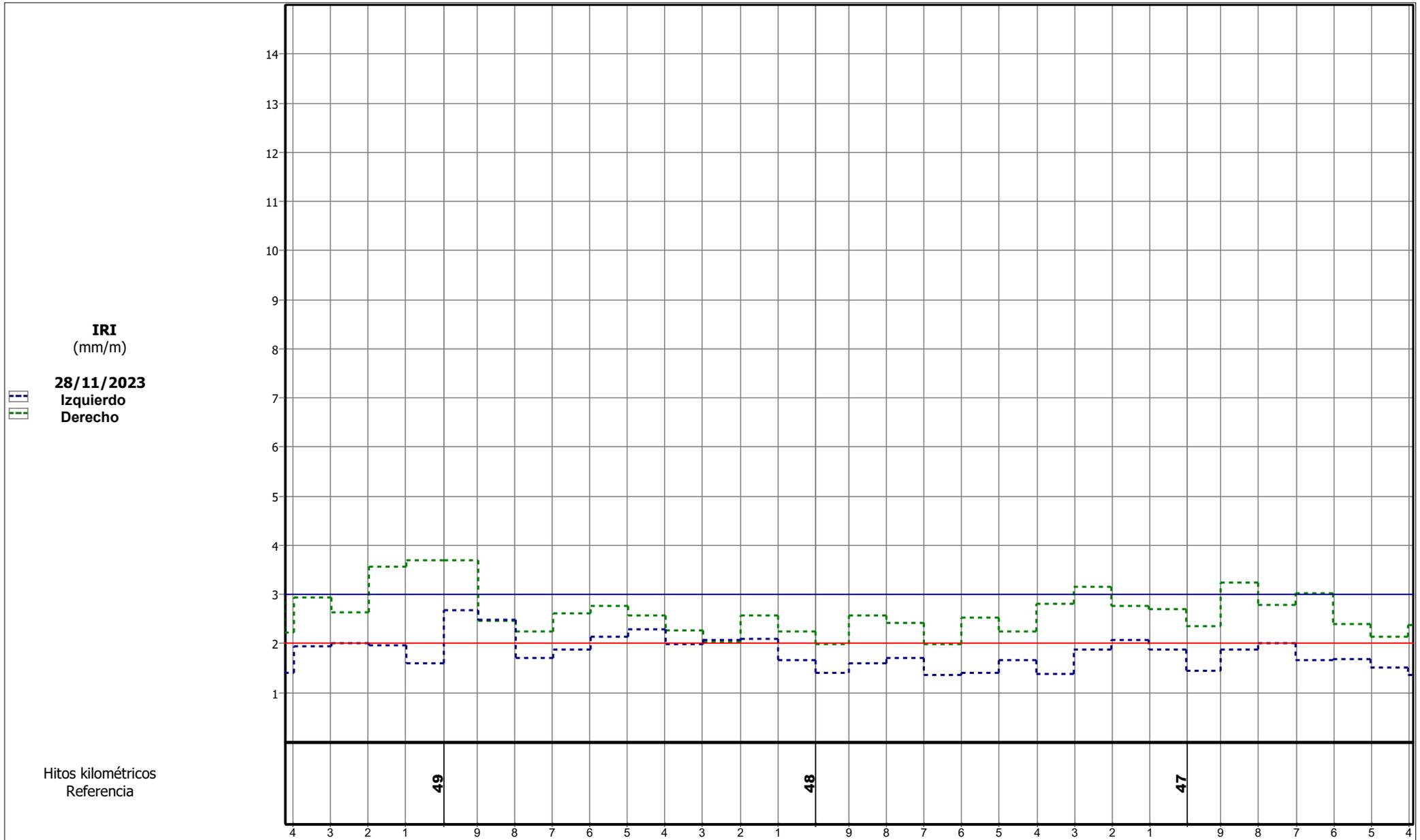
Gráficos de Regularidad Superficial (100 m)

Fecha: 28/11/23 - ZARAGOZA - Carretera: A-221 Calzada: 0 Carril: 2 Tramo: 50A221023



Gráficos de Regularidad Superficial (100 m)

Fecha: 28/11/23 - ZARAGOZA - Carretera: A-221 Calzada: 0 Carril: 2 Tramo: 50A221023





APÉNDICE Nº 3 DEL ANEJO 2 DIAGNÓSTICO PRELIMINAR Y TRAMIFICACIÓN

DIAGNÓSTICO SOBRE EL ESTADO DEL FIRME Y DEFINICIÓN TRAMOS HOMOGÉNEOS

SUBTRAMOS	P.K.I.	P.K.F.	LONGITUD	TIPO DE RELIEVE	DFK Máx.		IRI Máx.	TIPO DE DETERIOROS	DIAGNÓSTICO PRELIMINAR
					CARRIL DERECHO	CARRIL IZQUIERDO			
1	48+900	49+900	1000	Ondulado	74	50	4,12	GB, GL - GT, H, A, D	Combinación de eliminación parcial y reposición del firme existente, y recrecido.
2	49+900	50+600	700	Llano	61	48	3,93	GB, GL - GT, H	Combinación de eliminación parcial y reposición del firme existente, y recrecido incrementando el bombeo.
3	50+600	50+900	300	Ondulado	68	48	3,04	GB, GL - GT	Combinación de eliminación parcial y reposición del firme existente, y recrecido.
4*	50+900	51+100	200	Llano	54	48	3,82	GL - GT, A	Combinación de eliminación parcial y reposición del firme existente, y recrecido incrementando el bombeo.
5*	51+100	51+865	765	Ondulado	47	42	4,31	GB, GL - GT, H, A - GC	Combinación de eliminación parcial y reposición del firme existente, y recrecido.
6*	51+865	52+065	200	Llano	60	42	2,61	GL, H	Combinación de eliminación parcial y reposición del firme existente, y recrecido incrementando el bombeo.

DFK: ■ 0-20 ■ 20-40 ■ 40-60 ■ 60-80 ■ 80-100 ■ 100-125 ■ >125 | IRI: ■ <1,5 ■ 1,5-2 ■ 2-2,5 ■ 2,5-3 ■ 3-4 ■ >4

* Tramos con alta concentración de accidentes.



ANEJO 3. ENSAYOS DE LABORATORIO



APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 3 SENSIBILIDAD AL AGUA Y DENSIDADES

**RESULTADOS DEL ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD AL AGUA DE MEZCLAS
BITUMINOSAS RECICLADAS EN FRÍO CON EMULSIÓN BITUMINOSA NORMA UNE 41215**

TABLA 13. RESULTADOS RELACIÓN DE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN, i/C (%). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

i/C (%)	2,75%	3,50%	4%	6%
160/220	72,8	69,1	75,6	93,0
70 /100 2% s/e	71,7	75	80,1	89,1
35/50 4,2% s/e	62,8	76,8	70,1	86,1
35/50 2,4% s/e	70,1	74,4	74,1	92,2

TABLA 14. RESULTADOS RESISTENCIA HÚMEDA, CW (KPA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

RESISTENCIA HÚMEDA (Kpa)	2,75%	3,50%	4%	6%
160/220	1,58	1,66	1,67	1,70
70 /100 2% s/e	2,11	2,03	2,05	1,92
35/50 4,2% s/e	2,17	2,14	1,72	2,03
35/50 2,4% s/e	2,13	1,99	1,73	2,27

TABLA 15. RESULTADOS RESISTENCIA SECA (KPA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

RESISTENCIA EN SECO (KPa)	2,75%	3,50%	4%	6%
160/220	2,17	2,40	2,22	1,83
70/100 2% s/e	2,94	2,70	2,56	2,16
35/50 4,2% s/e	3,46	2,79	2,50	2,36
35/50 2,4% s/e	3,04	2,68	2,33	2,47

**DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE DE PROBETAS BITUMINOSAS NORMA UNE -
EN 12697-6**

TABLA 16. RESULTADOS DENSIDAD SECA (T/M³). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

DENSIDAD SECA	2,75%	3,50%	4%	6%
160/220	2,185	2,218	2,213	2,237
70/100 2% s/e	2,184	2,209	2,229	2,245
35/50 4,2% s/e	2,182	2,221	2,236	2,292
35/50 2,4% s/e	2,214	2,2	2,265	2,271

TABLA 17. RESULTADOS DENSIDAD HÚMEDA (T/M³). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

DENSIDAD HÚMEDA	2,75%	3,50%	4%	6%
160/220	2,189	2,196	2,225	2,235
70/100 2% s/e	2,188	2,212	2,242	2,223
35/50 4,2% s/e	2,185	2,219	2,231	2,290
35/50 2,4% s/e	2,216	2,218	2,246	2,269



APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 3 MÓDULO RESILIENTE A LA TRACCIÓN INDIRECTA

RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA SOBRE PROBETAS CILÍNDRICAS

SIGUIENDO LA NORMA UNE-EN 12697-26

COMPACTADAS POR GIRATORIA						
4 % s/m			(14/03/24)			
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #fff9c4;"> A 7 DÍAS (21/03/24) F. inicial 200 Mpa. </div>						
160/220	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º (Mpa)	MÓDULO A 90º (Mpa)	MÓDULO (Mpa)	
	248	2,14	922	950	936	3,0%
	249	2,14	1058	837	947,5	-20,9%
	250	2,08	844	933	888,5	10,5%
	251	2,13	984	989	986,5	0,5%
		2,121			939,6	
70/100	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º (Mpa)	MÓDULO A 90º (Mpa)	MÓDULO (Mpa)	
	252	2,11	1157	1139	1148	-1,6%
	253	2,12	1107	1004	1055,5	-9,3%
	254	2,09	853	865	859	1,4%
	255	2,11	1119	863	991	-22,9%
		2,108			1013,4	
35/50 (2,4% s/e)	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º (Mpa)	MÓDULO A 90º (Mpa)	MÓDULO (Mpa)	
	256	2,11	1141	1115	1128	-2,3%
	257	2,15	1229	1257	1243	2,3%
	258	2,14	1068	1170	1119	9,6%
	259	2,11	1205	1207	1206	0,2%
		2,126			1174,0	
35/50 (4,2% s/e)	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º (Mpa)	MÓDULO A 90º (Mpa)	MÓDULO (Mpa)	
	260	2,15	1223	1193	1208	-2,5%
	261	2,11	953	1213	1083	27,3%
	262	2,09	982	1032	1007	5,1%
	263	2,14	1182	1154	1168	-2,4%
		2,122			1116,5	

COMPACTADAS POR GIRATORIA
4 % s/m

(14/03/24)

A 12 DÍAS (26/03/24)

F. inicial 500 Mpa.

	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º	MÓDULO A 90º	MÓDULO	
			(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	
160/220	248	2,13	1295	1177	1236	-9,1%
	249	2,13	1354	1315	1334,5	-2,9%
	250	2,07	1008	1064	1036	5,6%
	251	2,13	1403	1414	1408,5	0,8%
			2,113			1253,8
70/100	252	2,11	1416	1466	1441	3,5%
	253	2,11	1305	1143	1224	-12,4%
	254	2,08	1196	1318	1257	10,2%
	255	2,10	1640	1717	1678,5	4,7%
			2,100			1400,1
35/50 (2,4% s/e)	256	2,11	1625	1535	1580	-5,5%
	257	2,14	1729	1669	1699	-3,5%
	258	2,13	1603	1361	1482	-15,1%
	259	2,10	1387	1453	1420	4,8%
			2,117			1545,3
35/50 (4,2% s/e)	260	2,14	1457	1366	1411,5	-6,2%
	261	2,11	1452	ROTA	1452	ROTA
	262	2,10	1373	1215	1294	-11,5%
	263	2,12	1386	1314	1350	-5,2%
			2,117			1376,9

COMPACTADAS POR GIRATORIA
4 % s/m

(14/03/24)

A 20 DÍAS (03/04/24)

F. inicial 1000 Mpa.

	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º	MÓDULO A 90º	MÓDULO	
			(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	
160/220	248	2,13	1722	1719	1720,5	-0,2%
	249	2,12	1759	1844	1801,5	4,8%
	250	2,07	1447	1325	1386	-0,1
	251	2,12	1870	1634	1752	-12,6%
			2,110		1758,0	28,7%
70/100	252	2,10	1893	1888	1890,5	-0,3%
	253	2,11	2091	2002	2046,5	-4,3%
	254	2,09	1692	1650	1671	-2,5%
	255	2,10	2301	2232	2266,5	-3,0%
			2,098		1968,6	28,9%
35/50 (2,4% s/e)	256	2,10	2206	2140	2173	-3,0%
	257	2,14	2311	2239	2275	-3,1%
	258	2,12	2206	2104	2155	-4,6%
	259	2,10	2149	2031	2090	-5,5%
			2,115		2173,3	28,9%
35/50 (4,2% s/e)	260	2,14	2305	2212	2258,5	-4,0%
	261	ROTA	ROTA	ROTA	ROTA	ROTA
	262	2,09	2715	2170	2442,5	-20,1%
	263	2,12	2093	2265	2179	8,2%
			2,114		2218,8	37,9%

COMPACTADAS POR GIRATORIA
4 % s/m

(14/03/24)

A 34 DÍAS (17/04/24)

F. inicial 2000 Mpa.

	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º	MÓDULO A 90º	MÓDULO	
			(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	
160/220	248	2,11	1816	2019	1917,5	11,2%
	249	2,12	2445	2330	2387,5	-4,7%
	250	2,07	1679	1439	1559	-0,1
	251	2,12	2088	2206	2147	5,7%
			2,103		2150,7	18,3%
70/100	252	ROTA	ROTA	ROTA	ROTA	ROTA
	253	2,10	2286	2258	2272	-1,2%
	254	2,07	1947	1894	1920,5	-2,7%
	255	2,08	2675	2622	2622	-2,0%
			2,082		2271,5	13,3%
35/50 (2,4% s/e)	256	2,10	2392	2302	2347	-3,8%
	257	2,12	3017	3136	3136	3,9%
	258	2,12	2715	2927	2821	7,8%
	259	2,09	2688	2585	2636,5	-3,8%
			2,108		2735,1	20,5%
35/50 (4,2% s/e)	260	2,13	2407	2723	2565	13,1%
	261	ROTA	ROTA	ROTA	ROTA	ROTA
	262	2,09	2495	2323	2409	-6,9%
	263	2,12	2870	2628	2749	-8,4%
			2,113		2574,3	13,8%

COMPACTADAS POR GIRATORIA
4 % s/m

(14/03/24)

A 64 DÍAS (14/05/24)

F. inicial 2500 Mpa.

	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º	MÓDULO A 90º	MÓDULO	
			(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	
160/220	248	2,11	2815	2440	2627,5	-13,3%
	249	2,12	2536	2542	2539	0,2%
	250	2,07	1538	1426	1482	-0,1%
	251	2,12	2501	2445	2473	-2,2%
			2,103		2546,5	15,5%
70/100	252	ROTA	ROTA	ROTA	ROTA	ROTA
	253	2,10	2684	2521	2602,5	-6,1%
	254	2,07	2030	2242	2136	10,4%
	255	2,08	2936	2638	2787	-10,1%
			2,082		2508,5	9,4%
35/50 (2,4% s/e)	256	2,10	2528	2506	2517	-0,9%
	257	2,12	3248	3330	3289	2,5%
	258	2,12	2967	2933	2950	-1,1%
	259	2,09	2203	2740	2471,5	24,4%
			2,108		2806,9	2,6%
35/50 (4,2% s/e)	260	2,13	3206	3295	3250,5	2,8%
	261	ROTA	ROTA	ROTA	ROTA	ROTA
	262	2,09	2652	2467	2559,5	-7,0%
	263	2,12	3109	2840	2974,5	-8,7%
			2,113		2928,2	12,1%

COMPACTADAS POR GIRATORIA
3,5 % s/m

(15/03/24)

A 7 DÍAS (22/03/24)

F. inicial 200 Mpa.

	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º	MÓDULO A 90º	MÓDULO	
			(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	
160/220	264	2,08	844	838	841	-0,7%
	265	2,07	1010	952	981	-5,7%
	266	2,08	811	656	733,5	-19,1%
	267	2,09	890	871	880,5	-2,1%
			2,080			859,0
70/100	268	2,10	800	737	768,5	-7,9%
	269	2,08	632	750	691	18,7%
	270	2,08	837	868	852,5	3,7%
	271	2,08	842	946	894	12,4%
			2,086			801,5
35/50 (4,2% s/e)	272	2,10	894	841	867,5	-5,9%
	273	2,08	833	842	837,5	1,1%
	274	2,12	915	944	929,5	3,2%
	275	2,10	941	802	871,5	-14,8%
			2,103			876,5
35/50 (2,4% s/e)	276	2,09	868	811	839,5	-6,6%
	277	2,10	894	895	894,5	0,1%
	278	2,10	978	959	968,5	-1,9%
	279	2,09	957	841	899	-12,1%
			2,098			900,4

COMPACTADAS POR GIRATORIA
3,5 % s/m

(15/03/24)

A 12 DÍAS (27/03/24)

F. inicial 500 Mpa.

	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º	MÓDULO A 90º	MÓDULO	
			(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	
160/220	264	2,07	1164	1103	1133,5	-5,2%
	265	2,07	1254	1300	1277	3,7%
	266	2,07	1191	1086	1138,5	-8,8%
	267	2,09	1167	1093	1130	-6,3%
			2,076			1169,8
70/100	268	2,09	1038	1160	1099	11,8%
	269	2,07	1067	1083	1075	1,5%
	270	2,07	1201	1119	1160	-6,8%
	271	2,07	1164	1291	1227,5	10,9%
			2,076			1140,4
35/50 (4,2% s/e)	272	2,09	1305	1271	1288	-2,6%
	273	2,07	1115	1127	1121	1,1%
	274	2,11	1394	1307	1350,5	-6,2%
	275	2,09	1353	1258	1305,5	-7,0%
			2,092			1266,3
35/50 (2,4% s/e)	276	2,08	1219	1156	1187,5	-5,2%
	277	2,09	1302	1197	1249,5	-8,1%
	278	2,08	1384	1285	1334,5	-7,2%
	279	2,09	1273	1046	1159,5	-17,8%
			2,086			1232,8

COMPACTADAS POR GIRATORIA
3,5 % s/m

(15/03/24)

A 20 DÍAS (04/04/24)

F. inicial 1000 Mpa.

160/220	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º (Mpa)	MÓDULO A 90º (Mpa)	MÓDULO (Mpa)	
	264	2,07	1543	1656	1599,5	7,3%
	265	2,07	2005	1858	1931,5	-7,3%
	266	2,07	1499	1515	1507	1,1%
	267	2,09	1495	1613	1554	7,9%
		2,072			1648,0	29,0%

70/100	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º (Mpa)	MÓDULO A 90º (Mpa)	MÓDULO (Mpa)	
	268	2,09	1751	1598	1674,5	-8,7%
	269	2,06	1643	1643	1643	0,0%
	270	2,07	1996	1640	1818	-17,8%
	271	2,07	1784	1678	1731	-5,9%
		2,072			1716,6	33,6%

35/50 (4,2% s/e)	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º (Mpa)	MÓDULO A 90º (Mpa)	MÓDULO (Mpa)	
	272	2,08	1912	1931	1921,5	1,0%
	273	2,07	1568	1705	1636,5	8,7%
	274	2,10	2112	2006	2059	-5,0%
	275	2,09	2031	1946	1988,5	-4,2%
		2,086			1901,4	33,4%

35/50 (2,4% s/e)	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º (Mpa)	MÓDULO A 90º (Mpa)	MÓDULO (Mpa)	
	276	2,08	1666	1508	1587	-9,5%
	277	2,09	2041	1834	1937,5	-10,1%
	278	2,09	1894	1898	1896	0,2%
	279	2,08	1845	1670	1757,5	-9,5%
		2,082			1794,5	31,3%

COMPACTADAS POR GIRATORIA
3,5 % s/m

(15/03/24)

A 64 DÍAS (15/05/24)

F. inicial 2500 Mpa.

	Nº PROB	Densidad	MÓDULO A 0º	MÓDULO A 90º	MÓDULO	
			(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	
160/220	264	2,06	1702	1679	1690,5	-1,4%
	265	2,07	1682	2068	1875	22,9%
	266	2,06	1792	1638	1715	-8,6%
	267	2,08	1924	1882	1903	-2,2%
			2,068			1795,9
70/100	268	2,08	2213	2166	2189,5	-2,1%
	269	2,06	1671	1680	1675,5	0,5%
	270	2,06	1926	2008	1967	4,3%
	271	2,06	1986	2028	2007	2,1%
			2,067			1959,8
35/50 (4,2% s/e)	272	2,08	2144	2061	2102,5	-3,9%
	273	2,06	1959	2015	1987	2,9%
	274	2,09	2349	2431	2390	3,5%
	275	2,08	2344	2395	2369,5	2,2%
			2,076			2212,3
35/50 (2,4% s/e)	276	2,07	1893	1769	1831	-6,6%
	277	2,08	2107	2430	2268,5	15,3%
	278	2,08	2524	2495	2509,5	-1,1%
	279	2,07	2001	1902	1951,5	-4,9%
			2,076			2140,1



ANEJO 4. EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL



APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 4 DEFINICIÓN DE LAS SOLUCIONES

SOLUCIÓN DE RECICLADO EN FRÍO "IN SITU" CON EMULSIÓN BITUMINOSA III

Tipo	Descripción	Fuente de datos	Cantidad	Unidad	Modo de transporte	Energía	Densidad de transporte
Producto entrante	Mezcla bituminosa en caliente para capa de rodadura	AC 16 SURF S	3489.41	t	Transporte con semi 40t, CU 28t	Diesel	28 km
Máquina	Compactador rodillo neumático de 27 Tn sin vibración adicional	CO300	7	Días	-	-	-
Máquina	Compactador tándem vibratorio de 12 Tn adicional	CO200	7	Días	-	-	-
Máquina	Extendedora (20 a 25t) adicional	FI300	7	Días	-	-	-
Máquina	Esparcidor de ligante bituminoso	LI100	7	Días	-	-	-
Producto entrante	Emulsión C60B ADH en riego de adherencia	EM65R	16	t	Transporte de la emulsión en cisterna	Diesel	28 km
Producto entrante	Emulsión C60B3 CUR en riego de curado	EM60E	16	t	Transporte de la emulsión en cisterna	Diesel	28 km
Tren de trabajo	Reciclado "in situ" para capas de pavimento, incluido extensión y compactación	RE100	20	Días	-	-	-
Máquina	Compactador rodillo neumático de 27 Tn sin vibración	CO300	20	Días	-	-	-

AC 16 SURF

Lieu de la Centrale : Usine d'enrobés (ECOPRO)	Localisation de l'usine :
Combustible pour la centrale : Gaz naturel 100%	
Température de fabrication : 165 °C	

Productos	%	% agua	Fuente de datos	Modo de transporte	Distancia de transporte	Energía
Áridos naturales	45.4 %	2%	PAV1	Transporte con Semi 40t, CU 28t	1 km	Diesel
Áridos naturales	50%	2%	PAV1	Transporte con Semi 40t, CU 28t	250 km	Diesel
Betún 35/50	4.6%	0%	Base URSIF: "BI300"	Transporte en cisterna, CU 24t	250 km	Diesel

SOLUCIÓN OBRA CONVENCIONAL CON DOS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

Tipo	Descripción	Fuente de datos	Cantidad	Unidad	Modo de transporte	Energía	Distancia de transporte
Producto saliente	Residuos de obra para reciclar	FRAISAT	4187.3	t	Transporte con semi 40t, CU 28t	Diesel	45 km
Máquina	Barredoras	AB100	15	Días	-	-	-
Máquina	Cepilladora 2m a 2,2m	RA300	8	Días	-	-	-
Producto entrante	Emulsión C60B ADH en riego de adherencia	EM65R	15	t	Transporte de la emulsión en cisterna	Diesel	28 km
Producto entrante	Emulsión C60B ADH en riego de adherencia	EM65R	16	t	Transporte de la emulsión en cisterna	Diesel	28 km
Producto entrante	AC 16 SURF S	-	3489.41	t	Transporte con semi 40t, CU 28t	Diesel	28 km
Producto entrante	AC 22 BIN S	-	4101.84	t	Transporte con semi 40t, CU 28t	Diesel	28 km
Máquina	Compactador rodillo neumático de 27 Tn sin vibración	CO300	15	Días	-	-	-
Máquina	Compactador tándem vibratorio de 12 Tn	CO200	15	Días	-	-	-
Máquina	Extendidora (20 a 25t)	FI300	15	Días	-	-	-
Máquina	Esparcidor de ligante bituminoso	LI100	15	Días	-	-	-

AC 22 BIN

Lieu de la Centrale : Usine d'enrobés (ECOPRO)	Localisation de l'usine :
Combustible de la planta : Gas natural 100%	
Temperatura de fabricación : 165 °C	

Productos	%	% agua	Fuente de datos	Modo de transporte	Distancia de transporte	Energía
Áridos naturales	96 %	2%	PAV1	Transporte con Semi 40t, CU 28t	1 km	Diesel
Betún 35/50	4%	0%	Base URSIF: "BI300"	Transporte en cisterna, CU 24t	250 km	Diesel

AC 16 SURF

Lieu de la Centrale : Usine d'enrobés (ECOPRO)	Localisation de l'usine :
Combustible pour la centrale : Gaz naturel 100%	
Température de fabrication : 165 °C	

Productos	%	% agua	Fuente de datos	Modo de transporte	Distancia de transporte	Energía
Áridos naturales	45.4 %	2%	PAV1	Transporte con Semi 40t, CU 28t	1 km	Diesel
Áridos naturales	50%	2%	PAV1	Transporte con Semi 40t, CU 28t	250 km	Diesel
Betún 35/50	4.6%	0%	Base URSIF: "BI300"	Transporte en cisterna, CU 24t	250 km	Diesel



APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 4 CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS

COMPARATIVA DEL CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS (MJ)

	Tipo de obra		Extracción de materiales	Transporte por carretera	Fabricación de mezclas	Carga que entra en la obra	Puesta en obra	Carga que sale de la obra	Subtotal	COMPARACIÓN
RECICLADO EN FRÍO "IN SITU" CON EMULSIÓN BITUMINOSA III	Carretera	RECICLADO EN FRÍO "IN SITU" CON EMULSIÓN BITUMINOSA III	8.34E+5	4.68E+5	9.84E+5	9.53E+4	1.76E+5	0.00E+0	2.56E+6	
		EMULSIONES BITUMINOSAS	5.03E+4	0.00E+0	0.00E+0	7.41E+2	0.00E+0	0.00E+0	5.10E+4	
		RECICLADO DE FIRMES	5.31E+4	0.00E+0	0.00E+0	7.41E+2	5.70E+5	0.00E+0	6.23E+5	
	Total		9.37E+5	4.68E+5	9.84E+5	9.68E+4	7.46E+5	0.00E+0	3.23E+6	
CONVENCIONAL CON DOS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE	Carretera	CONVENCIONAL CON DOS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	1.84E+5	1.84E+5	
		TRATAMIENTOS SUPERFICIALES	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	2.55E+5	0.00E+0	2.55E+5	
		EMULSIONES BITUMINOSAS	9.74E+4	0.00E+0	0.00E+0	1.44E+3	0.00E+0	0.00E+0	9.89E+4	
		MEZCLAS BITUMINOSAS	1.72E+6	5.13E+5	2.14E+6	2.07E+5	3.78E+5	0.00E+0	4.97E+6	
	Total		1.82E+6	5.13E+5	2.14E+6	2.08E+5	6.33E+5	1.84E+5	5.51E+6	70.31%

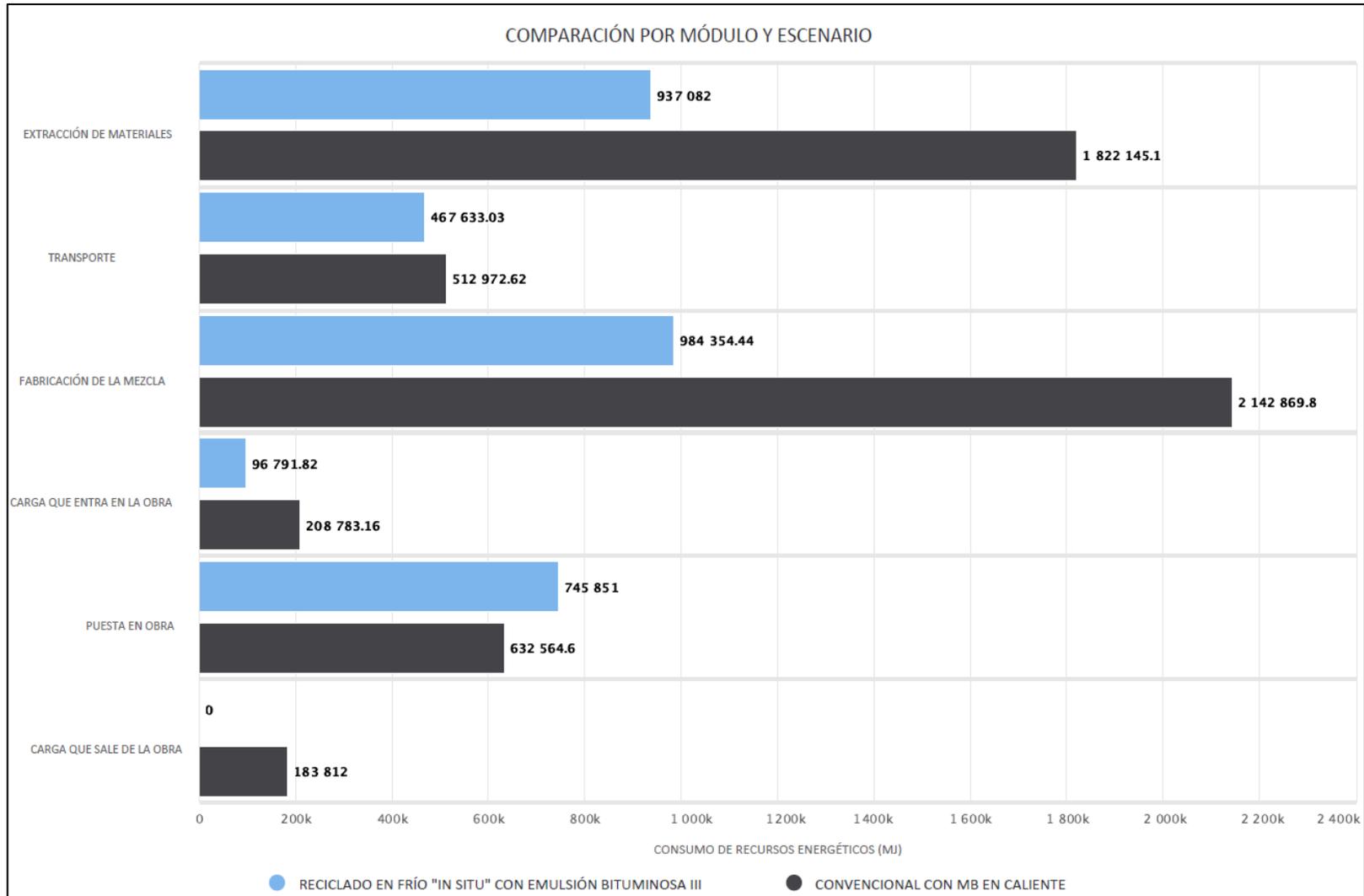


FIGURA 78. COMPARATIVA POR MÓDULO Y ESCENARIO DEL CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS (MJ). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.



APÉNDICE Nº 3 DEL ANEJO 4 EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

COMPARATIVA DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (tCO₂eq)

	Tipo de obra		Extracción de materiales	Transporte por carretera	Fabricación de mezclas	Carga que entra en la obra	Puesta en obra	Carga que sale de la obra	Subtotal	COMPARACIÓN
	RECICLADO EN FRÍO "IN SITU" CON EMULSIÓN BITUMINOSA III	Carretera	MEZCLAS BITUMINOSAS	69.47	40.94	61.06	8.34	13.66	0	193.47
EMULSIONES BITUMINOSAS			3.23	0	0	0.07	0	0	3.3	
RECICLADO DE FIRMES			3.31	0	0	0.07	45.16	0	48.54	
Total		76.01	40.94	61.06	8.48	58.82	0	245.31		
CONVENCIONAL CON DOS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE	Carretera	DEMOLICIONES	0	0	0	0	0	16.09	16.09	
		TRATAMIENTOS SUPERFICIALES	0	0	0	0	19.94	0	19.94	
		EMULSIONES BITUMINOSAS	6.26	0	0	0.13	0	0	6.39	
		MEZCLAS BITUMINOSAS	145.28	44.91	132.92	18.15	29.26	0	370.53	
	Total		151.54	44.91	132.92	18.28	49.2	16.09	412.95	68.34%

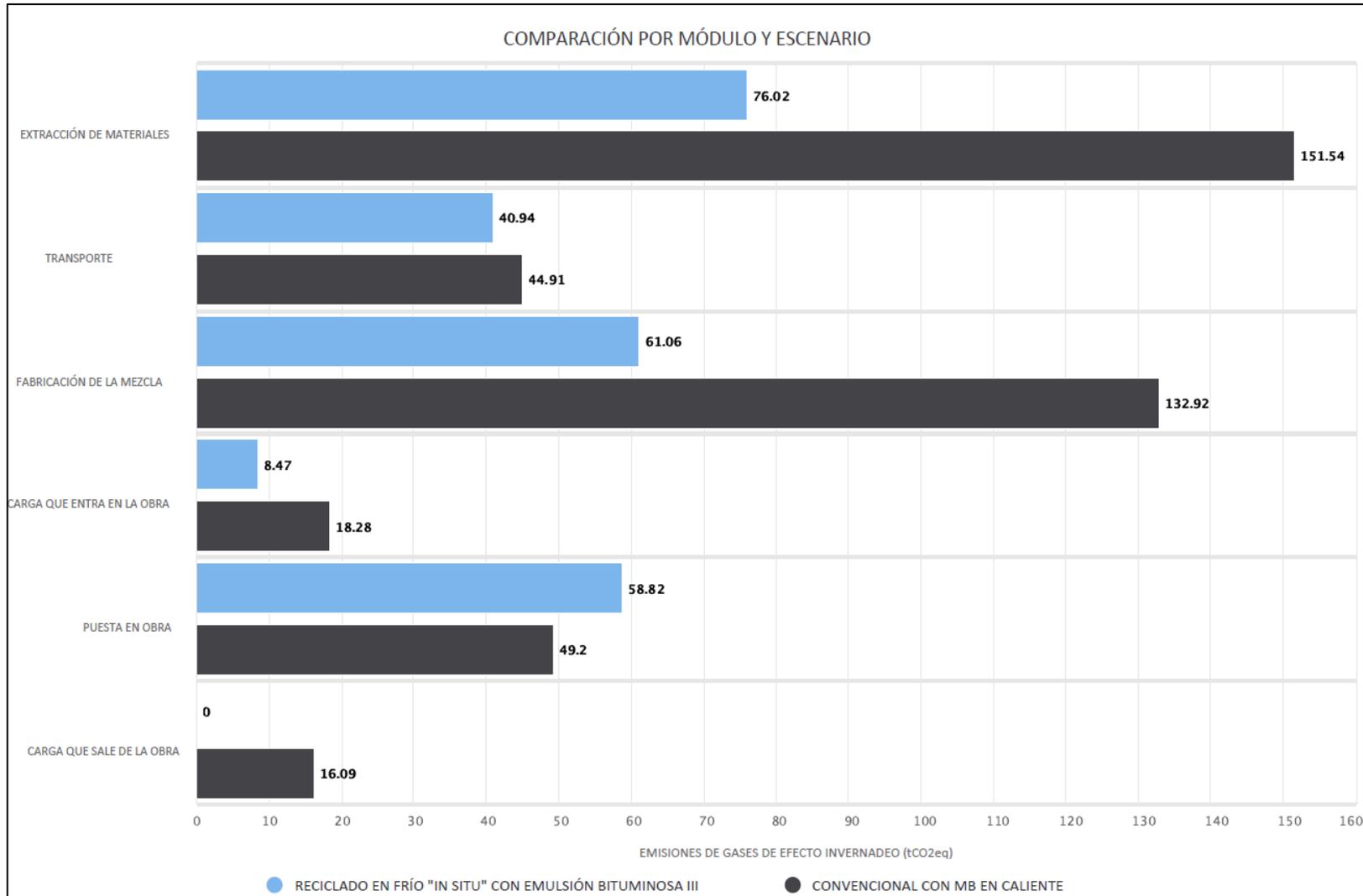


FIGURA 79. COMPARATIVA POR MÓDULO Y ESCENARIO DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (tCO₂EQ). FUENTE: SEVE TP.



ANEJO 5. PROTOCOLO DE ACTUACIÓN



APÉNDICE Nº 1 DEL ANEJO 5 UNIDADES DE OBRA

UNIDADES DE OBRA PARA LA APLICACIÓN DEL RECICLADO EN FRÍO "IN SITU" CON EMULSIÓN BITUMINOSA III PROPUESTO

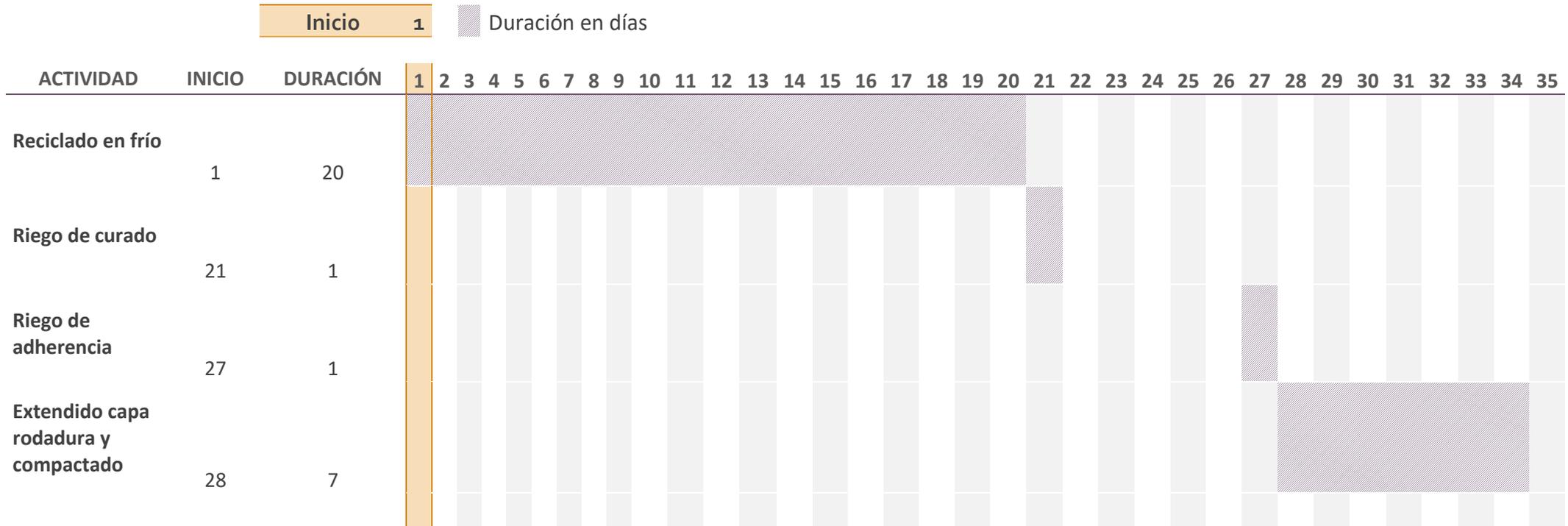
0404	UNIDAD	EMULSIONES BITUMINOSAS	PRECIO/UD.
P040401	t	EMULSIÓN C60B ADH EN RIEGOS DE ADHERENCIA	320,09 €
		Emulsión tipo C60B ADH en riegos de adherencia, con índice de rotura entre 2 y 10 i/ el barrido y la preparación de la superficie, totalmente terminado.	
P040407	t	EMULSIÓN C60B3 CUR EN RIEGOS DE CURADO	320,09 €
		Emulsión tipo C60B3 CUR para el curado del reciclado de firme en frío, con índice de rotura entre 2 y 10 i/ p.p. de transporte y extendido.	
0405		MEZCLAS BITUMINOSAS	
040501		FABRICACIÓN Y TRANSPORTE	
P04050105	t	AC 16 SURF S SILÍCEO EXCEPTO LIGANTE	19,98 €
		Fabricación de mezcla bituminosa en caliente, semicaliente o templada tipo AC 16 surf S con árido silíceo, excepto ligante hidrocarbonado, incluso transporte a pie de obra.	
040502		PUESTA EN OBRA	
P04050204	t	PUESTA EN OBRA DE MB CON EXTENSIÓN T> 300 t	5,38 €
		Puesta en obra de mezcla bituminosa para una extensión mayor o igual a 300 t diarias, totalmente extendida y compactada.	
0406		BETUNES	
P040602	t	BETÚN ASFÁLTICO 35/50	380,95 €
		Betún asfáltico en mezclas bituminosas 35/50 i/p.p. fabricación y transporte.	
0409		RECICLADO DE FIRMES	
040901		RECICLADO DE FIRME IN SITU CON EMULSIÓN BITUMINOSA	
P04090101	m ³	RECICLADO DE FIRME IN SITU CON EMULSIÓN	12,31 €
		Reciclado in situ de firme bituminoso existente con aportación de emulsión como ligante, incluido fresado de las capas del firme existente, mezcla y homogeneización del material fresado, el agua y, en su caso, los aditivos y áridos de aportación, la extensión y la compactación de la mezcla, y tratamiento de protección, excepto ligante.	



APÉNDICE Nº 2 DEL ANEJO 5 FASES DE EJECUCIÓN

PLANIFICACIÓN DE LAS FASES DE EJECUCIÓN DEL RECICLADO EN FRÍO "IN SITU" CON EMULSIÓN BITUMINOSA III

Reciclado en frío "in situ" con emulsión bituminosa III





APÉNDICE Nº 3 DEL ANEJO 5 PLAN DE CONTROL Y ENSAYO

PLAN DE CONTROL Y ENSAYO DEL RECICLADO EN FRÍO “IN SITU” CON EMULSIÓN BITUMINOSA III PROPUESTO

Fase	Ensayo	Norma	Procedimiento	Tamaño de la muestra	Frecuencia	Observaciones		
Control de procedencia de los materiales	Emulsión bituminosa	Art. 214 del PG-3	Análisis de laboratorio	1 litro	Antes del inicio de los trabajos	Desde tanques en tren de reciclado o camión de transporte.		
	Árido de aportación	Art. 542 del PG-3	Análisis de laboratorio	-	En caso de emplearse	-		
	Aditivos	Validados por el fabricante	Control de recepción	1 litro	Cada día	-		
Control de ejecución	Dosificación de la emulsión y agua de aporte	Verificar funcionamiento de boquillas de inyección y consumo de ligante y agua	Control de caudalímetro	-	Cada 800 m	Mediante el caudalímetro del equipo de reutilización, con registro automático del sistema.		
			Control de consumo	-	Cada día			
	Dosificación de aditivos	Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares (PPTP)	Control de cantidad de aditivo y exactitud de lectores de medición	-	>1	Al día		
	Fresado y mezcla reutilizada	Granulometría del fresado	Verificar funcionamiento de boquillas de inyección y consumo de ligante y agua	UNE-EN 933-1	Análisis de laboratorio	> 9 kg	O cada 800 m	
				Contenido de ligante residual	UNE-EN 12697-1 o UNE-EN 12697-39	Análisis de laboratorio	-	-
				Contenido de humedad de la mezcla reutilizada	UNE EN 1097-5	Análisis de laboratorio	-	-
				Dosificación de ligante de la mezcla reutilizada	UNE-EN 12697-10 UNE-EN 12697-39	Análisis de laboratorio	-	-
				Resistencia a compresión estática y resistencia conservada	Apartado 20.3. del art. 20 del PG-4	Fabricación y curado de probetas	-	-
	Compactación	Establecer procedimiento de compactación y densidad objetivo para especificación.	Verificar funcionamiento de boquillas de inyección y consumo de ligante y agua	-	-	Cada 800 m	-	
				Densidad	UNE-EN 12697-27	Análisis de laboratorio	>2	O cada 800 m
				Espesor de la capa reciclada	-	Medición directa	Cada 200 m	-
				Humedad	UNE EN 1097-5	Análisis de laboratorio	-	-
	Regularidad superficial	NLT-330	Medición con IRI	-	-	Tramos	-	
Control de recepción de la unidad terminada	Lotes de recepción	Establecer procedimiento de recepción de lotes.	-	-	Tramos	-		
			Extracción de testigos cilíndricos	-	Cada 800 m	-		
	Espesor, Densidad y Humedad	Verificación de rasante, anchura y espesor de la capa reutilizada	UNE-EN 12697-27	Control de homogeneidad y compactación de testigos	-	-	-	
			-	Medición directa	-	-	-	
Regularidad Superficial	NLT-330	Medición con IRI	-	-	Tramos	-		
Especificaciones de la unidad terminada	Densidad	-	-	-	-	La densidad mínima será $\geq 98\%$ de la densidad de referencia. La diferencia de densidades entre la superficie y la base de la capa no superará $\leq 3\%$.		
	Terminación, Rasante, Anchura y Espesor	-	-	-	-	La textura será uniforme.		

ANEJO 6. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. En 2015, todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas aprobaron 17 Objetivos como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en la cual se establece un plan para alcanzar los Objetivos en 15 años.

La Tabla 18 expone la relación del TFM “Desarrollo de tecnologías sostenibles de reciclado de pavimentos en frío “in situ” para la rehabilitación de carreteras. Aplicación práctica en la carretera A-221, desde el PK 48+900 al 52+065, Caspe (Zaragoza).” con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

TABLA 18. GRADO DE RELACIÓN DEL TFM CON LOS ODS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLES	ALTO	MEDIO	BAJO	NO PROCEDE
ODS 1. Fin de la pobreza.				
ODS 2. Hambre cero.				
ODS 3. Salud y bienestar.				
ODS 4. Educación de calidad.				
ODS 5. Igualdad de género.				
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.				
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.				
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.				
ODS 12. Producción y consumo responsables.				
ODS 13. Acción por el clima.				
ODS 14. Vida submarina.				
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.				
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				

A continuación, se ha realizado una descripción de la alineación del TFM con los ODS con un grado de relación más alto:

ODS 9: Industrias, Innovación e Infraestructuras. El desarrollo de técnicas innovadoras para la reutilización eficiente de mezclas bituminosas en frío representa un avance significativo en la industria de la construcción. Al implementar tecnologías de reciclado en “in situ”, se fomenta la innovación en la forma en que se realizan las obras de pavimentación, lo que puede llevar a una mayor eficiencia en el uso de recursos y a la mejora de la calidad de las infraestructuras viales.

ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles. La aplicación de técnicas de reciclado en frío en el mantenimiento de carreteras contribuye a la creación de ciudades y comunidades más sostenibles. Al reutilizar materiales y reducir la generación de residuos en la construcción de carreteras, se promueve una gestión urbana más eficiente y se fomenta la construcción de infraestructuras que sean resilientes y sostenibles a largo plazo.

ODS 12: Producción y consumo responsables. La adopción de tecnologías de reciclado en frío en la ejecución de obras de pavimentación está alineada con el ODS 12 al promover prácticas de producción y consumo responsables. Al reutilizar materiales y reducir la extracción de recursos naturales, se contribuye a la reducción del impacto ambiental de la construcción de carreteras y se fomenta un uso más eficiente de los recursos disponibles.

ODS 13: Acción por el clima. La implementación de técnicas de reciclado en frío en la pavimentación de carreteras tiene un impacto positivo en la lucha contra el cambio climático. Al reducir la huella de carbono de las obras de pavimentación y mejorar la sostenibilidad global del proceso, se contribuye a la mitigación de los efectos del cambio climático y se promueve una acción climática más efectiva en el sector de la construcción.

Asimismo, no solo se alinea con los ODS mencionados anteriormente, sino que también puede tener impactos positivos en otros, como el ODS 7, ya que al considerar el uso de tecnologías más limpias y eficientes en la producción y aplicación de mezclas bituminosas, se puede contribuir a la meta de garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna y, el ODS 8, a partir de su potencial para generar empleo, promover un crecimiento económico sostenible y fomentar la innovación en la industria de la construcción.

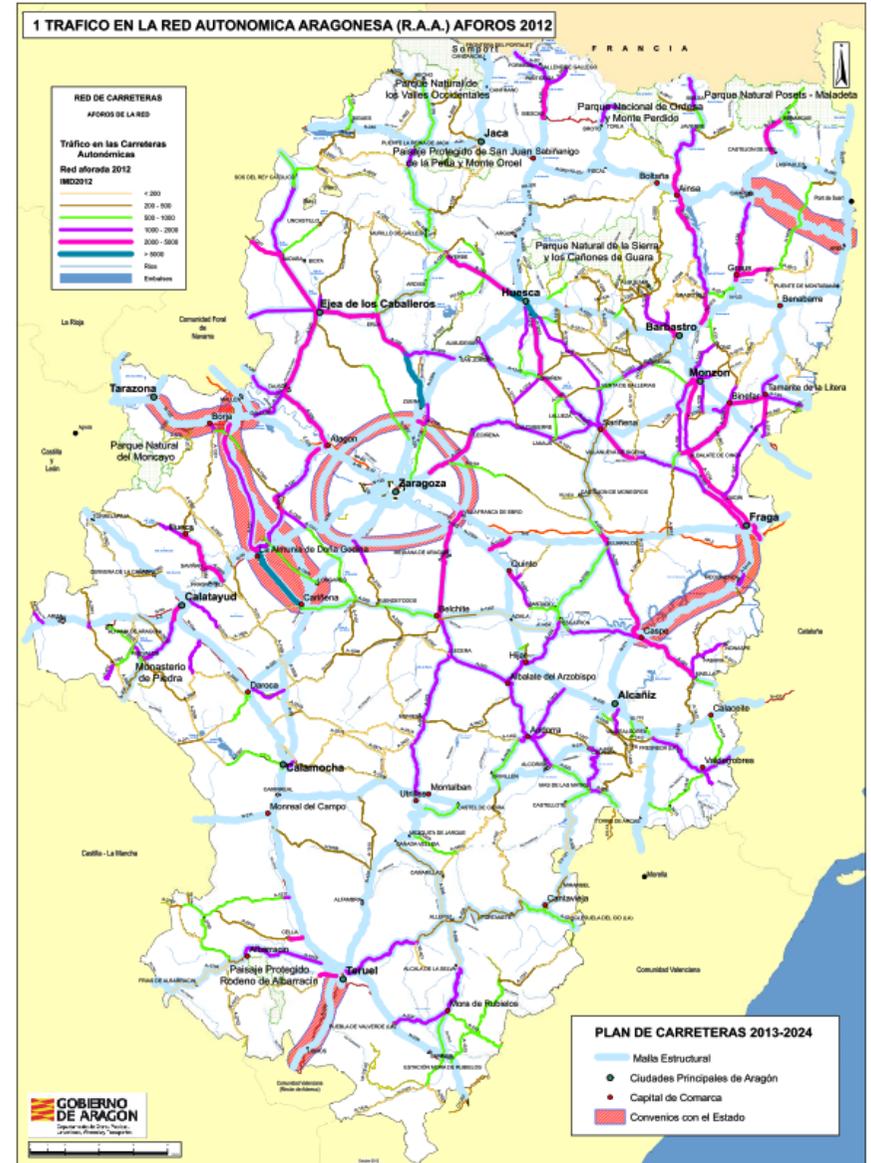


PLANOS



PLANO Nº 1.1 PLANTA DE SITUACIÓN E ÍNDICE DE PLANOS

PLANTA DE SITUACIÓN E ÍNDICE DE PLANOS



ÍNDICE DE PLANOS

Nº de plano	Designación:
1.1	Planta de situación e índice de planos
1.2	Planta general - Distribución de hojas
2	Planta general - Actuaciones
3	Secciones tipo



PLANO Nº 1.2 PLANTA GENERAL – DISTRIBUCIÓN DE HOJAS

PLANTA GENERAL - DISTRIBUCIÓN DE HOJAS



AUTOR DEL TRABAJO:

JORGE GANDIA SORIANO

FECHA:
JULIO 2024

TÍTULO DEL TRABAJO:
"Desarrollo de tecnologías sostenibles de reciclado de pavimentos en frío "in situ" para la rehabilitación de carreteras. Aplicación práctica en la carretera A-221, desde el PK 48+900 al PK 52+065, Caspe (Zaragoza)"

ESCALA:
1/20.000

TÍTULO DEL PLANO:
Planta general - Distribución de hojas

Nº DEL PLANO:
1.2
HOJA:
2 de 2



PLANO Nº 2 PLANTA GENERAL - ACTUACIONES

PLANTA GENERAL - ACTUACIONES: SUBTRAMO 1



PLANTA GENERAL - ACTUACIONES: SUBTRAMOS 1 Y 2



AUTOR DEL TRABAJO:

 JORGE GANDIA SORIANO

FECHA:
 JULIO 2024

TÍTULO DEL TRABAJO:
 "Desarrollo de tecnologías sostenibles de reciclado de pavimentos en frío "in situ" para la rehabilitación de carreteras. Aplicación práctica en la carretera A-221, desde el PK 48+900 al PK 52+065, Caspe (Zaragoza)"

ESCALA:
 1/3.000

TÍTULO DEL PLANO:
 Planta general - Actuaciones:
 Subtramos 1 ondulado (PK 49+500 - 49+900) y 2 llano (PK 49+900 - 50+000)

Nº DEL PLANO:
 2
 HOJA:
 2 de 6

PLANTA GENERAL - ACTUACIONES: SUBTRAMO 2



AUTOR DEL TRABAJO:

 JORGE GANDIA SORIANO

FECHA:
 JULIO 2024

TÍTULO DEL TRABAJO:
 "Desarrollo de tecnologías sostenibles de reciclado de pavimentos en frío "in situ" para la rehabilitación de carreteras. Aplicación práctica en la carretera A-221, desde el PK 48+900 al PK 52+065, Caspe (Zaragoza)"

ESCALA:
 1/3.000

TÍTULO DEL PLANO:
 Planta general - Actuaciones:
 Subtramo 2 llano (PK 50+000 - 50+600)

Nº DEL PLANO:
 2
 HOJA:
 3 de 6

PLANTA GENERAL - ACTUACIONES: SUBTRAMOS 3 Y 4



AUTOR DEL TRABAJO:

JORGE GANDÍA SORIANO

FECHA:

JULIO 2024

TÍTULO DEL TRABAJO:

"Desarrollo de tecnologías sostenibles de reciclado de pavimentos en frío "in situ" para la rehabilitación de carreteras. Aplicación práctica en la carretera A-221, desde el PK 48+900 al PK 52+065, Caspe (Zaragoza)"

ESCALA:

1/3.000

TÍTULO DEL PLANO:

Planta general - Actuaciones:
Subtramos 3 ondulado (PK 50+600 - 50+900) y 4 llano (PK 50+900 - PK 51+000).

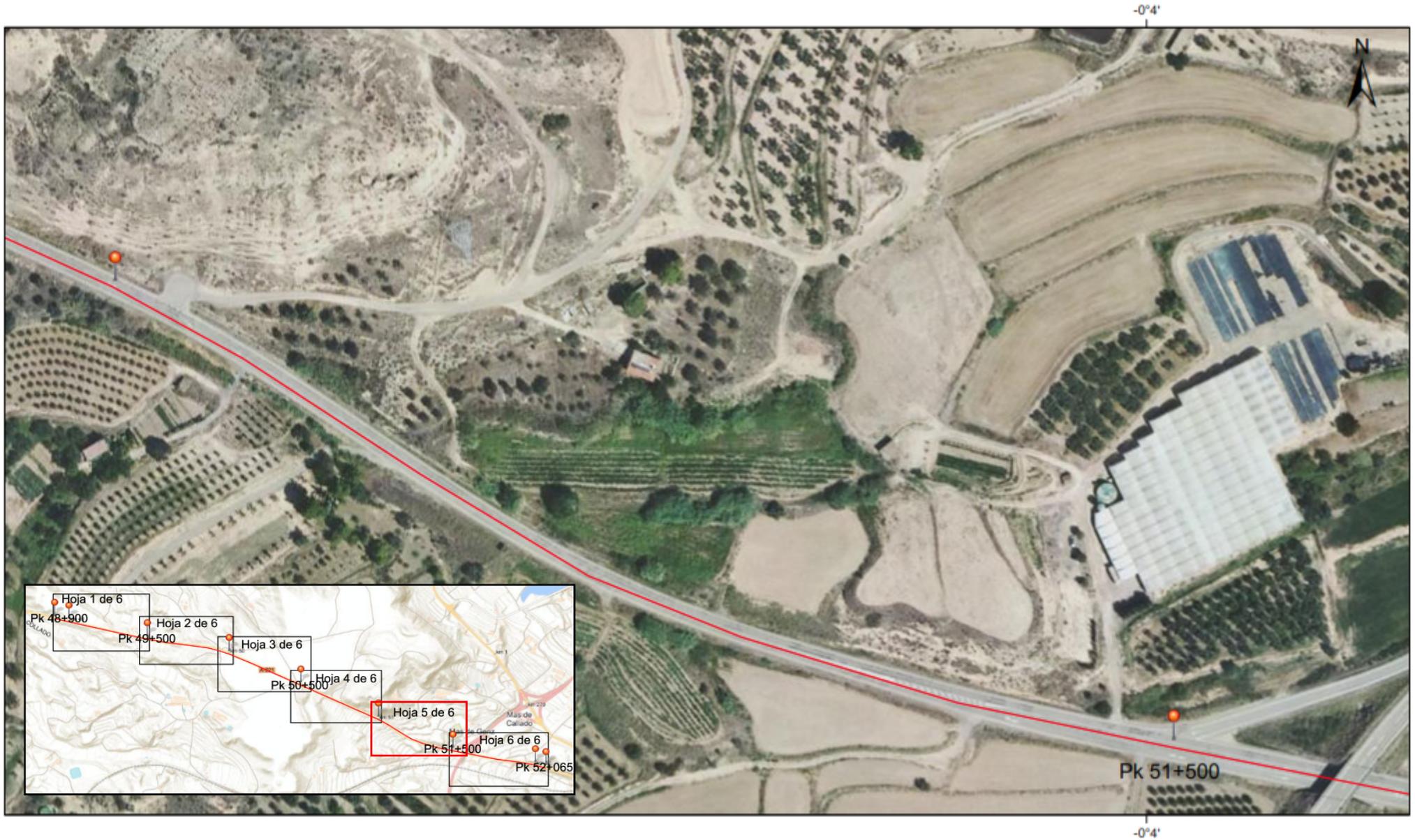
Nº DEL PLANO:

2

HOJA:

4 de 6

PLANTA GENERAL - ACTUACIONES: SUBTRAMOS 4 Y 5



AUTOR DEL TRABAJO:

 JORGE GANDIA SORIANO

FECHA:
 JULIO 2024

TÍTULO DEL TRABAJO:
 "Desarrollo de tecnologías sostenibles de reciclado de pavimentos en frío "in situ" para la rehabilitación de carreteras. Aplicación práctica en la carretera A-221, desde el PK 48+900 al PK 52+065, Caspe (Zaragoza)"

ESCALA:
 1/3.000

TÍTULO DEL PLANO:
 Planta general - Actuaciones:
 Subtramos 4 llano (PK 51+000 - 51+100) y 5 ondulado (PK 51+100 - PK 51+500). Concentración de accidentes.

Nº DEL PLANO:
 2
 HOJA:
 5 de 6

PLANTA GENERAL - ACTUACIONES: SUBTRAMOS 5 Y 6



AUTOR DEL TRABAJO:

 JORGE GANDIA SORIANO

FECHA:
 JULIO 2024

TÍTULO DEL TRABAJO:
 "Desarrollo de tecnologías sostenibles de reciclado de pavimentos en frío "in situ" para la rehabilitación de carreteras. Aplicación práctica en la carretera A-221, desde el PK 48+900 al PK 52+065, Caspe (Zaragoza)"

ESCALA:
 1/3.000

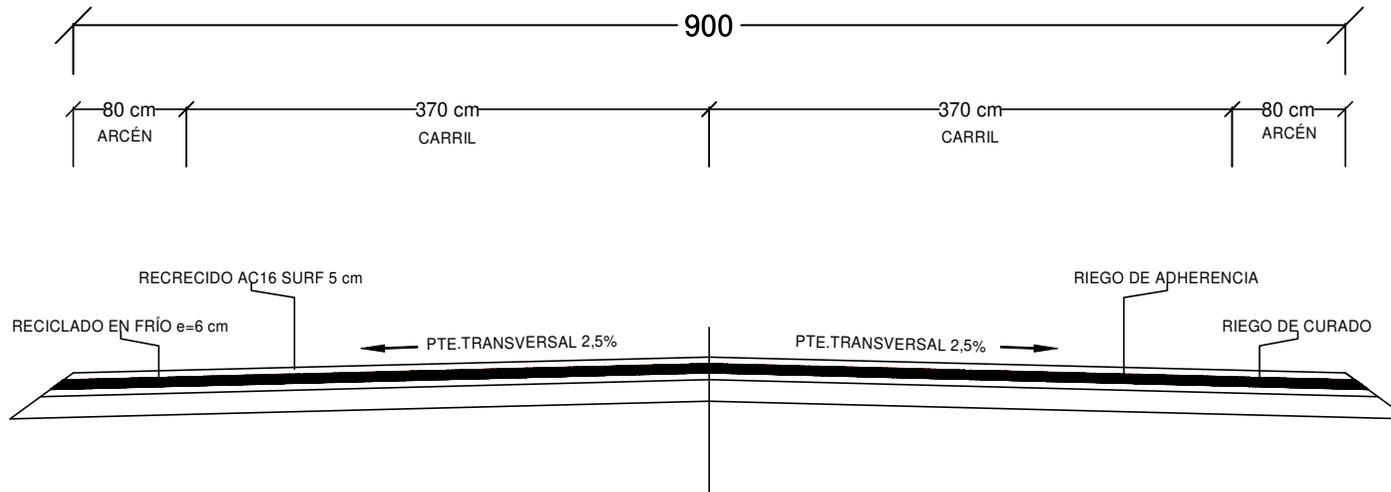
TÍTULO DEL PLANO:
 Planta general - Actuaciones:
 Subtramos 5 ondulado (PK 51+500 - PK 51+865) y 6 llano (PK 51+865 - PK 52+065).
 Concentración de accidentes.

Nº DEL PLANO:
 2
 HOJA:
 6 de 6

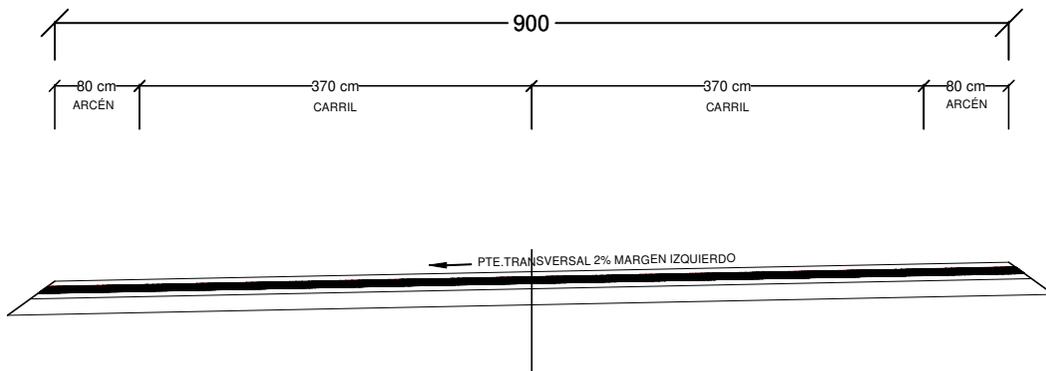


PLANO Nº 3 SECCIONES TIPO

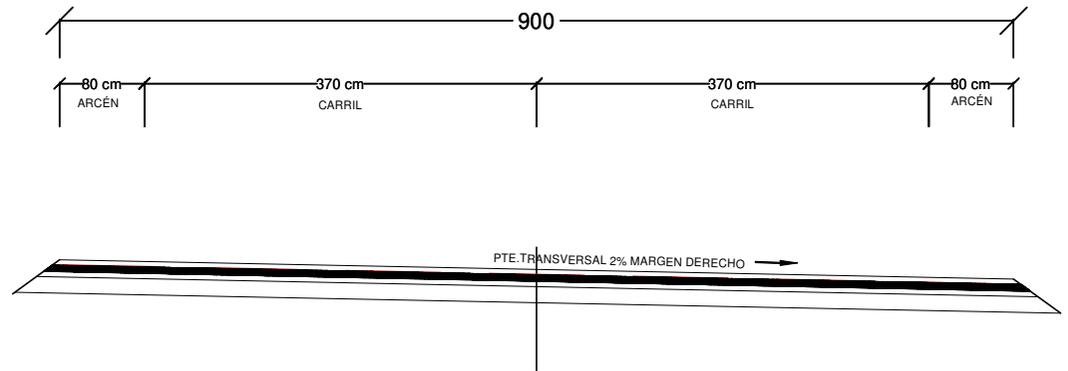
SECCIÓN DE REHABILITACIÓN TRAMOS LLANOS



SECCIÓN DE REHABILITACIÓN TRAMOS ONDULADOS



SECCIÓN DE REHABILITACIÓN TRAMOS ONDULADOS



AUTOR DEL TRABAJO:

 JORGE GANDIA SORIANO

FECHA:
 JULIO 2024

TÍTULO DEL TRABAJO:
 "Desarrollo de tecnologías sostenibles de reciclado de pavimentos en frío "in situ" para la rehabilitación de carreteras. Aplicación práctica en la carretera A-221, desde el PK 48+900 al PK 52+065, Caspe (Zaragoza)"

ESCALA:
 S.E.

TÍTULO DEL PLANO:
 Secciones tipo de rehabilitación propuestas en los tramos llanos y ondulados

Nº DEL PLANO:
 3
 HOJA:
 1 de 1

