

L'exploitation
et la maintenance
des infrastructures



IREX

Institut pour la recherche appliquée
et l'expérimentation en génie civil


**MINISTÈRES
AMÉNAGEMENT
DU TERRITOIRE
TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*

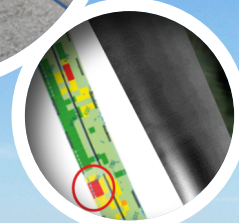
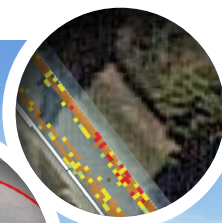
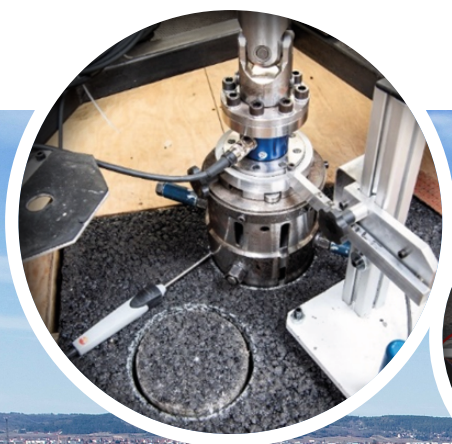


PN - ANR MOVE

DVDC

DURÉE DE VIE DES CHAUSSEES

SÍNTESIS DE RESULTADOS



Collection IREX

Diciembre 2025

**EL PROYECTO NACIONAL FRANCÉS DVDC
HA CONTADO CON EL APOYO
FINANCIERO DEL MATTE:
MINISTERIOS DE ORDENACIÓN TERRITORIAL
Y TRANSICIÓN ECOLÓGICA**

Créditos fotográficos de la portada:

Erolf Production, Proyecto Nacional DVDC

ISBN:

978-2-9568055-7-1 Resumen ESP DVDC

RESUMEN

RESUMEN	3
RETOS	4
1 - ESCALA DE UNA RED DE CARRETERAS	5
1.1 - CONOCIMIENTO DEL ESTADO DE UNA RED: PRÁCTICAS DE LOS PROMOTORES	5
1.2 - CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO DE UNA RED	6
1.2.1 - Inspección de la superficie	6
1.2.2 - Inspección estructural	12
1.3 - INDICADORES ESTRUCTURALES	14
1.3.1 - Análisis de la situación actual	14
1.3.2 - Propuesta de indicador estructural	14
1.4 - CONCLUSIÓN - PARA IR MÁS ALLÁ	16
2 - ESCALA DE LA ESTRUCTURA DE LA CALZADA	17
2.1 - ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL	17
2.1.1 - Plataformas y materiales granulares en el dimensionamiento de pavimentos flexibles y carreteras sin revestirs	17
2.2 - HERRAMIENTAS PARA LA INGENIERÍA VIAL	20
2.2.1 - Nueva metodología destinada a caracterizar el nivel de adhesión de las capas in situ	20
2.2.2 - Modelo de elementos finitos de los diferentes desordenes en una estructura que influyen en las cuencas de deflexión	22
2.3 - HACIA MODELOS MECÁNICOS ENRIQUECIDOS	23
2.3.1 - Modelización estadística de los mecanismos físicos combinados de degradación de la calzada	23
2.3.2 - Modelización mecánica con mecanismo de iniciación y propagación de fisuras	24
2.3.3 - Modelización mecánica teniendo en cuenta el contacto entre el neumático y la calzada (tribología)	25
3 - ESCALA DE MATERIALES PARA PAVIMENTOS	27
3.1 - PROYECTO MOVEDVDC	27
3.2 - DURABILIDAD DE LAS CAPAS DE RODADURA	30
CONCLUSIÓN GENERAL	31
LISTA DE INFORMES DVDC	32

El Proyecto Nacional Francés DVDC (Vida útil de las calzadas), coordinado por el Instituto de Investigación Aplicada y Experimentación en Ingeniería Civil (IREX), es un programa de investigación colaborativa que se desarrolló entre 2016 y 2023.

Ha permitido reunir a cuarenta (40) socios, representativos de todos los actores del sector de las infraestructuras viarias, tales como gestores de redes, administraciones, organismos de investigación, ingenierías, empresas de obras viarias e industriales.

El trabajo realizado en el marco de este proyecto se basó en enfoques variados, multidisciplinares y a múltiples escalas, que en algunos aspectos pueden considerarse como investigación científica, mientras que otros han dado lugar a resultados directamente aplicables en la práctica. Las aportaciones científicas del proyecto ANR moveDVDC (Modelización del envejecimiento y el deterioro para la evaluación de la vida útil de las calzadas), dedicado a determinadas problemáticas relacionadas con los mecanismos de deterioro, también se han integrado en el PN DVDC.

RETOS

Las infraestructuras viarias están sometidas a un envejecimiento natural inducido por el efecto de factores externos como el tráfico y el clima. El mantenimiento y la conservación de las infraestructuras viarias representan un reto económico considerable, especialmente en un contexto en el que los presupuestos asignados a estas acciones son cada vez más limitados por parte de los gestores. Por lo tanto, se trata de mantener este patrimonio en un estado que permita garantizar sus funciones con un nivel de seguridad aceptable para el usuario.

El patrimonio de infraestructuras públicas tiene un valor extremadamente importante. En cuanto a los componentes de las calzadas, hay que tener en cuenta su coste de construcción, su amortización en función de su vida útil y su mantenimiento para preservar tanto su valor patrimonial como su capacidad para prestar el servicio esperado. La falta de inversión o de mantenimiento puede provocar su deterioro o, lo que es peor, su progresiva inadecuación para los servicios para los que fueron diseñadas, lo que perturba la economía local o nacional y supone un riesgo para los usuarios.

En la cuenta general del Estado, las infraestructuras viarias, que incluyen autopistas, obras de ingeniería civil, dependencias (saneamiento), áreas y equipamientos (señalización, barreras de seguridad, sistemas de explotación), se valoran al «coste de reposición amortizado», es decir, el coste de reconstrucción a nuevo menos el coste de mantenimiento. En principio, esta valoración se revisa cada vez que se cierran las cuentas.

Esta cantidad de 250 000 millones de euros representa dos tercios de los activos fijos tangibles del Estado (edificios, puertos, aeropuertos, etc.). Si añadimos las carreteras departamentales y las vías municipales (1 millón de kilómetros), el valor de este patrimonio, en relación con la inversión realizada para construirlo, se estima en un total de 2 billones de euros, cifra cercana al PIB del país.

Por lo tanto, el cuidado y mantenimiento de este patrimonio supone un reto considerable. Para un gestor de redes viarias, conocer la vida útil de las estructuras de las calzadas (inicial y residual a lo largo del tiempo) es un elemento clave para definir la programación y el presupuesto de sus gastos. No se trata solo de una cuestión financiera; diversos estudios han demostrado que la optimización del mantenimiento de una infraestructura viaria, teniendo en cuenta todo su ciclo de vida, permite reducir su impacto medioambiental.

Para responder a estos retos, los objetivos del proyecto nacional se han centrado en la evaluación de la vida útil residual de las calzadas, en tres escalas diferentes:

- 1. Escala de una red viaria con un enfoque macroscópico del estado de los tramos.
- 2. Escala de la estructura de la calzada que se vinculará a los fenómenos de aparición de fisuras y desprendimientos de interfaces, e integrará dichos fenómenos en los modelos de deterioro.
- 3. Escala de materiales para calzadas teniendo en cuenta diferentes tipos de materiales. En este amplio tema, DVDC ha centrado sus investigaciones, en particular, en mejorar el conocimiento del comportamiento de los materiales bituminosos y su evolución a lo largo del tiempo, de las gravas sin tratar, de la influencia de los ciclos de congelación/descongelación, así como en los temas del proyecto moveDVDC. También se ha prestado especial atención a los materiales de la capa de rodadura, cuya elección y mantenimiento son cuestiones fundamentales para los gestores.

1 - ESCALA DE UNA RED DE CARRETERAS

1.1 - Conocimiento del estado de una red: prácticas de los promotores

Las primeras etapas del proyecto consistieron en recopilar las prácticas de los promotores para conocer el patrimonio relativo a las calzadas y los usos en términos de datos. El panel de promotores encuestados estaba compuesto en su mayoría por departamentos. El análisis de las prácticas se basó en tres encuestas:

- Una encuesta realizada en el marco del proyecto entre ocho departamentos participantes;
- La encuesta realizada a 57 departamentos dirigida por el Observatorio Nacional de Carreteras, coordinada por el IDRRIM;
- Las encuestas realizadas en el marco del proyecto GEPUR (2012).

En comparación con las encuestas realizadas en el proyecto GEPUR en 2012, a la luz de los resultados obtenidos por la ONR y la encuesta DVDC, cabe destacar una mayor concienciación por parte de los departamentos sobre la importancia de conocer mejor el estado de su patrimonio viario. Este contexto se explica sin duda por una mayor necesidad de justificar los gastos de mantenimiento y optimizar los presupuestos.

Más allá de esta constatación, las principales conclusiones son las siguientes:

- En cuanto a los departamentos, la red de carreteras tiene una longitud media de 3500 km. Esta red está jerarquizada y, en su mayor parte, es objeto de una política de mantenimiento con procesos no necesariamente bien definidos y una programación general mínima de tres años según la jerarquía, a menudo aplicando los métodos de inspección visual derivados del método de inspección LPC n.º 38-2, dando prioridad a los procedimientos operativos M2 y M3.
- Más del 70 % de la red departamental (clases 3 y 4) está compuesta principalmente por estructuras flexibles (GNT/asfalto) y estructuras antiguas de grava + revestimiento o asfalto. Esta red es objeto principalmente de un mantenimiento superficial sin refuerzo.
- Menos del 6 % de las capas de rodadura se renuevan cada año, es decir, cada 17 años o más.
- Las técnicas de refuerzo o recarga se aplican al menos cada 20 años o más, según la jerarquía de la red.
- La aparición de fisuras «por la parte superior» relacionadas con el envejecimiento del asfalto parece ser un deterioro cada vez más recurrente.
- Se han detallado los problemas específicos relacionados con las numerosas rotondas o las carreteras

de montaña (altitud > 800 m), lo que pone de manifiesto el deseo de los actores implicados de compartir información y problemas.

Gráfico 1 : Distribución de las patologías encontradas en calzadas asfálticas y semirrígidas (marco de investigación DVDC)

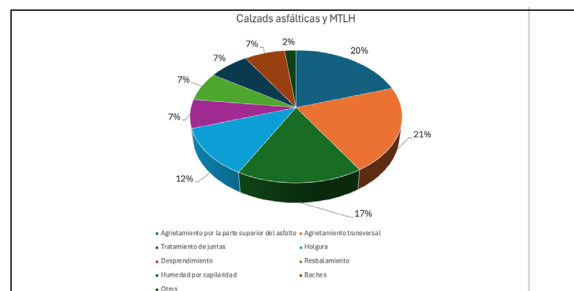
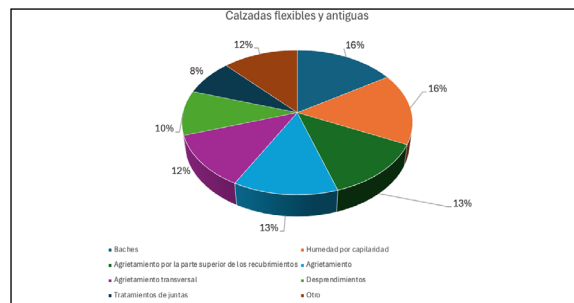


Gráfico 2 : Distribución de las patologías encontradas en calzadas flexibles y antiguas (marco de investigación DVDC).



En cuanto a los datos recopilados en materia de diagnóstico de las redes departamentales, las principales conclusiones son las siguientes:

- El conocimiento del estado de las calzadas sigue siendo parcial, ya que se centra principalmente en las redes estructurales, que representan en promedio el 15 % de la longitud total, y con enfoques y métodos aún dispares en términos de calidad y exhaustividad.
- La programación plurianual no se basa necesariamente en datos de auscultación, sino más bien en el conocimiento de los actores locales.
- Se ha identificado la necesidad de contar con herramientas que permitan aprovechar mejor los datos recopilados, así como el deseo de disponer de un indicador reconocido con transparencia en sus métodos de cálculo. Cabe señalar que los equipamientos de la carretera son aún menos conocidos que las calzadas en términos de conocimiento del patrimonio, mientras que su mantenimiento es determinante para la seguridad de los usuarios.

El Conseil Départemental de l'Eure (CD27), socio activo del proyecto, recordó la importancia de estos temas para preservar los niveles de servicio, evaluar los costes de mantenimiento y poder así proponer una programación plurianual en consonancia con la estrategia de mantenimiento del departamento.

Los trabajos del proyecto nacional también se centraron en las calzadas de hormigón y semirrígidas, con un estudio bibliográfico muy completo sobre las leyes sobre la aparición de fisuras en las calzadas semirrígidas y una exhaustiva recopilación de experiencias sobre las calzadas de hormigón de tipo «losas de hormigón sin espigas» y «hormigón armado continuo», lo que permite estimar la frecuencia de mantenimiento y rehabilitación.

Por último, cabe señalar que el conocimiento de la red viaria también abarca las grandes ciudades muy presentes en nuestro territorio. Se ha iniciado una encuesta en el PN DVDC entre estas metrópolis francesas con la colaboración de la AITF (Asociación de Ingenieros Territoriales de Francia) que permite integrar sus especificidades (categorías de vías públicas, consideración de zanjas, integración de vías públicas con elementos modulares). La baja tasa de respuestas (5 de 26) no permitió realizar un análisis detallado y fiable, pero puso de manifiesto la falta de información centralizada sobre el estado y el seguimiento de su red viaria.

Para más información:

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/028	Retour d'expérience sur les mécanismes de dégradation des chaussées : Questionnaire complémentaire adressé aux conseils départementaux et projet pour les métropoles - Mise à jour (Experiencia adquirida sobre los mecanismos de degradación de las calzadas: Cuestionario complementario dirigido a los consejos departamentales y proyecto para las metrópolis – Actualización)
DVDC/R/031	Retour d'expérience sur les mécanismes de dégradation des chaussées - Questionnaire adressé aux métropoles (Experiencia adquirida sobre los mecanismos de degradación de las calzadas - Cuestionario dirigido a las grandes ciudades)

1.2 - Caracterización del estado de una red

Ante esta constatación y la aparición de nuevas tecnologías, se ha hecho imprescindible centrarse en la caracterización del estado de una red. Este capítulo corresponde a la parte más desarrollada en el marco del tema 2 del proyecto nacional DVDC. Las principales razones son las siguientes:

- La oportunidad para todos los participantes en el proyecto de compartir su experiencia con el objetivo de avanzar hacia nuevos marcos de referencia comunes;
- La conciencia generalizada de que los avances tecnológicos en materia de inspección de carreteras iban a revolucionar la doctrina elaborada principalmente en los años 90;
- El deseo de informar a los promotores sobre estas transformaciones, en términos de perspectivas, valor añadido aportado por este cambio y gestión del patrimonio viario.

1.2.1 - Inspección de la superficie

1.2.1.1 - actualización del método 38-2: registros visuales del deterioro de las calzadas

Este primer paso en este ámbito ha permitido compartir las necesidades de actualización de los procedimientos operativos del método de registro de daños LPC n.º 38-2. Este método se basa en el Catálogo de deterioros de calzadas (Método de ensayo LPC n.º 52) para precisar la naturaleza y la gravedad de los deterioros que deben registrarse.

Gráfico 3 : Definición de los procedimientos operativos del método de registro de los daños en las calzadas, en función de la tipología de la red y de los objetivos del estudio.

Tipo de redes y objetivos del estudio	Calzadas flexibles, semirrígidas, bituminosas, inversas, mixtas, BAC			Losas de hormigón
	Campo abierto y vías rápidas urbanas (red nacional, comarcal, etc.)		Red urbana fuera de las vías rápidas urbanas, red municipal (municipios, conjunto de municipios)	Todos los sitios
	Red estructurante (dentro y fuera de la aglomeración)	Red secundaria		
Programación, evaluación, vigilancia	MO1	MO2	MO3	MO5
Diagnóstico – refuerzo Seguimiento de secciones de control	MO4			

El proyecto permitió redactar una nota metodológica sobre los registros visuales no automáticos y precisar los ámbitos de aplicación de los diferentes modos operativos. Esta evolución responde a un doble objetivo: facilitar el levantamiento y hacer más pertinente el análisis del estado de las calzadas utilizando degradaciones fáciles de observar, pero sin pérdida de calidad.

Así, el número de modos operativos se ha reducido a seis, según la siguiente clasificación:

- Tres modos operativos para la evaluación de la red, que dependen únicamente del tipo de red inspeccionada;
- Un procedimiento aplicable a los estudios de diagnóstico, mantenimiento y refuerzo de calzadas, así como al seguimiento de secciones de control;
- Se mantiene un modo específico para los pavimentos de hormigón, debido a patologías propias y diferentes de los demás pavimentos.

Esta actualización también ha permitido recordar la importancia de la formación y la cualificación de los operadores que realizan los relevamientos visuales.

Para más información:

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/015	Actualisation de la méthode 38-2 (Actualización del método 38-2)

1.2.1.2 - Los registros automáticos de daños

1.2.1.2.1 - Enfoque superficial de la evaluación de calzadas

La evolución de las tecnologías láser y las capacidades de adquisición han permitido que, a partir de 2010, surjan nuevas soluciones para la inspección de calzadas, cuyas posibilidades de explotación son inmensas en términos de cantidad y calidad de la información.

Al inicio del proyecto, los participantes identificaron estos nuevos dispositivos, evaluaron el potencial de los nuevos sensores y analizaron los primeros resultados obtenidos a partir de mediciones realizadas en una plataforma de pruebas puesta a disposición por el CD27. A primera vista, se observan posibilidades sin igual en términos de mediciones, tanto en precisión como en posicionamiento de la información y resultados que limitan el impacto subjetivo de las mediciones visuales. De este modo, se pasa de un enfoque lineal visual (método 38-2) a un enfoque automático superficial.

Gráfico 4 : Una revolución en el ámbito de la inspección (extracto de una presentación en las Jornadas Técnicas de Carreteras 2020)



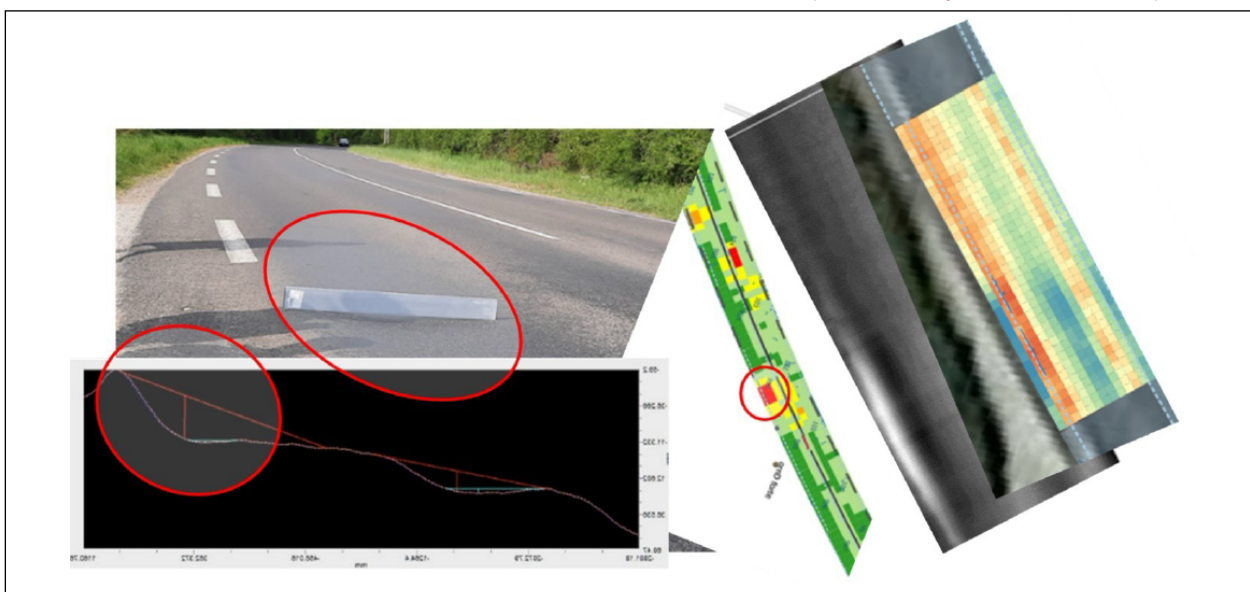
La continuación del proyecto ha permitido proponer una nueva metodología para el tratamiento y la cuantificación del deterioro de la calzada, teniendo en cuenta un nuevo enfoque superficial para la evaluación del deterioro.

A continuación, el trabajo consistió en describir las características mínimas del conjunto de descriptores disponibles proporcionados por los nuevos sensores en:

- Proponer normas para describir los daños que sean comprensibles para todos y fácilmente cuantificables y que puedan traducirse informáticamente;
- Proporcionar una localización superficial de los daños, es decir, permitir situar con precisión los daños en la superficie de la calzada. Este aspecto es importante a la hora de definir las soluciones de mantenimiento.

Tras este trabajo de descripción, los participantes en el proyecto pudieron proponer un nuevo método de clasificación de los daños. Este trabajo de clasificación fue necesario porque las definiciones «clásicas» de los deterioros proporcionadas en el método de ensayo LPC n.º 52, basadas esencialmente en descripciones generales complementadas con imágenes, no son aplicables a los métodos de adquisición automáticos. De hecho, no son lo suficientemente descriptivas, especialmente en lo que respecta a los aspectos geométricos y cuantitativos.

Gráfico 5 : Caracterización del estado de deformación con la herramienta LCMS® (créditos : Proyecto Nacional DVDC)



Se ha realizado un trabajo paralelo sobre las deformaciones, ya que estos dispositivos automáticos tienen la capacidad de medirlas tanto transversal como longitudinalmente. El enfoque de este trabajo, al igual que en el caso de los daños, consistió en realizar una evaluación superficial. De hecho, tradicionalmente, las variaciones significativas del perfil, que denominaremos deformaciones, se detectan y caracterizan mediante mediciones realizadas en algunas «trazas» o «líneas». Tras asegurarse de que los dispositivos tipo escáner eran capaces de restituir valores de in-

dicadores «estándar» con un nivel de precisión superior al ofrecido por los dispositivos de referencia, este estudio se centró en el desarrollo y la aplicación de varios enfoques metodológicos para analizar las deformaciones de forma superficial.

Durante la última fase del proyecto, estos enfoques se validaron en un tramo de la CD27 con el fin de ajustar los niveles de gravedad aprovechando la visión de un promotor.

Para más información:

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/022	Relevés automatiques (Mediciones automáticas)
DVDC/R/024	Connaissance du patrimoine routier départemental CD27 (Conocimiento del patrimonio viario departamental CD27)

1.2.1.2.2 - Relevés automatiques (Mediciones automáticas): ¿Qué niveles de rendimiento se pueden esperar?

Bajo el impulso de la ASFA (Asociación Francesa de Sociedades de Autopistas y Obras de Peaje), se han llevado a cabo pruebas cruzadas de equipos de detección automática de deterioros en un tramo de la red APRR con el fin de validar la precisión de las mediciones y los datos proporcionados por estas nuevas tecnologías y evaluar el impacto de los métodos de tratamiento utilizados por los diferentes operadores.

Estos trabajos constituyen una etapa esencial del proyecto, ya que permiten responder a las expectativas de los promotores, por un lado, de disponer de una continuidad en los resultados medidos en caso de cambio de operadores y, por otro lado, de garantizar la dispersión de las magnitudes medidas en función de los diferentes parámetros de ajuste y acondicionamiento.

Estos ensayos cruzados fueron una novedad en Europa y resultaron ser una medida esencial para

definir el marco metodológico de los registros realizados con los sensores «LCMS®», ampliamente utilizados en el mercado francés.

Este marco metodológico ha integrado los siguientes aspectos:

- Modalidades de adquisición de datos (instalación de sensores, homogeneidad de las versiones de los programas informáticos de adquisición, realización de mediciones);
- Modalidades de tratamiento de datos (homogeneización de los modos de cálculo, versión y configuración de la aplicación LCMS_Analyser®, etc.);
- Desarrollo de una plataforma de análisis y definición del uso estadístico de los datos (plataforma desarrollada por Cerema) según tres enfoques:
 - Explotación formalizada de datos brutos (Descripteurs Pavemetrics®),
 - Explotación de datos según la metodología de evaluación superficial de los daños (DVDC),
 - Explotación de datos en aplicación del pliego de condiciones propuesto por la ASFA.

Gráfico 6 : Ensayos cruzados realizados en marzo de 2021 en la red APRR (créditos fotos : Erolf Productions)



Como mínimo, estas pruebas pueden precisar mejor las condiciones de instalación y uso de los LCMS. Deben permitir establecer una configuración común.

Este trabajo aún no se ha finalizado.

Con el fin de reforzar los aspectos de «calibración» y «metrología», la elección de una sección común que se recorra cada año antes de las campañas, con presentación de los resultados a las SCA correspondientes, podría ser un primer paso antes de la sistematización de ensayos cruzados que podrían integrar la certificación de los aparatos de inspección.

Desde hace ya dos décadas, los sensores utilizados en el ámbito de la inspección de calzadas proceden de países extranjeros.

Una etiqueta otorgada por los servicios del Estado tendría la ventaja de tranquilizar a los promotores.

Estas pruebas también muestran, en relación con los resultados obtenidos en la fase 1, el impacto de los métodos de explotación propios de cada operador, puesto de manifiesto en la fase 3.

El innegable avance tecnológico de los LCMS no ha dado lugar, paralelamente, a una actualización de la doctrina. Cómo traducir un «agrietamiento significativo de la banda de rodadura» en un elemento concreto y matemático.

La llegada de la IA al campo de la evaluación del estado de las carreteras plantea la misma cuestión.

En conclusión, estas pruebas cruzadas contribuyeron, en forma de retroalimentación, a reforzar el dominio de este tipo de pruebas por parte de todos los participantes.

Los resultados de la fase 1 demuestran la calidad y el nivel de rendimiento de la tecnología LCMS®. También muestran las limitaciones cuando los operadores se ven restringidos a realizar solo seguimientos internos.

Los resultados de la fase 2 muestran la oportunidad de interpretar los resultados de manera diferente y constituyen un primer enfoque para evaluar con precisión el estado de deterioro de una calzada a nivel superficial.

Los resultados de la fase 3 muestran diferencias entre operadores en varios de los descriptores contabilizados, que están relacionados con diferentes factores de influencia, como la configuración de RoadInspect, los parámetros tenidos en cuenta para la contabilización de algunos descriptores, la metrología y la influencia de factores externos (condiciones meteorológicas durante el periodo de realización de las mediciones).

Todos los análisis estadísticos realizados están disponibles en los informes de las fases 1, 2 y 3, que pueden consultarse en el sitio web de DVDC.

Para más información:

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/032	Relevés automatisés : descripteurs dégradations et méthode de classification (Mediciones automatizadas: descriptores de deterioros y método de clasificación)
DVDC/R/036	Apport des appareils d'auscultation de type « scanner » pour la détection et la caractérisation en 3-D des déformations de chaussée routière (Aportación de los aparatos de inspección tipo «escáner» para la detección y caracterización en 3D de las deformaciones de la calzada)
DVDC/R/040	Relevés automatisés – Application in situ des descripteurs dégradations (Mediciones automatizadas: aplicación in situ de los descriptores de degradación)
DVDC/R/048A	Essais croisés LCMS (Ensayos cruzados LCMS). Exploitation des relevés ASFA (Phase 1) Explotación de mediciones ASFA (Fase 1)
DVDC/R/048B	Essais croisés LCMS (Ensayos cruzados LCMS). Exploitation des relevés ASFA (Phase 2) Explotación de mediciones ASFA (Fase 1)
DVDC/R/048C	Essais croisés LCMS (Ensayos cruzados LCMS). Exploitation des relevés ASFA (Phase 3) Explotación de mediciones ASFA (Fase 1)
DVDC/R/048D	Essais croisés LCMS (Ensayos cruzados LCMS). Exploitation des relevés ASFA (Synthèse) Explotación de mediciones ASFA (Resumen)

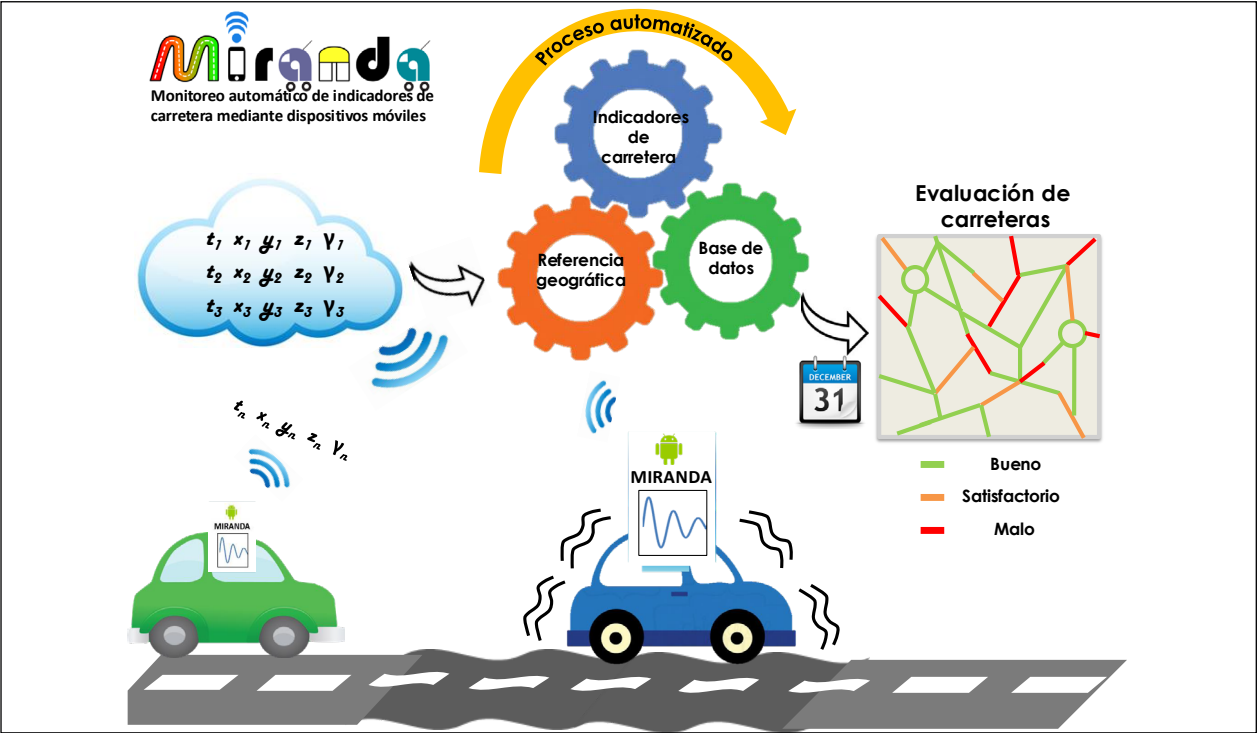
1.2.1.2.3 - Otros métodos de evaluación: el proyecto «Miranda»

Si bien las tecnologías mencionadas anteriormente son especialmente adecuadas para la inspección de una red estructural, conocer el estado de las redes secundarias sigue siendo un objetivo para muchos gestores. Los gestores desean disponer de herramientas fáciles de usar y automáticas que les permitan evaluar de forma resumida el estado de sus carreteras equipando su flota de vehículos (por ejemplo, vehículos de patrulla). El objetivo es, por un lado, obtener una imagen representativa de la red (especialmente de aquellas partes que rara vez se inspeccionan) y, por otro, utilizarla para priorizar la programación del mantenimiento.

El experimento Miranda, dirigido por la Universidad Gustave Eiffel (UGE) y llevado a cabo en el marco del proyecto DVDC, es un excelente ejemplo de las capacidades actuales de explotación de los datos de los sensores instalados en los vehículos.

La implementación en el CD27 del demostrador «Miranda» permitió demostrar que la aceleración vertical medida en el habitáculo de un vehículo desde un smartphone permite evaluar las deformaciones longitudinales de una red de transporte local. El uso de un sensor acelerómetro complementario situado cerca de una rueda (denominado «UniWheel») permitió obtener indicadores de equilibrio más precisos que los proporcionados por el smartphone y similares a los proporcionados por dispositivos de referencia como el Analizador de Perfil Largo (APL).

Gráfico : Proyecto Miranda - medición de indicadores viales automatizados mediante dispositivos móviles de inspección (Universidad Eiffel - Mast - Lames)



El seguimiento a lo largo del tiempo de este tipo de indicador puede ser de gran ayuda para supervisar la evolución del estado de las calzadas.

Para más información:

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/008	MIRANDA : mesure d'indicateurs routiers automatisée par appareils nomades d'auscultation : Expérimentation dans l'Eure (CD27) (MIRANDA: medición automatizada de indicadores viales mediante dispositivos móviles de inspección: Experimentación en Eure (CD27))
DVDC/R/023	MIRANDA : Evaluation d'un capteur de roue (UniWheel) / Expérimentation dans l'Eure (CD27) (MIRANDA: Evaluación de un sensor de rueda (UniWheel) / Experimento en Eure (CD27))

1.2.2 - Inspección estructural

1.2.2.1 - La deflexión de alto rendimiento

Además de estos importantes avances en la caracterización del estado de la superficie de una calzada, en los últimos diez años se ha producido otra revolución tecnológica: la capacidad de medir la deflexión con gran rendimiento en el flujo del tráfico. En los últimos 50 años, se han desarrollado numerosos equipos para medir las deflexiones de las superficies de revestimiento, que van desde dispositivos de rodamiento de baja velocidad hasta cargas dinámicas. Entre estos equipos se encuentran la viga Benkelman, el dynaflect, el deflectógrafo Lacroix (así como otros deflectógrafos de diseño similar), el curvímetro y el deflectómetro de caída de peso (FWD). Todos estos dispositivos realizan mediciones, ya sea colocados de forma estática en la calzada o desplazándose a baja velocidad.

El deflectómetro de alta velocidad (DGV) es el primer dispositivo de medición de la deflexión en producción regular, que realiza mediciones a una velocidad comparable a la de los demás usuarios de la carretera. Dado que se mide la respuesta de la calzada a una carga dinámica real, es probable que las mediciones DGV se acerquen más a la realidad que, por ejemplo, las mediciones FWD.

Tras desarrollar el primer prototipo a principios de la década de 1990, la empresa Greenwood Engineering, con sede en Dinamarca, ha fabricado más de diez deflectómetros de alta velocidad TSD que actualmente se utilizan en los siguientes países: Dinamarca, Reino Unido, Italia, Polonia, Sudáfrica, Australia, China, Estados Unidos y Alemania. Desde entonces, la empresa Dynatest también ha desarrollado un dispositivo que utiliza el mismo tipo de medición, cuyo nombre comercial es RAPTOR. Este dispositivo fue adquirido en 2019 por la empresa Ramboll, procedente de Suecia. Este material fue adquirido por el Cerema en 2023.

En el marco del proyecto DVDC, nos pareció pertinente examinar el potencial de este tipo de material analizando las experiencias internacionales, a pesar de nuestras diferencias de referencia, y llevando a cabo una campaña de pruebas cruzadas.

Por lo tanto, el proyecto DVDC llevó a cabo pruebas comparativas de dos sistemas de medición de la desviación de la carretera a alta velocidad: el TSD y el Raptor. Estos innovadores sistemas permiten realizar mediciones en condiciones normales de circulación, sin ralentizar el tráfico. Las pruebas, realizadas en un recorrido de 168 km que incluía una sección dedicada a la repetibilidad, revelaron disparidades en los valores de deflexión máxima medidos.

Estas diferencias parecen estar relacionadas con la rigidez de las calzadas: mayor concordancia en las estructuras flexibles. Se aplicaron tres métodos de análisis para comparar los resultados: clasificación por deciles, análisis por sumas acumuladas (enfoque FWD) y armonización de datos.

El método de sumas acumuladas identifica zonas homogéneas similares para ambos dispositivos, a pesar

de los diferentes valores brutos. La armonización de los datos mediante la estandarización muestra una gran similitud en las formas de las señales, lo que destaca la capacidad de ambos sistemas para caracterizar las variaciones de deflexión.

Sin embargo, el análisis por deciles revela diferencias en la clasificación, más marcadas en las calzadas rígidas. Esto pone de relieve la cuestión de la sensibilidad de los instrumentos y la necesidad de calibrar con precisión los umbrales de clasificación.

El informe concluye que, a pesar de las disparidades, la adecuación general es buena, anima a realizar ensayos complementarios sobre estructuras más flexibles y sugiere utilizar la información obtenida de la forma de los depósitos de deflexión para realizar un análisis más detallado.

Las mediciones obtenidas durante estas pruebas no se limitan a la deflexión máxima, ya que ambos dispositivos proporcionan datos mucho más completos:

- Proporcionan información sobre la cuenca de deflexión, al menos en un metro y medio;
- Proporcionan información sobre la asimetría de la cuenca alrededor de la carga, que se acentúa con la velocidad, cuando el material sometido a ensayo es viscoso;
- Permiten comprender el impacto de la velocidad de solicitado en la respuesta del cuerpo de la calzada;
- Proporcionan otros indicadores internacionales, derivados del FWD, con velocidades y rendimientos superiores (por ejemplo, SCI, BCI, BDI);
- Junto con un modelo mecánico fiel de la calzada (obtenido, por ejemplo, a partir de una medición RADAR o de datos históricos), permiten evaluar con gran eficacia el estado de una red aplicando a gran escala los principios de la guía «Diagnóstico y diseño de refuerzos de calzadas».

La comparación de los materiales puede continuarse mediante los demás indicadores aquí mencionados, siendo sin duda el más interesante la cuenca de deflexión medida.

De hecho, el uso de un modelo de cálculo viscoelástico junto con el uso de la cuenca medida, para cada punto de medición, debería permitir modelar con mayor precisión y fidelidad el comportamiento real de la calzada existente. Esto debería permitir evaluar la dispersión de los estados de la calzada e, idealmente, situarla en su vida útil, lo que a su vez debería poder alimentar los trabajos sobre las leyes de supervivencia de las calzadas. Estos trabajos, por su parte, podrán ser útiles para el arbitraje de políticas públicas.

En el momento de la publicación de este resumen, se han realizado nuevas pruebas en el recorrido de 168 km mencionado anteriormente. Los materiales implicados son, en particular, el Raptor adquirido por el Cerema

(Raptor n.º 3) y el MESAS de la BAST. Estos dos aparatos midieron las mismas secciones, respectivamente en 2023-2024 y 2024. El análisis de estos datos se llevará a cabo en el marco de otro trabajo y, en el mejor de los casos, debería dar lugar a nuevos usos, más completos, de las mediciones obtenidas con estos prometedores dispositivos.

Gráfico 8 : Campaña de ensayos cruzados de deflexión (extracto de una presentación en las Jornadas Técnicas de Carreteras 2023)



Para más información:

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/033	Mesures de Déflexions à grand rendement (Mediciones de deflexiones de alto rendimiento)
DVDC/R/050	Essais croisés des matériels de déflexion à grande vitesse (Ensayos cruzados de materiales de deflexión a alta velocidad)

1.2.2.2 - Enfoque Radar

El conocimiento de las estructuras de las calzadas y, más concretamente, del estado de las interfaces, constituye un verdadero reto a la hora de definir soluciones técnicas para el refuerzo de las calzadas. Sin embargo, esta información es difícil de obtener a escala de una sección, salvo mediante ensayos destructivos puntuales, como la extracción de muestras de calzadas. Por lo tanto, se llevó a cabo una reflexión con el fin de identificar los posibles medios a disposición de los gestores para caracterizar mejor sus estructuras de calzadas con el objetivo de mejorar la fiabilidad de los diagnósticos viarios.

El objetivo de este trabajo era mejorar, utilizar y explotar las mediciones de radar, en particular para caracterizar la integridad de las interfaces de las calzadas y,

más concretamente, analizar los posibles desordenes de las interfaces de las capas de las calzadas.

En este estudio, se realizó un análisis detallado de la señal a partir de datos obtenidos del radar de salto de frecuencia de banda muy ancha. Se han probado diferentes metodologías con datos procedentes de un experimento realizado en una carretera del departamento de Eure. Los resultados obtenidos demuestran el potencial de esta tecnología. Sin embargo, antes de poder implementarse por completo a escala de red, los métodos de tratamiento deben seguir evolucionando hacia una mayor automatización, en particular mediante el uso de la inteligencia artificial.

Para más información:

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/021	Méthodologie d'exploitation des mesures radar pour la caractérisation des interfaces de chaussées : approche expérimentale (Metodología de explotación de mediciones radar para la caracterización de interfaces de calzadas: enfoque experimental)

1.3 - Indicadores estructurales

En definitiva, los avances tecnológicos presentados anteriormente ponen de relieve las considerables mejoras en las herramientas de caracterización del estado superficial y estructural de una red viaria. De este modo, los gestores pueden obtener una descripción precisa del estado de deterioro de su red. Sin em-

bargo, esta descripción es demasiado detallada para permitir una evaluación a escala de una red de varios miles de kilómetros; para ello, es necesario definir indicadores de estado que permitan evaluar el nivel de deterioro de la calzada por tramos.

1.3.1 - Análisis de la situación actual

Los métodos de inspección de las redes viarias y la interpretación de los datos de inspección para definir indicadores pertinentes constituyen uno de los principales objetivos del proyecto DVDC.

Un primer trabajo realizado en el marco del proyecto permitió hacer un balance de los índices actuales del estado estructural de las calzadas. Por supuesto, no era posible ser exhaustivo, pero se analizaron diferentes enfoques que entran dentro del ámbito definido anteriormente: las redes nacionales francesas (red nacional no concesionada y autopistas concesionadas), las redes locales (departamentos, metrópolis, municipios) y las redes extranjeras comparables (Alemania). También se han tenido en cuenta las reflexiones y estudios realizados sobre el mismo tema a nivel europeo (en particular, el proyecto COST 354) e internacional (AIPCR, índices estadounidenses).

Se observa cierta diversidad en estos enfoques y en los métodos de cálculo de los índices de estado estructural. Detrás de esta diversidad, se distinguen algunas grandes constantes:

- Todos los índices estructurales se basan en primer lugar en el tratamiento de los daños superficiales pertinentes: fisuras por fatiga y deformaciones del perfil transversal;
- Algunos índices tienen en cuenta la uniformidad longitudinal;
- Algunos índices tienen en cuenta la deformabilidad de la superficie (deflexión);
- Los métodos más extendidos combinan estos indicadores en una suma ponderada; existen variantes, como los métodos de penalización;
- Los métodos técnico-financieros pasan por un análisis de los deterioros para determinar los trabajos que hay que realizar y, a continuación, cuantifican dichos trabajos para deducir una nota (ejemplo en Francia del IQRN en su versión 2).

1.3.2 - Propuesta de indicador estructural

La evolución de las tecnologías de auscultación, que permiten detectar daños y deformaciones en la superficie, está modificando los enfoques clásicos para proponer indicadores. En los últimos años, Cerema ha trabajado en un enfoque de evaluación superficial implementado para la red nacional denominado IQRN 3D, que se basa, en particular, en un enfoque de superficie unitaria. La ventaja añadida de este método es la posibilidad de detectar zonas muy localizadas que presentan debilidades estructurales y disponer de un mapa del nivel de deterioro de la calzada.

En el marco del proyecto DVDC, el grupo de trabajo ha destacado un tratamiento basado en los resultados obtenidos mediante la aplicación de una rejilla compuesta por cuadrados de 25 cm de lado, que permite conocer con gran precisión la posición y la densidad de los daños y deformaciones. Este enfoque puede ofrecer la posibilidad de establecer un vínculo con la aplicación de técnicas de mantenimiento, lo que también responde a las expectativas de los promotores.

Gráfico 9 : Descriptor de degradaciones propuesto en el marco del proyecto DVDC (créditos fotográficos: Proyecto Nacional DVDC)



Actualmente, y ante las demandas de los promotores, los proveedores equipados con estas nuevas tecnologías tienen la capacidad de procesar datos y responder a pliegos de condiciones que requieren métodos clásicos de tipo M2 y M3. Sin embargo, este enfoque es paradójico, ya que equivale a degradar la calidad de los datos proporcionados en las etapas previas.

El proyecto nacional de investigación DVDC propone, por lo tanto, un indicador estructural automatizado (ISa) que utiliza datos de sistemas de adquisición de tipo LCMS. Este indicador permite una evaluación objetiva y reproducible del estado de las calzadas.

El ISa se basa en el análisis combinado de fisuración y deformaciones. Se utiliza una malla elemental de 25 cm de lado para cuantificar y localizar estas patologías. Los algoritmos de procesamiento de imágenes permiten extraer información precisa sobre las fisuras, mientras que las deformaciones se analizan mediante métodos específicos, incluyendo mediciones de volumen por malla.

A continuación, unas tablas de decisión permiten clasificar la gravedad de los daños para cada malla. A continuación, se calcula un índice estructural por malla (ISm), teniendo en cuenta la gravedad combinada de las fisuras y las deformaciones. La agregación de los ISm en una sección determinada proporciona el indicador ISa, expresado en cuatro niveles: bueno, bastante bueno, bastante malo y malo.

Este enfoque automatizado ofrece una alternativa eficaz a los métodos de evaluación tradicionales, pero cabe señalar que en el anexo 5.1 del informe de investigación se propone un cálculo del indicador estructural basado en una misma metodología que combina los deterioros y las deformaciones tal y como pueden

abordarse mediante estos métodos tradicionales (por ejemplo, inspección visual y deflexiones).

El ISa se integra en un enfoque más global desarrollado por el proyecto DVDC, que incluye un indicador estructural estándar (IS) más flexible y adaptable a diferentes contextos. Se llevarán a cabo trabajos complementarios tras el proyecto DVDC con el fin de validar y calibrar el ISa en un conjunto de datos más amplio y explorar su potencial de integración en los sistemas de gestión patrimonial.

La continuación del DVDC debe permitir encontrar un punto de convergencia y crear un verdadero procedimiento operativo para el tratamiento de los registros automáticos en relación con las nuevas posibilidades.

Más allá de los modelos de leyes del envejecimiento, la observación «naturalista» del gestor sigue siendo esencial en su estrategia de mantenimiento. Las calzadas sufren condiciones climáticas y geotécnicas adversas (por ejemplo, contracción-expansión de las arcillas) que son difíciles de modelar y que se pueden considerar cada vez más frecuentes.

En términos de gestión patrimonial, también es importante disponer de indicadores que reflejen la evolución del deterioro y no solo el estado en un momento dado.

En este sentido, las universidades de Limoges y Gustave Eiffel han propuesto principios metodológicos que permiten modelar la evolución de los daños en diferentes secciones de una red. El interés de este enfoque radica en que es «abierto» y, en teoría, permite integrar cualquier tipo de deterioro mediante un enfoque geoestadístico que, a largo plazo, podría combinarse con la inteligencia artificial.

Para más información:

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/012	Etude sur les indices structurels (Estudio sobre los índices estructurales)
DVDC/R/0047	Relevés automatisés : contribution à l'élaboration d'un indicateur structurel (Registros automatizados: contribución a la elaboración de un indicador estructural)

1.4 - Conclusión - Para ir más allá

Los nuevos dispositivos de medición o registro enriquecen el conocimiento del estado de una calzada, pero complican, de hecho, la elaboración de un indicador común que supuestamente agrega estos datos para ofrecer una imagen lo más objetiva posible del estado general de la calzada. El registro de daños es un ejemplo emblemático de esta evolución tecnológica. Se puede realizar de forma «manual», a simple vista, según un método 38.2 actualizado durante el proyecto nacional, pero también se puede realizar de forma «automatizada» con herramientas más eficaces, aunque sigue siendo necesaria la supervisión de un experto. Los descriptores obtenidos mediante el método «manual» o el método «automatizado» no son estrictamente idénticos y, por lo tanto, proporcionarán información diferente sobre el estado de la calzada.

En cuanto a los registros de daños «automatizados», la tecnología de algunos dispositivos, como los sensores de imágenes láser comúnmente conocidos como «LCMS » (Laser Cracks Measurement System) mencionados anteriormente, ya estaban listos, pero no habían sido objeto de evaluación mediante ensayos cruzados, como fue el caso del estudio sobre tramos de autopista en colaboración con la ASFA (Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes).

La evolución tecnológica de los aparatos de auscultación ha avanzado muy rápidamente en los últimos años. El proyecto nacional DVDC, los trabajos realizados por el Cerema en el marco del IQRN3D y del proyecto Gestión de la Red Departamental – GRD (proyecto llevado a cabo en colaboración con diez departamentos), así como los trabajos de la sección «auditoría y diagnóstico de calzadas» de Routes de France contribuyen a racionalizar sus usos. Ya podemos proyectarnos hacia el futuro con la aportación de la IA, en particular, y estar seguros de que muchos de los trabajos derivados de estos diferentes proyectos tendrán continuidad en un nuevo marco.

2 - ESCALA DE LA ESTRUCTURA DE LA CALZADA

En el proyecto nacional DVDC, la escala de la estructura de la calzada está, naturalmente, muy relacionada con el tema del dimensionamiento de las calzadas. Las principales contribuciones del proyecto a esta escala son las siguientes:

- Análisis detallados del estado actual de la técnica que se han centrado en dos temas concretos del diseño y dimensionamiento de calzadas: i) la prescripción de las capas de rodadura en función de la deflexión del soporte y ii) la consideración de la capacidad de carga de las plataformas y los materiales granulares en el dimensionamiento de pavimentos flexibles y carreteras sin revestimiento.

- Herramientas para la ingeniería vial, accesibles a la comunidad vial: i) el desarrollo de una nueva metodología destinada a caracterizar el nivel de adhesión de las capas in situ (incluido el desarrollo de una prueba y la reflexión sobre los umbrales de rendimiento) y ii) el desarrollo de un modelo de elementos finitos de los diferentes desórdenes en una estructura que tendrían un impacto (fisuras, defectos de adhesión) en las cuencas de deflexión
- Investigación para desarrollar herramientas de dimensionamiento mejoradas, que combinen la mecánica de calzadas con: i) un enfoque probabilístico, ii) la mecánica de la rotura (iniciación y propagación de fisuras) y iii) la mecánica del contacto (tribología)

2.1 - Análisis del estado actual

2.1.1 - Plataformas y materiales granulares en el dimensionamiento de pavimentos flexibles y carreteras sin revestir

Las calzadas flexibles constituyen una parte esencial del patrimonio viario francés e internacional. Su vida útil está íntimamente ligada a la de las capas granulares que actúan como base.

Un informe de unas cien páginas presenta el análisis bibliográfico de los diferentes métodos de dimensionamiento de pavimentos flexibles y carreteras sin asfaltar a nivel internacional, basándose en 22 guías o catálogos de dimensionamiento. El análisis tiene

como objetivo describir la calidad de la capacidad portante de las plataformas y describir cómo se tienen en cuenta los materiales granulares (las capas inferiores de las calzadas) en el dimensionamiento.

Estos trabajos permiten, en particular, elaborar una síntesis de las principales hipótesis retenidas en los diferentes métodos estudiados (se proporciona un extracto de esta síntesis en Figure 10 para los métodos y Figure 11 para los catálogos).

Gráfico 10 : Extracto de las hipótesis de dimensionamiento de los métodos

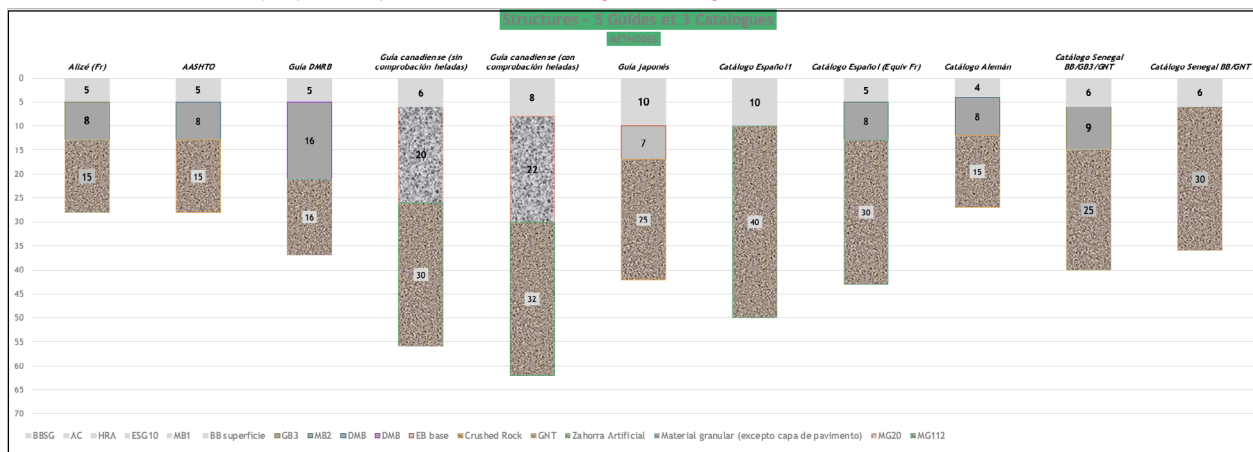
Parámetro	Guía/Manual							
	Americano (AASHTO 1993)	Inglés (DMRB 2006)	Belga (CRR - R 49/83)	Canadiense (AASHTO 1993)	Australiano (AUSTROADS Part 2 - 2012)	Brasileño (Manual de Pavimentação DNIT 2006)	Japonés (Handbook of Asphalt Pavement 2019)	CEBTP (1984)
Tipo de método	Empírico	Empírico	Análítico	Empírico	Análítico	Empírico	Empírico	
Eje/carga de referencia	8,16t	8,16t	13t	8,16t	8,16t	8,16t	Eje de referencia 10 t (pero para la clase de tráfico, la carga de referencia es de 5 t).	13t
Soporte del suelo/CBR (criterio)	Cálculo módulo por CBRsol support	Cálculo módulo por CBRsol support	Cálculo del módulo por CBRsol soporte/tipo de suelo y condiciones de drenaje	Cálculo módulo por CBRsol support	Cálculo módulo por CBRsol support	CBRsol support	Cálculo módulo por CBRsol support	Cálculo módulo por CBRsol support(95% OPM)
Clases:	MR (psi) = 750 a 3000 x CBR; MR (psi) = 1500 x CBR si CBR < 10%, es decir MR (MPa) = 10.3 x CBR; MR (psi) = 2555 x CBR ¹⁰⁶ si materiales finos es decir MR (MPa) = 17.6 x CBR ¹⁰⁶ MR (psi) = 3000 x CBR ¹⁰⁶ es decir MR (MPa) = 20.7 x CBR ¹⁰⁶ [AASHTO 2002]	Clase 1 - E = 50 MPa Clase 2 - E = 100 MPa Clase 3 - E = 200 MPa Clase 4 - E = 400 MPa	E = 10 x CBR El módulo del suelo se determina a partir del tipo de suelo y sus condiciones de drenabilidad. No hay clases de plataforma bien definidas, aunque se definen tramos de EV2 (10 MPa, 20 MPa, 30 MPa, 40 MPa, 60 MPa y 80 MPa)	MR (MPa) = 17.6 x CBR 0.64 ² / Tener en cuenta los efectos estacionales	E = 10 x CBR, avec max = 150 MPa (atención especial a la densidad y w de ensayo)	Rectas de CBR del suelo en el ábaco NxEspesor total: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 12, 15 y 20	No hay clases, sino rangos de valores de CBR (se toma el límite inferior del rango): 2 a 3 3 a 4 4 a 6 6 a 8 a 12 12 a 20 >20	S1 - E = 25 MPa S2 - E = 50 MPa S3 - E = 75 MPa S4 - E = 150 MPa S5 - E = 300 MPa S1 < 5% S2 < 10% S3 < 15% S4 < 30% S5 > 30% Si CBR < 5, se sustituye en 50 cm siempre que sea posible
Capa de GNTassise								
Espesor	150 cm (una sola capa)	de 15 a 60 cm	Min. 15 cm	MG112 = 50mm - 100mm y + MG20 = 50mm - 200mm y +	Min 10 cm	10 a 20 cm	Min 7cm y max. 3xD	Min 15 cm
Exigencia mecánica	Capa base: en general, el coeficiente a2 que se tiene en cuenta en el dimensionamiento es igual a 0,14, un valor de CBR = 100 % y un módulo de 30 000 psi (210 MPa). Capa cimientos: en general, el coeficiente a3 que se tiene en cuenta en el dimensionamiento es igual a 0,11, un valor de CBR = 30 % y un módulo de 20 000 psi (100 MPa). Estos valores deben ajustarse en función de los materiales disponibles y según el gráfico presentado en el	Función de la clase de la plataforma	Ebase = 400 a 600 Mpa Ecimientos= 200 a 300 Mpa	E _{MG112} = 90 a 110 MPa E _{MG20} = 125 a 290 MPa	Medido con ensayo triaxial: GNT bajo BB de espesor reducido = 250 MPa (cimentación), 300, 350 o 500 MPa (base: según la calidad del GNT). E GNT bajo materiales tratados = 150 a 350 MPa (calidad normal), en función del espesor y del módulo equivalente de los materiales tratados que lo recubren.	Capa base granular - CBRmini = 60 % Capa de fundación - CBRmini = 20 %	Capa base granular - CBR modificado mínimo = 80 % Capa de fundación (subbase) - CBR modificado mínimo = 20 %, 30 %	E = 5 CBR (materiales con elementos gruesos) E = 3 CBR (materiales con alta fracción fina) E = 300 MPa (GNT) E = 500 MPa (GNT triturada capa base)
Características granulométricas	0/37,5, 0/25, 0/19	0/ 45-0-63-0/ 80	0/16; 0/32; 0/40	MG20 0/20 MG112 0/112	0/20; 0/40	GNT base - % pass 0.075mm < 2/3 pass 0,425mm / LA ≤ 50	M (crushed stone) 40; M30; M25; C (Crusher-run) 20; C30; C40	0/40; 0/31,5

Gráfico 11 : Extracto de las hipótesis de dimensionamiento de los catálogos

Parámetro	Catálogo						
	Road Note 31 (1993)	África del sur (Catálogo SATCC 2001)	Argelia (Catálogo 2000)		Español (Catálogo Norma 6,1IC Secciones de formas)	Senegal	Alemania (Catálogo RstO 12 2015)
Eje/carga de referencia	8,16t	8,16t	13t		13t	13t	10t
Soporte del suelo/CBR (criterio)	Cálculo módulo por CBRsol support(95% OPM)	Cálculo módulo por CBRsol support	Capacidad de carga de la plataforma y CBR (95%OPM)		Cálculo módulo por CBRsol support	Capacidad de carga de la plataforma y CBR	Capacidad de carga de la plataforma
Clases:	S1 = 2% 3% ≤ S2 ≤ 4% 5% ≤ S3 ≤ 7% 8% ≤ S4 ≤ 14% 15% < S5 ≤ 29% S6 = 30%.	S1 = 2% 3% ≤ S2 ≤ 4% 5% ≤ S3 ≤ 7% 8% ≤ S4 ≤ 14% 15% < S5 ≤ 29% S6 = 30%.	E = 5x CBR S4 - E = 14 MPa S3 - E = 25 MPa S2 - E = 50 MPa S1 - E = 125 Mpa S0 - E = 200 MPa	S1 < 5% S2 < 10% S3 < 25% S4 < 40% S5 > 40%	E1 - EV2>60MPa / d ≤ 250MPa E2 - EV2>120MPa / d ≤ 200 MPa E3 - EV2>300MPa / d ≤ 150 MPa	E = 5 x CBR PF1 - Emin 20 MPa / EV2>30MPa / d ≤ 300MPa / CBR min 5% PF2 - Emin 50 MPa /EV2>80MPa / d ≤ 200 MPa (80 MPa traitée) / CBR min 10% PF2qs - Emin 80 MPa /EV2>100MPa / d ≤ 120 Mpa (70 MPa tratada) / CBR min 15% PF3 - Emin 120 MPa /EV2>120MPa / d ≤ 90 MPa (60 MPa tratada)/ CBR min 25% PF4 - Emin MPa /EV2>200MPa / d ≤ 50 MPa tratada MPa / CBR min 40%	En el catálogo alemán, todas las estructuras se dimensionan considerando un EV2 ≥ 45 MPa. Por lo tanto, no hay realmente una clasificación. La clasificación se refiere más bien a la sensibilidad de los suelos a las heladas (F1, F2 y F3).
Couche de GNTassise							
Espesor	Min. 15 cm	Min. 15 cm	Min. 15 cm		20 a 30 cm	GNT 0/14 = 10 cm GNT 0/20 = 15 cm GNT 0/31,5 = 20 cm	Función del módulo de 15 a 35 cm
Exigencia mecánica	Caracterización mediante PI y CBR PI < 6 y CBR > 30	CBR > 30 - cimentación CBR > 80 - base	E = 500 MPa (GNTbase), E = 2.5 x Ecapa inf (GNTfundación)		No aparece en el catálogo	E = 500 MPa (GNTbase), E = 3 x Ecapa inf (GNTfundación) mediante capa de 25 cm máximo, con un límite máx de 600 MPa en estructura GNT/ GNT, 360 MPa en estructura GNT/GB	80 a 180 Mpa
Características granulométricas	0/37,5 0/28 0/20	0/50 0/37,5	0/20 0/31 ,5		No aparece en el catálogo	GNT 0/14 GNT 0/20 GNT 0/31,5	0/45
Riesgo de cálculo	No aparece en el catálogo	No aparece en el catálogo	No aparece en el catálogo		No aparece en el catálogo	5% y 25 %	No aparece en el catálogo
Criterios adicionales (drenaje/periodicidad de los mantenimientos)	Consideración del nivel freático en función de las estaciones (pluviometría)	Coefficiente según la zona climática	Primera revisión: entre 8 y 10 años.		El catálogo propone tener en cuenta tres zonas climáticas en función de la pluviometría, pero solo para los aglomerados drenantes.	La periodicidad no se trata en el catálogo, pero se recomienda un plan trienal para comparar los parámetros económicos y las auscultaciones en las redes viarias senegalesas.	coeficiente según la zona climática (aumento o disminución del espesor total)
Temperatura de referencia	30 °C	No se menciona, pero las fichas de estructuras se dividen en región seca y región húmeda	No se menciona, pero en el catálogo se definen 4 zonas climáticas.		No se menciona, pero en el catálogo se definen 3 zonas climáticas.	34 °C	No se menciona, pero se tiene en cuenta la zona climática para definir el espesor total de la calzada.

También se ofrece una perspectiva de ocho métodos (guías y catálogos combinados) aplicados, en la medida de lo posible, a un mismo caso de referencia. El gráfico Figure 12 ilustra esta comparación.

Gráfico 12: Resumen de ejemplos de aplicación de 8 métodos/guías/catálogos - Estructura 5BB/8GB3/15GNT/PF2



Este estudio bibliográfico permite destacar recomendaciones que apuntan a la importancia que se debe otorgar al comportamiento real de los materiales viarios para garantizar una mayor durabilidad de nuestras estructuras viarias. Independientemente del método de dimensionamiento utilizado, la experiencia

local sigue siendo fundamental, así como la revisión periódica de estos modelos para tener en cuenta las observaciones sobre el terreno y el comportamiento de los nuevos materiales utilizados (aglutinantes modificados, fresados de aglomerados, aglomerados templados, aglomerados en frío, etc.)

Para más información:

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/010	Etude expérimentale sur le comportement élastoplastique du matériau granulaire de Bréfauchet à différents états hydriques initiaux (Estudio experimental sobre el comportamiento elastoplástico del material granular de Bréfauchet en diferentes estados hídricos iniciales)
DVDC/R/016	Synthèse des méthodes de dimensionnement de chaussées souples / routes non revêtues à l'international (Resumen de los métodos internacionales de dimensionamiento de pavimentos flexibles/carreteras sin asfaltar)
DVDC/R/045	Etude de l'incidence du comportement réel de matériaux non liés (GNT et sols) sur le dimensionnement des chaussées à faible trafic (Estudio del impacto del comportamiento real de materiales no ligados (GNT y suelos) en el dimensionamiento de carreteras con poco tráfico)

2.2 - Herramientas para la ingeniería vial

2.2.1 - Nueva metodología destinada a caracterizar el nivel de adhesión de las capas in situ

La adhesión de las capas en las interfaces se ha integrado, de forma simplificada, desde hace mucho tiempo en los modelos de dimensionamiento habitualmente utilizados; el desprendimiento de las capas es uno de los mecanismos de deterioro reconocidos y citados con frecuencia, pero a veces muy difícil de comprender físicamente mediante un ensayo representativo. Una norma europea de ensayos EN 12697-

48, en fase de estudio desde 2011 y validada en 2021, propone diferentes ensayos (principalmente en laboratorio), pero ninguno de ellos cuenta actualmente con un consenso real.

El proyecto nacional se ha centrado en el desarrollo de una nueva prueba in situ capaz de determinar los diferentes niveles de adhesión de las capas. El trabajo

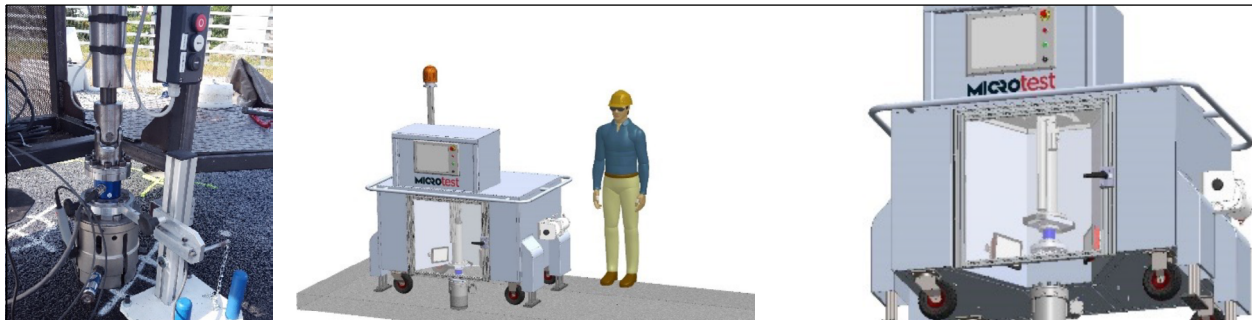
se inició a partir de un primer prototipo desarrollado por Pérennise Chaussée que permitía probar la interfaz entre dos aglomerados mediante una prueba de torsión controlada (control por N.m/s), más fiable que un destornillador o una llave dinamométrica. Los ensayos de laboratorio realizados en estructuras conocidas y controladas (BBSG 010 sobre GB0/10 con emulsión bituminosa pura o modificada), a temperaturas fijas (10, 20 y 30 °C), permitieron mejorar esta primera herramienta y definir condiciones de ensayo fiables. Las pruebas realizadas en diferentes obras, en condiciones climáticas variadas, han completado y enriquecido este análisis. El control de la temperatura de las pruebas sobre el terreno sigue siendo un punto importante al que hay que prestar atención, y se ha propuesto un procedimiento para garantizarlo, a falta de fijarlo.

Cabe señalar que la prueba no es necesariamente destructiva y puede llevar a determinar que el nivel de adhesión es suficiente, sin rotura. A partir del

primer prototipo (Figure 13) y de los prometedores resultados de los ensayos, se pudieron establecer unas especificaciones técnicas con los primeros resultados en un seminario abierto a los profesionales del sector (artículo RGRA).

Paralelamente, se llevó a cabo una encuesta entre los laboratorios homologados por Laboroute sobre este dispositivo de medición. En ambos casos se observa un interés real por este tipo de ensayo sobre el terreno, gracias al coste moderado del aparato, su ergonomía y la rapidez de ejecución en obras con mucho tráfico. Tras consultar a diferentes proveedores y diseñadores de equipos, se ha validado una solución que se ajusta al pliego de condiciones. Aunque la definición de especificaciones mínimas que califican la unión de capas aún es muy prematura, este trabajo permite avanzar y precisar la posición francesa sobre la evaluación de interfaces, lo que también constituye un hito muy importante que debe proseguirse en un nuevo marco.

Gráfico 13 : Detalle del prototipo de torsión DVDC GT1.3 en el banco de pruebas de fatiga de Nantes (Fuente: Colas) y maqueta del dispositivo finalizado propuesto por Proviteq/Microtest



Paralelamente a este trabajo experimental, se ha emprendido un enfoque teórico con el objetivo de abordar la resistencia a la fatiga de la interfaz pegada in situ a partir de su resistencia al cizallamiento en un ensayo monótono de cizallamiento por torsión. La complejidad de los fenómenos y la necesidad de numerosas hipótesis no permiten obtener valores suficientemente sólidos y requerirían disponer de los resultados de numerosas pruebas complementarias.

Para más información:

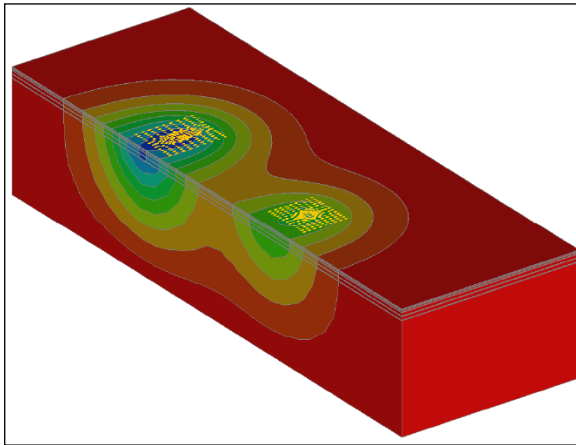
Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/014	Vers une caractérisation performantielle in situ des interfaces des couches de surface (Hacia una caracterización in situ del rendimiento de las interfaces de las capas superficiales)
DVDC/R/017	Evaluation du dispositif de mesure de collage des couches d'enrobés in situ par torsion (Hacia una caracterización in situ del rendimiento de las interfaces de las capas superficiales)
DVDC/R/030	Vers une caractérisation performantielle, in situ, des interfaces des couches de surface - Evaluation du dispositif de mesure de collage des couches d'enrobés in situ par torsion (Hacia una caracterización in situ del rendimiento de las interfaces de las capas superficiales - Evaluación del dispositivo de medición de la adhesión de las capas de aglomerado in situ mediante torsión)
DVDC/R/034	Collage des couches d'enrobés - Elaboration d'un seuil de rupture pour essai in situ en cisaillement (Pegado de capas de aglomerado - Elaboración de un umbral de rotura para ensayo in situ en cizallamiento)
DVDC/R/042	Vers une caractérisation performantielle, in situ, des interfaces des couches de surface. (Hacia una caracterización in situ del rendimiento de las interfaces de las capas superficiales.)

2.2.2 - Modelo de elementos finitos de los diferentes desordenes en una estructura que influyen en las cuencas de deflexión

Pavement monitoring plays a crucial role in effective La inspección de las calzadas desempeña un papel determinante en la gestión del patrimonio. Sin embargo, es necesario ser capaz de establecer la relación entre las observaciones sobre el terreno y el estado real de la estructura.

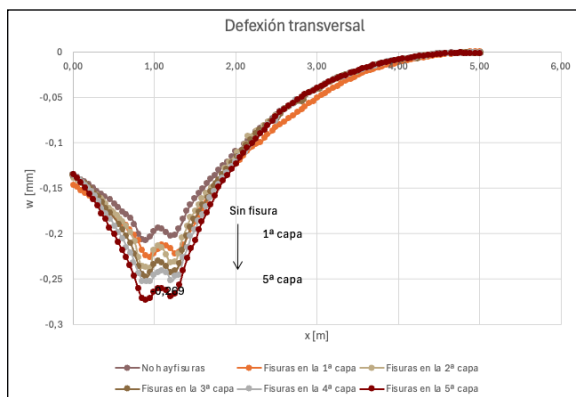
Para ello, los investigadores decidieron desarrollar un modelo de elementos finitos, ilustrado en el Figure 14, que integra los diferentes desórdenes estructurales que podrían afectar a las cuencas de deflexión: desprendimiento entre capas, fisura vertical y variación de espesor.

Gráfico 14: Ilustración de la respuesta del modelo de elementos finitos en respuesta a una carga vial.



El Figure 15 proporciona un resultado básico del modelo aplicado a un caso de fisura vertical a diferentes profundidades en la estructura.

Gráfico 15: Ejemplo del impacto de la presencia de una fisura vertical a diferentes profundidades sobre la deflexión transversal



Las principales conclusiones de este estudio son:

- En el caso de las fisuras longitudinales verticales, cuanto más profunda es la capa que se fisura, mayor es el efecto sobre la cuenca de deflexión. La deflexión longitudinal detectada mediante un cálculo de tipo curvímetro sigue esta evolución. Estas tendencias se amplifican considerablemente cuando se consideran fisuras longitudinales largas.
- La deflexión relativa máxima (comparación entre fisurado y no fisurado) resultante de una medición longitudinal teórica (cálculo por elementos finitos) o estimada mediante un cálculo de tipo curvímetro es idéntica para los pavimentos flexibles (CS1 o CS2), lo que genera una diferencia relativa mínima (inferior al 10 %), lo que confirma el escaso interés de este dispositivo para esta categoría de estructura y este tipo de medición. El cálculo de la pendiente de la cuenca de deflexión con pasos de medición cada 0,1 m permitiría detectar estas discontinuidades debido al contraste de rigidez. En esta categoría de pavimentos se tiende a observar siempre deflexiones relativas máximas homogéneas en el espesor de estas estructuras. Los niveles máximos de deflexión relativa son, como máximo, del orden de 3,5/100 mm, en el límite de lo detectable.
- Para la calzada asfáltica gruesa estudiada, la deflexión relativa máxima fluctúa de la misma manera para la simulación con elementos finitos y el cálculo mediante el método del curvímetro. La amplitud de variación de la deflexión relativa máxima es mayor cuando se calcula utilizando el método curvímetro. Los niveles de deflexión relativa máxima son de un máximo de 4,4/100 mm para las capas más profundas, siendo esta magnitud detectable.
- La comparación realizada permite constatar que un cálculo de tipo curvímetro tiene una sensibilidad satisfactoria que permite recuperar la del depósito de deflexión absoluta con una desviación relativa del 33 % con respecto a la estructura sin fisuras.

Este estudio tiene como objetivo acompañar el diagnóstico tras los seguimientos de inspección. Puede estar destinado a oficinas de estudios o a promotores inmobiliarios. A más largo plazo, estos trabajos podrán inspirar el apartado «estructura» del gemelo digital de la obra de pavimentación, sin olvidar el apartado «materiales».

Los trabajos realizados también pueden constituir casos de referencia para la profesión.

Para más información:

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/005	Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées. Modèles de dégradation des structures (Evaluación de la vida útil residual de las calzadas. Modelos de degradación de estructuras)

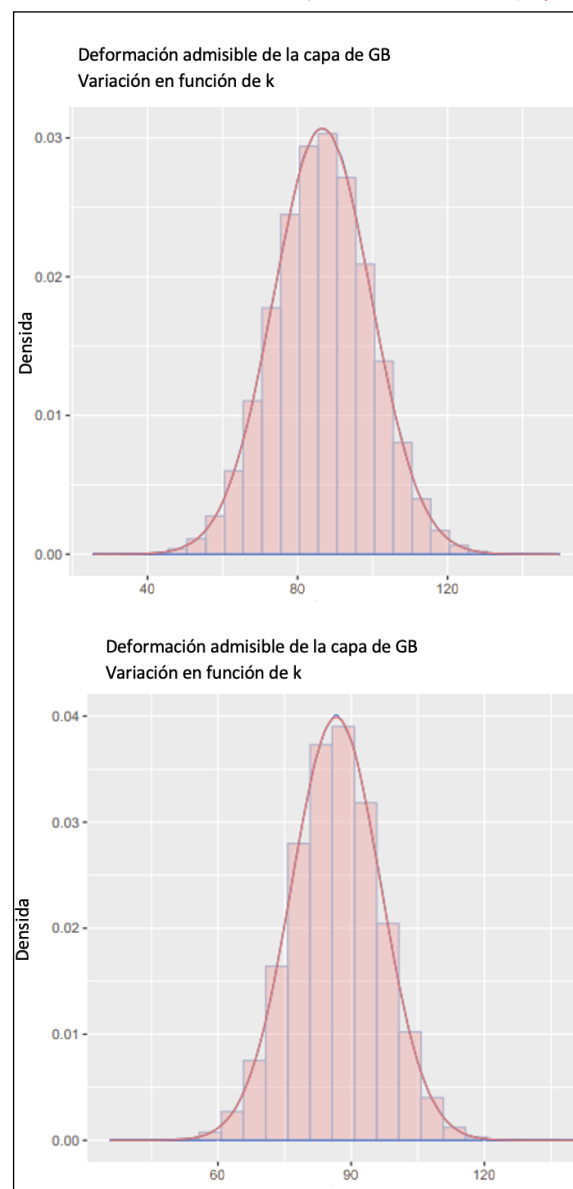
2.3 - Hacia modelos mecánicos enriquecidos

2.3.1 - Modelización estadística de los mecanismos físicos combinados de degradación de la calzada

Estos trabajos preliminares sientan las bases para la introducción de enfoques estadísticos en los métodos de dimensionamiento vigentes. Esta contribución científica presenta:

- Consideración de la variabilidad de los datos relativos al mantenimiento de carreteras, con dos enfoques diferentes: la regresión no lineal mixta y los modelos de aprendizaje automático.
- Consideración de la variabilidad en el diseño de la estructura de la calzada (ilustrado en un parámetro de dimensionamiento Figure 16)
 - Este estudio pone de relieve el papel más o menos importante que desempeñan tres parámetros del modelo de dimensionamiento: la dispersión en el espesor de una capa y los coeficientes k_s y k_c elegidos por el investigador.
 - También ilustra la variabilidad observada en las restricciones cuando se asignan distribuciones de probabilidad a determinados parámetros de entrada del modelo. La última pregunta que se plantea es la del impacto de las variaciones en los espesores de capa recomendados por la Guía de dimensionamiento francesa

Gráfico 16 : Ilustración de un modelo mecánico probabilístico acoplado aplicado a la descripción de la deformación de la GB en función de la variación de los parámetros de diseño (k_c y k_s)



Aunque estos trabajos no han concluido, esta contribución proporciona los códigos fuente que permiten continuar con la investigación combinando la potencia del análisis probabilístico con herramientas mecánicas como el núcleo de cálculo del modelo Alizé.

Para más información :

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/006	Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées Aspects probabilistes - Etat de l'art (Evaluación de la vida útil residual de las calzadas Aspectos probabilísticos: estado actual de la técnica)

2.3.2 - Modelización mecánica con mecanismo de iniciación y propagación de fisuras

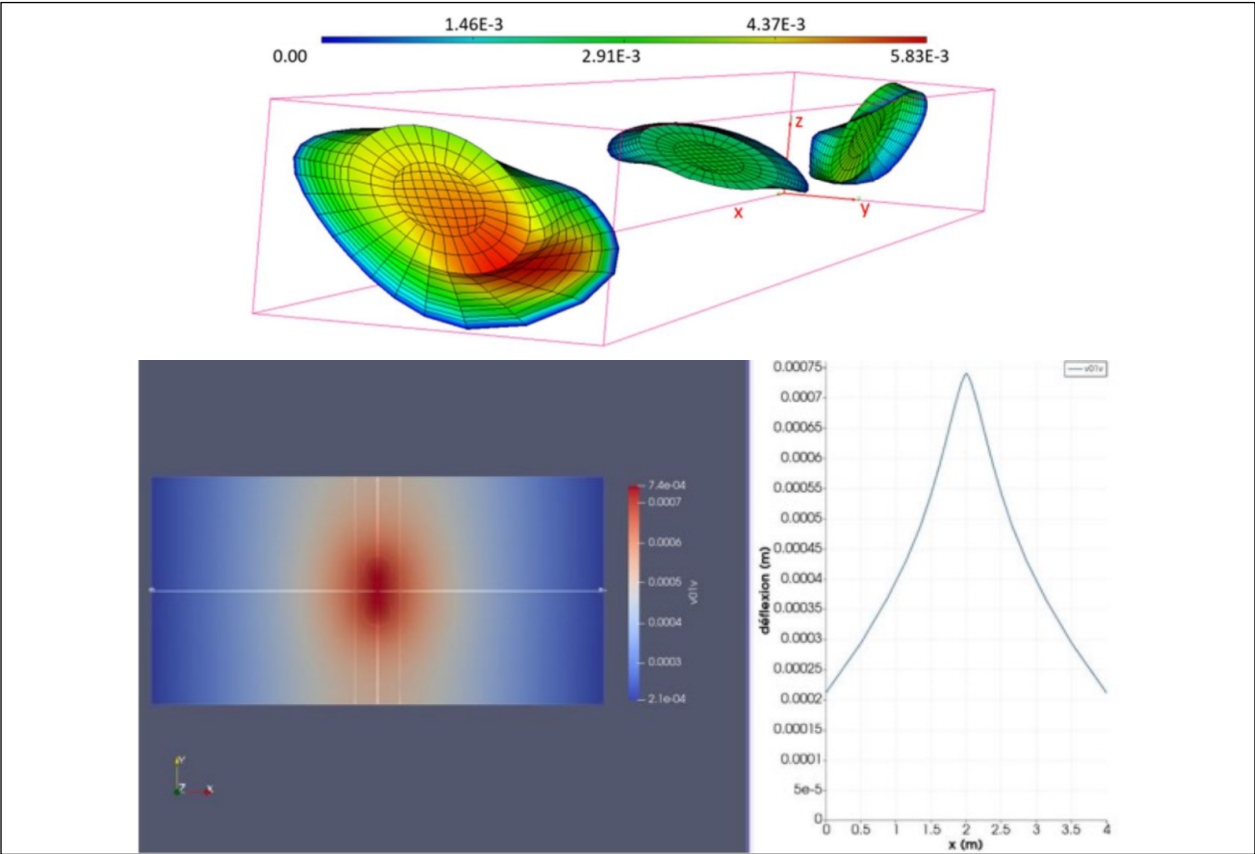
Con el tiempo, la estructura de la calzada se degrada. Entre los problemas que se desarrollan, las grietas y el desprendimiento de la interfaz ocupan un lugar destacado.

Para tener en cuenta estos desperfectos en las herramientas de diseño de pavimentos, los ingenieros recurren a métodos de penalización (reducción fija) del rendimiento de las capas dañadas. El objetivo es adoptar hipótesis realistas con los medios dis-

ponibles para prescribir las mejores soluciones de mantenimiento.

Dos equipos de investigación continuaron desarrollando herramientas digitales que permiten tener en cuenta de manera física, y no a tanto alzado, las fisuras presentes en la estructura de la calzada (ilustraciones en Figure 17). Cabe señalar que los trabajos del INSA de Estrasburgo se llevaron a cabo basándose también en el proyecto SOLDUGRI.

Gráfico 17 : Ilustración de los dos modelos mecánicos con mecanismo de iniciación y propagación de fisuras: arriba, propagación automática de una fisura en el cuerpo de una calzada; abajo, comparación de un modelo con la deflexión en el simulador de tráfico acelerado FABAC.



Para más información:

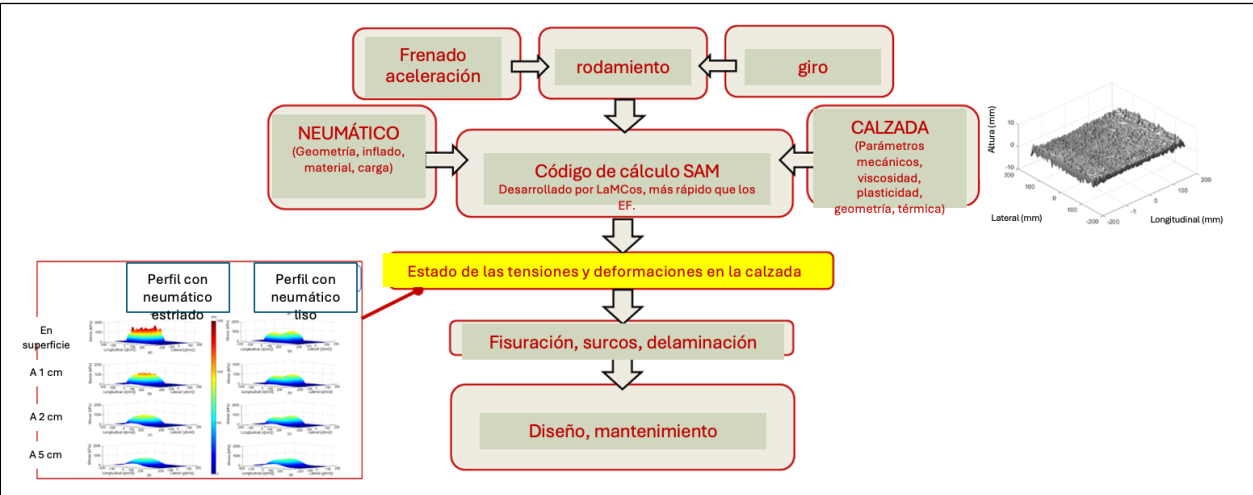
Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/020	Modèles probabilistes de dimensionnement des chaussées (Modelos probabilísticos para el dimensionamiento de pavimentos)
DVDC/R/026	Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées - Modèles de dégradation des structures (Evaluación de la vida útil residual de las calzadas - Modelos de degradación de las estructuras)
DVDC/R/029	Modélisation numérique 3D de l'endommagement des chaussées par modèle M4-5n : fissuration & décollements d'interface (Modelización numérica 3D del deterioro de las calzadas mediante el modelo M4-5n: fisuración y desprendimientos de la interfaz)
DVDC/R/035	Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées - Modèles de dégradation des structures (compléments) (Evaluación de la vida útil residual de las calzadas - Modelos de degradación de las estructuras (complementos))

2.3.3 - Modelización mecánica teniendo en cuenta el contacto entre el neumático y la calzada (tribología)

Entre las patologías observadas en las estructuras de la calzada, además de los conocidos problemas de fisuras ascendentes y surcos, ahora se observa la aparición de fisuras descendentes (top down cracking).

Investigadores de la Universidad de Limoges proponen un enfoque mecánico basado en modelos derivados de la ciencia del contacto (tribología) para estudiar esta patología. Este enfoque original se basa en una ANR (MACADAM) anterior al proyecto DVDC. Se desarrolla principalmente combinando diferentes técnicas ilustradas en el Figure 18.

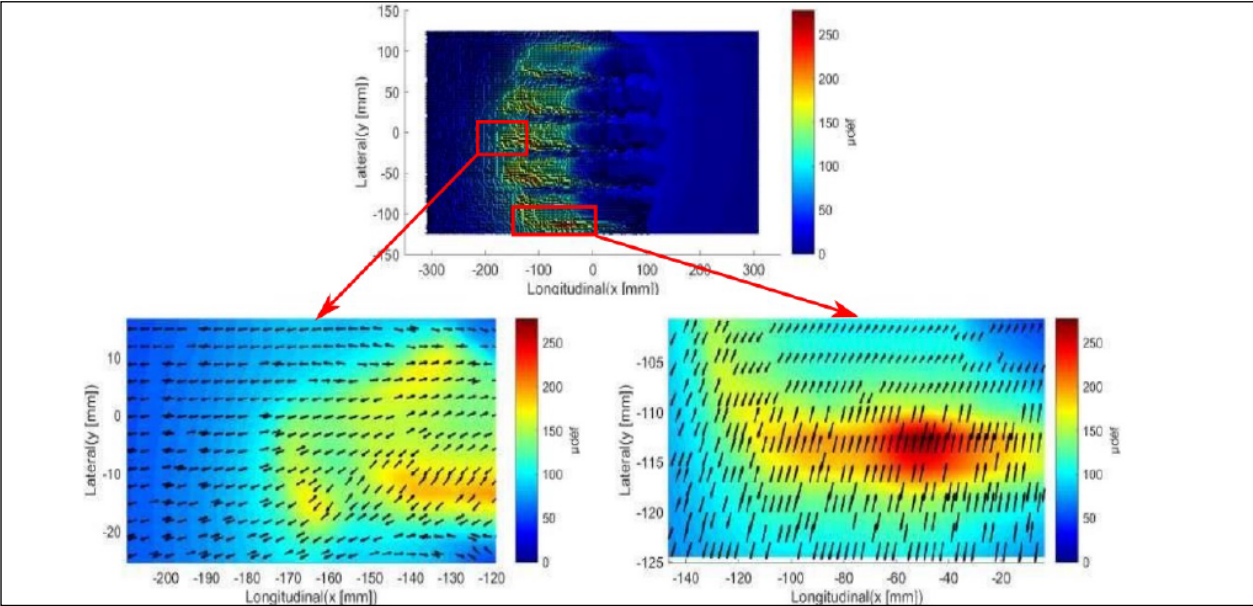
Gráfico 18 : Enfoque tribológico aplicado al deterioro de la superficie de las calzadas, resumen de las técnicas experimentales y numéricas utilizadas.



Este enfoque integra la descripción de las superficies (textura) y permite establecer mapas de tensiones locales y heterogéneas que, en el futuro, podrán relacionarse con los mecanismos de degradación de las capas superficiales, integrando también los esfuerzos horizontales relacionados con las aceleraciones y frenadas de los vehículos (Figure 19), aspectos que se ignoran por completo en las herramientas actuales.

Estos trabajos han demostrado que las tensiones y deformaciones calculadas con precisión mediante estas metodologías son muy superiores a las evaluadas con los métodos habituales (en particular, Alize). De este modo, pueden explicar el deterioro prematuro observado, especialmente en las zonas de aceleración, frenado o giro. Probablemente contribuirán a futuros avances para lograr un método racional de diseño de capas superficiales.

Gráfico 19 : Direcciones principales de extensión en superficie (z = 0) para una rueda en curva (condición de rueda motriz en curva, F x = 15 kN; F y = 5 kN)



Para más información :

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/007	Approche tribologique du contact pneu-chaussée (Enfoque tribológico del contacto entre el neumático y la calzada)
DVDC/R/037	Approche tribologique du contact pneu-chaussée (complément) (Enfoque tribológico del contacto entre el neumático y la calzada (complemento))

3 - ESCALA DE MATERIALES PARA PAVIMENTOS

En lo que respecta al enfoque «materiales», el estudio realizado en el INSA de Estrasburgo sobre el comportamiento elastoplástico de una GNT con diferentes contenidos de agua abre la vía a una mejor consideración del factor «humedad» en las estructuras flexibles. La experimentación, en particular mediante el ensayo triaxial con cargas repetidas (TCR), permite confirmar el modelo de dependencia de la deformación permanente en función del contenido de agua.

Diversas observaciones sobre el terreno ponen de manifiesto el grave deterioro de determinados tipos de aglomerados expuestos al agua y a los ciclos de congelación-descongelación durante los periodos invernales. Estas observaciones han sido documen-

tadas por la administración en la red nacional y resumidas en una nota del IDRRIM que incluye recomendaciones sobre la formulación y la aplicación.

Una tesis defendida por la ENTPE ha puesto de manifiesto la influencia de la saturación de agua de los aglomerados durante los ciclos de congelación/descongelación en el módulo complejo, la fatiga y el ensayo de retracción impedida.

3.1 - Proyecto MOVEDVDC

La evaluación de la vida útil de las calzadas también se basa en el conocimiento de las prestaciones mecánicas residuales de los materiales bituminosos de las capas de base y su evolución a lo largo del tiempo. Este tema se ha tratado en el marco del proyecto MOVEDVDC (Modelización del envejecimiento y el deterioro para la evaluación de la vida útil de los pavimentos), un proyecto relacionado con el proyecto nacional DVDC y respaldado por la ANR (Agencia Nacional de Investigación).

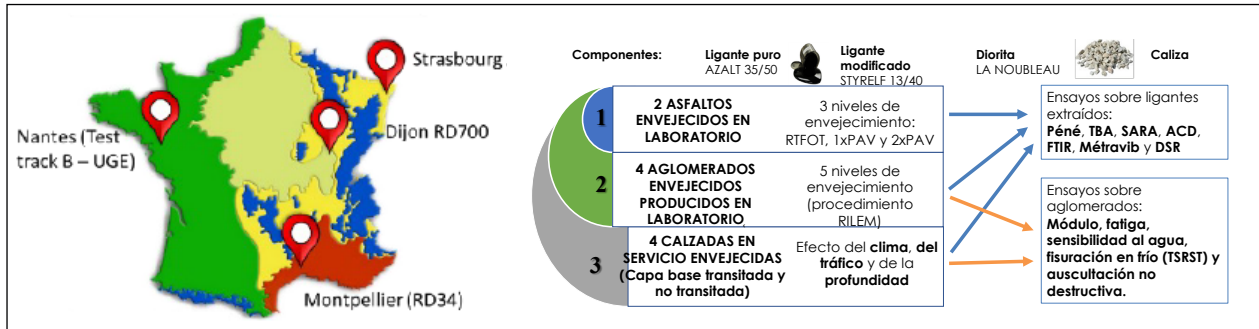
El mantenimiento de las infraestructuras viarias representa un reto socioeconómico considerable, en un contexto en el que los presupuestos de los gestores son cada vez más limitados. Para optimizar el mantenimiento de estas infraestructuras, es necesario disponer de métodos de inspección y diagnóstico que permitan estimar, de la forma más fiable posible, su estado de deterioro y su vida útil restante.

El proyecto MOVEDVDC tenía como objetivo contribuir a este objetivo, estudiando el rendimiento mecánico residual de los materiales bituminosos de las capas de base y su evolución a lo largo del tiempo, dos parámetros necesarios para estimar la vida útil residual de las calzadas y definir soluciones de mantenimiento. Sus objetivos eran:

- Proponer un método de evaluación del envejecimiento y el deterioro de los materiales extraídos in situ, basado en la caracterización mecánica de los aglomerados y en la caracterización mecánica y fisicoquímica de los ligantes extraídos.
- definir indicadores de envejecimiento que puedan utilizarse de manera práctica para evaluar la vida útil restante de los materiales.
- Proponer modelos que permitan predecir el comportamiento de los materiales antiguos (módulos, resistencia a la fatiga) aplicables al cálculo de la vida útil de las calzadas.

El enfoque adoptado en MOVEDVDC para estudiar el estado de envejecimiento de los materiales bituminosos consistió en combinar:

- Ensayos sobre materiales extraídos de calzadas antiguas. Para ello, se seleccionaron cuatro tramos de calzada con una antigüedad aproximada de 20 años y que presentaban daños moderados.
- Ensayos con ligantes y aglomerados envejecidos artificialmente en laboratorio (con varios niveles de envejecimiento).

Gráfico 20 : Sitios de extracción de materiales y programa experimental

Los aglomerados y los ligantes extraídos han sido sometidos a un programa de ensayos muy completo:

- Los aglutinantes se caracterizaron mediante ensayos fisicoquímicos (espectroscopia infrarroja, fracciones SARA, destilación simulada) y ensayos reológicos (módulo complejo).
- Los aglomerados se caracterizaron mediante ensayos mecánicos: Ensayos de módulo complejo, fatiga, agrietamiento en frío y sensibilidad al agua.

A partir de estos ensayos, se han establecido leyes de evolución de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas en función del nivel de envejecimiento. También se han propuesto indicadores del envejecimiento de los aglutinantes. En concreto, se ha propuesto un indicador basado en el comportamiento reológico de los aglutinantes, que permite definir una distribución del peso molecular aparente del aglutinante (Índice de Aglomeración Molecular o MAI, por sus siglas en inglés). Esto permite evaluar mejor el riesgo de fisuración del aglutinante.

También se han propuesto métodos de ensayo originales, que combinan ensayos mecánicos (fatiga, fisuración en frío) y mediciones de emisiones acústicas, para evaluar mejor el estado de deterioro de los aglomerados durante los ensayos.

Finalmente, se ha desarrollado un modelo de comportamiento original para los aglomerados asfálticos, que permite tener en cuenta el comportamiento viscoelástico, el daño por fatiga teniendo en cuenta los efectos sesgados (autocalentamiento, no linealidad, tixotropía) y los efectos del envejecimiento.

Principales resultados:

- La base de datos de resultados experimentales sobre ligantes y aglomerados envejecidos en laboratorio, y ligantes y aglomerados procedentes de calzadas. Esta base incluye 58 variantes de ligantes, caracterizadas por ensayos fisicoquímicos y reológicos, y 18 variantes de aglomerados, caracterizadas por ensayos de módulo, fatiga, resistencia al agrietamiento en frío y sensibilidad al agua. La originalidad radica en que estos resultados se refieren a materiales de capa base (todos GB3), cuyo envejecimiento es poco conocido, y que permiten comparar materiales de formulación similar envejecidos en laboratorio (con al menos 4 niveles de envejecimiento) y extraídos de pavimentos. Esta base proporciona información muy completa sobre el envejecimiento de estos GB3 y podrá utilizarse para otras explotaciones.
- Los diferentes indicadores propuestos para caracterizar el envejecimiento de los ligantes. El estudio demostró la pertinencia de los indicadores clásicos basados en la fisicoquímica (índices de carbonilo y sulfóxido) y en la reología (parámetro de Glower-Rowe). Sobre todo, demostró el interés del método, ∂ -método, que permite caracterizar la distribución molecular del recubrimiento, muy sensible al envejecimiento, a partir de datos reológicos. Se ha propuesto un indicador (Índice de Aglomeración Molecular o MAI) basado en esta distribución molecular.

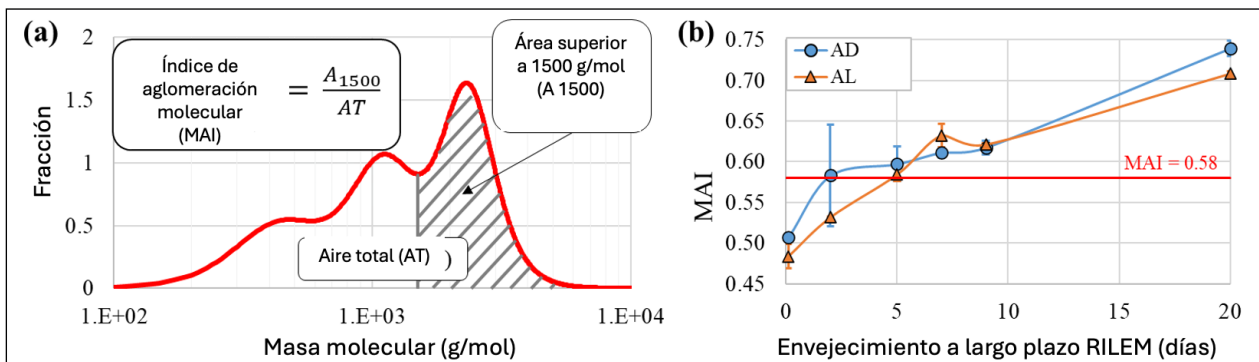
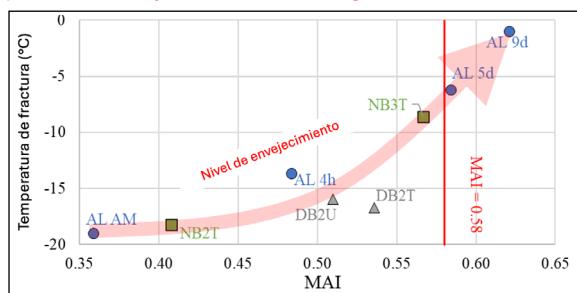
Gráfico 21 : Principio de cálculo del «índice de aglomeración molecular (MAI)» y evolución del MAI con el nivel de envejecimiento (número de días de envejecimiento a 85 °C)

Gráfico 22 : Relación entre la temperatura de rotura de la prueba TSRST y el índice MAI del aglutinante

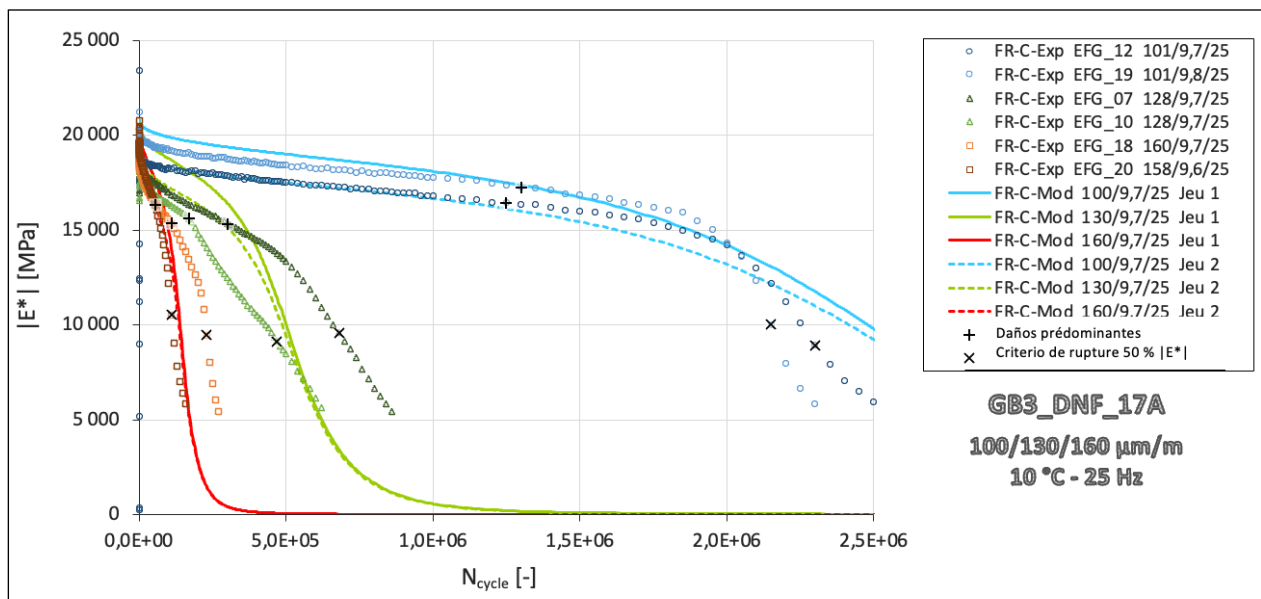


- El cálculo mediante el método delta y la determinación del MAI se han integrado en el software Viscoanalyse, diseñado inicialmente para la determinación y modelización de curvas maestras de betunes y aglomerados. Se ha desarrollado una versión gratuita y en línea de Viscoanalyse (<https://viscoanalyse-database.ifsttar.fr/>).
- En el caso de los aglomerados, se ha puesto de manifiesto el efecto del envejecimiento sobre los distintos parámetros mecánicos: aumento del módulo y disminución del ángulo de fase con el envejecimiento; incidencia bastante baja del envejecimiento sobre la resistencia a la fatiga de los GB con ligante puro, pero caída mucho más importante del rendimiento con el ligante modificado. Pero el efecto del envejecimiento se ha puesto de manifiesto sobre todo en los ensayos TSRST, que han demostrado una clara pérdida de resistencia al agrietamiento en frío (aumento de la fragilidad) con el envejecimiento.
- Los sitios utilizados para la toma de muestras correspondían todos a calzadas con mucho tráfico, con una antigüedad aproximada de 20 años y con pocos daños, excepto el sitio de Montpellier, donde la calzada presentaba importantes grietas. Los materiales de la capa de base extraídos in

situ (y los ligantes extraídos de dichos materiales) presentaban en su mayoría un envejecimiento moderado, que en el caso de los ligantes se situaba entre un nivel de envejecimiento RTFOT y RTFOT +1 PAV. Solo los materiales del emplazamiento de Montpellier presentaban un nivel de envejecimiento mucho mayor (similar a RTFOT + 2 PAV para el aglutinante), que se asociaba a una fuerte fisuración.

- El uso del criterio de Glover-Rowe adaptado a los aglomerados (G-Rm) permitió poner de manifiesto la evolución de los parámetros reológicos de los aglomerados (módulo, ángulo de fase) con el envejecimiento. En el caso de los GB sometidos a ensayo (envejecidas en laboratorio o in situ), que tenían los mismos grados de betún 35/50, se demostró que el envejecimiento daba lugar a una evolución muy similar de las características reológicas, salvo en el caso de algunos materiales extraídos in situ que también presentaban daños importantes debidos al tráfico (caso del emplazamiento de Montpellier). Proporcionar resultados de fatiga/E en muestras.
- En el caso de los aglomerados, el uso de métodos de medición por emisiones acústicas parece ser una técnica muy interesante para analizar mejor la evolución de los daños durante los ensayos y definir criterios de rotura por fatiga más pertinentes.
- En lo que respecta a la modelización del comportamiento de los aglomerados envejecidos, el modelo VENOL, propuesto en la tesis de Leo Coulon, constituye un modelo original que permite tener en cuenta tanto el comportamiento viscoelástico y el deterioro por fatiga de los aglomerados como su evolución con el envejecimiento. Su implementación en un código de cálculo por elementos discretos permite su aplicación en diferentes tipos de ensayos de laboratorio, y también permite considerar su uso para cálculos estructurales.

Gráfico 23 : Ajuste del modelo VENOL en las pruebas de fatiga realizadas en la capa de base GB del emplazamiento de Dijon: la leyenda de las curvas 101/9,7/25 corresponde a 128 $\mu\text{m}/\text{m}$ 9,7 °C / 25 Hz.



Resumen : «Resumen MOVEDVDC»

El proyecto MOVEDVDC ha alcanzado sus objetivos en términos de estudios experimentales. Permitió definir una metodología para el envejecimiento de los materiales y realizar ensayos de caracterización de los materiales envejecidos tanto en laboratorio como in situ. En particular, demostró el interés de utilizar la curva maestra del ángulo de fase y el método para el análisis de los aglutinantes envejecidos. Para el análisis de los aglomerados antiguos, se ha puesto de manifiesto la pertinencia de los ensayos de contracción impedida y de las mediciones por emisiones acústicas combinadas con ensayos de fatiga. Estos métodos de ensayo ofrecen claramente perspectivas interesantes para la caracterización de los aglomerados y ligantes envejecidos, pero también de los aglomerados reciclados, que incorporan estos materiales envejecidos. Por ejemplo, parece pertinente integrar los ensayos de fisuración en frío en el método de formulación de los aglomerados. Otra perspectiva parece ser la mejora de los criterios de vida útil en fatiga de los aglomerados.

El proyecto también ha permitido comprender mejor la evolución de las características de los ligantes y los aglomerados de capas de base con el envejecimiento, en particular gracias a los materiales envejecidos en laboratorio a diferentes niveles. En cuanto a los ligantes, se llevó a cabo un análisis detallado que dio lugar a la propuesta de indicadores pertinentes para caracterizar el envejecimiento, como el MAI, y también el criterio de Glover-Rowe, que no se utilizaba en Francia. La limitación de estos estudios es que, debido a la complejidad del programa experimental, solo se pudieron realizar con un número limitado de materiales (2 ligantes y 4 aglomerados envejecidos en laboratorio, 4 emplazamientos de calzadas). Dado que se dispone de una metodología pertinente, sería interesante ampliar estos estudios a un mayor número de materiales (tanto de base como de capas de rodadura). Esto permitiría crear una base de datos y recopilar información sobre el envejecimiento de diferentes tipos de materiales en las carreteras francesas, así como definir umbrales de rendimiento pertinentes para evaluar el estado y la vida útil residual de los materiales antiguos.

El desarrollo de una nueva versión en línea y de libre acceso del software Viscoanalyse, que permite modelar ensayos de módulos complejos sobre ligantes y aglomerados, aplicar el método y calcular el índice MAI para los ligantes, es un importante resultado del proyecto. Permitirá difundir el uso de estos indicadores y ampliar su aplicación (materiales reciclados, evaluación de la eficacia de los productos regeneradores para los recubrimientos reciclados, etc.).

En cuanto al modelado, el modelo VENOL, que tiene en cuenta el comportamiento viscoelástico y la fatiga, considerando los efectos sesgados, representa una herramienta interesante para caracterizar el comportamiento ante la fatiga. Las perspectivas de este trabajo son, en particular, las aplicaciones al cálculo de estructuras de pavimentos.

Sin embargo, en lo que respecta a estos aspectos de modelización, no se ha logrado plenamente el objetivo de proponer un método práctico para calcular la vida útil residual de las calzadas. La parte experimental del proyecto se retrasó considerablemente debido a la pandemia de COVID, y los programas de pruebas no pudieron completarse hasta el final del proyecto. No se ha podido completar el aprovechamiento de estos resultados para el cálculo de la vida útil de las calzadas, por lo que es necesario continuar con este trabajo. El desarrollo de un método de cálculo de la vida útil residual de este tipo también requiere ampliar el estudio experimental a un mayor número de materiales, como ya se ha comentado.

3.2 - Durabilidad de las capas de rodadura

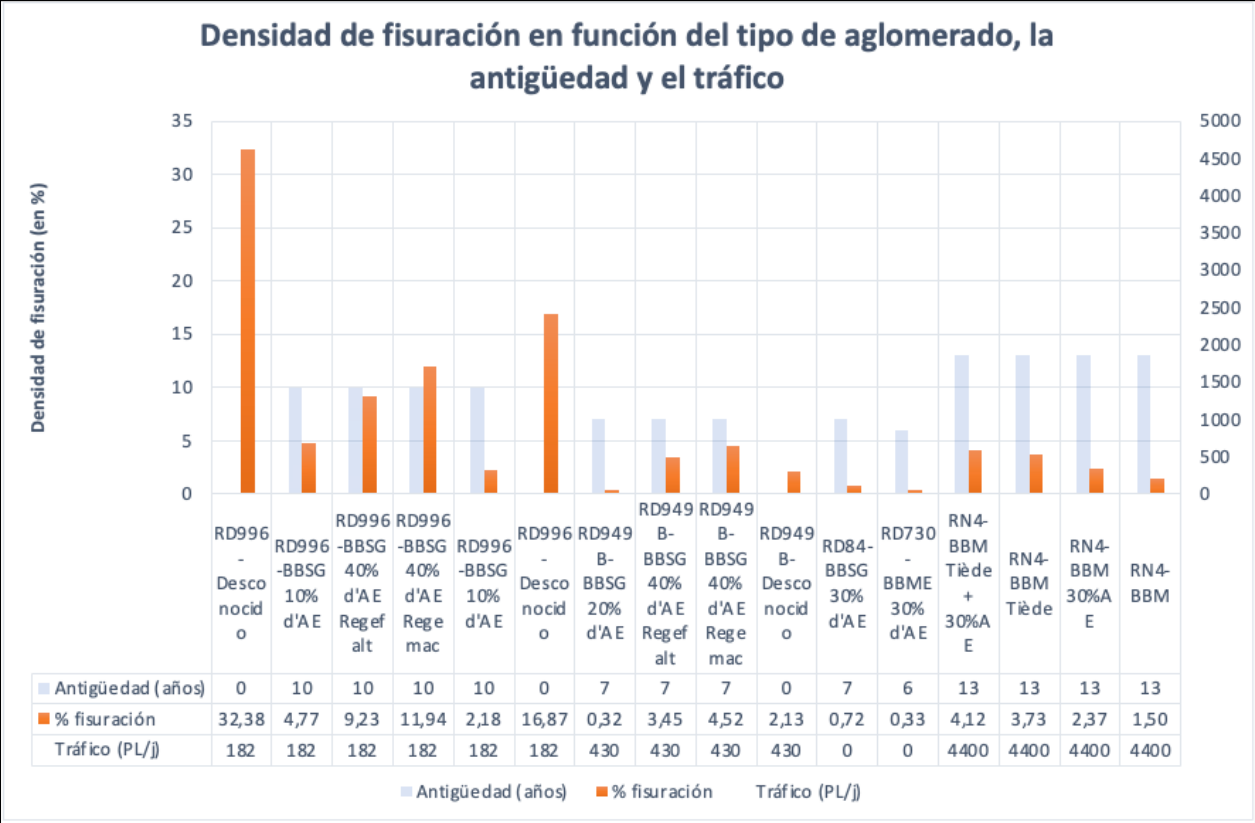
Un grupo de trabajo del proyecto nacional DVDC se ha interesado más específicamente por las capas de rodadura de aglomerado con y sin áridos de aglomerado reciclado (AER). El procedimiento recurrió al diagnóstico in situ mediante imágenes láser y al desbroce secuencial, lo que permitió evaluar la mezcla del asfalto original y el asfalto añadido.

Gráfico 24 : Ilustración del ensayo de desincrustación secuencial



Estos trabajos complementan los realizados en el marco del proyecto nacional MURE y ponen de relieve la buena compatibilidad entre el betún de las AER y el betún añadido, además de demostrar que la presencia de fisuras sigue siendo muy escasa en las placas analizadas.

Gráfico 25 : Gráfico resumido de las densidades de fisuración observadas en las secciones del proyecto



Los principios conocidos por los gestores de redes y las empresas de carreteras sobre la durabilidad de los aglomerados siguen siendo no utilizar un betón demasiado duro en la mezcla y no calentar demasiado los aglomerados, ya que estas dos acciones pueden provocar grietas en la superficie.

Para más información :

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/039	Elaboration d'une méthodologie de traitement de données dans le cadre de l'étude de la durabilité des couches de surface (Elaboración de una metodología de tratamiento de datos en el marco del estudio de la durabilidad de las capas superficiales)
DVDC/R/046	Application méthodologie de traitement de données dans le cadre de l'étude de la durabilité des couches de surface (Aplicación de la metodología de tratamiento de datos en el marco del estudio de la durabilidad de las capas superficiales)

CONCLUSIÓN GENERAL

En conclusión, el proyecto nacional DVDC, en el que participaron un gran número de actores del sector, ha sido un éxito. Las colaboraciones han permitido movilizar una gran cantidad de conocimientos y recursos para contribuir a alcanzar el ambicioso objetivo de prolongar la vida útil de las calzadas gracias a un mejor conocimiento de su estado y de su proceso de envejecimiento. En resumen: intervenir en el lugar adecuado, en el momento adecuado.

Los impactos positivos sobre la profesión son numerosos, tanto por la calidad de los estudios realizados, a veces muy innovadores, como por los resultados

concretos obtenidos. Los intercambios también permitieron reforzar los vínculos entre los diferentes actores y fomentar una visión común para el futuro. Esperamos que este resumen, dividido en tres escalas diferentes (red, estructura de la calzada y materiales de la calzada), permita a cada uno encontrar los temas que le interesen. Este proyecto permite inscribir la gestión del patrimonio viario en un marco sostenible y controlado.

LISTA DE INFORMES DVDC:

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/001	Lorino T. Modèles d'évolution des chaussées (Modelos de evolución de calzadas), 32 p., 2017.
DVDC/R/002	Bolot B., Brandely F., Espinasse B., Grin L., Kobisch R., Marchand J.-P., Odéon H., Périssé L. Retour d'expérience sur les mécanismes de dégradation des chaussées (Retroalimentación sobre los mecanismos de degradación de las calzadas) : Questionnaire (Cuestionario), p 27, 2017.
DVDC/R/003	Abdo J., Marchand J.-L., Pero F. Mécanismes de dégradation des chaussées (Mecanismos de degradación de calzadas). Retour d'expérience sur les chaussées semirigides, mixtes et en béton de ciment (Experiencia con pavimentos semirrígidos, mixtos y de hormigón de cemento), p. 33, 2017.
DVDC/R/004	Abdo J., Marchand J.-L., Pero F. Durée de vie résiduelle des chaussées semirigides, mixtes et en béton de ciment, 24 p., 2017 (Vida útil residual de pavimentos semirrígidos, mixtos y de hormigón de cemento, p. 24., 2017.)
DVDC/R/005	Chazallon C., Dansou A., Mouhoubi S. Evaluación de la vida útil residual de las calzadas. Modèles de dégradation des structures, (Modelos de degradación de estructuras), p. 20, 2017.
DVDC/R/006	Chateauneuf A., Hasfa W., Yotte S. Etat de l'ar (Estado actual de la técnica), 64 p., 2020.
DVDC/R/007	Manyo E., Petit C., Picoux B., Reynaud P. Approche tribologique du contact pneu-chaussée (Enfoque tribológico del contacto entre el neumático y la calzada), p. 28, 2018.
DVDC/R/008	Martin J.-M., Théret S. MIRANDA : mesure d'indicateurs routiers automatisée par appareils nomades d'auscultation. (Medición automatizada de indicadores viales mediante dispositivos móviles de inspección): Expérimentation dans l'Eure (Experimentación en Eure) (CD27), p. 25, 2018.
DVDC/R/009	Tran D.-T., Sauzéat C., Di Benedetto H. Étude bibliographique sur l'endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel (Estudio bibliográfico sobre el deterioro de los aglomerados bituminosos por el agua y las heladas), p. 40, 2018.
DVDC/R/010	Chazallon C., Jing P. Etude expérimentale sur le comportement élastoplastique du matériau granulaire de Bréfauchet à différents états hydriques initiaux (Estudio experimental sobre el comportamiento elastoplástico del material granular de Bréfauchet en diferentes estados hídricos iniciales), p. 28, 2018.
DVDC/R/011	Picoux B., Tautou R. Amélioration de l'interprétation des méthodes d'auscultation dans le cadre de l'établissement d'un diagnostic précis de la chaussée à partir de méthodes d'impact (Mejora de la interpretación de los métodos de inspección en el marco del establecimiento de un diagnóstico preciso de la calzada a partir de métodos de impacto), p. 79, 2018.
DVDC/R/012	Varga A.-M., Lepert P. Etude sur les indices structurels (Estudio sobre los índices estructurales), p. 22, 2018.
DVDC/R/013	George L.-A., Maignol J., Wasner S. Retours d'expérience sur la connaissance de l'état d'un réseau routier (Retroalimentación sobre el conocimiento del estado de una red de carreteras), p. 15, 2018.

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/014	Donny A., Koutiri I., Godard E., Pouteau B., Millien A., Ollier S. Vers une caractérisation performantielle in situ des interfaces des couches de surface (Hacia una caracterización in situ del rendimiento de las interfaces de las capas superficiales), p. 39, 2018.
DVDC/R/015	Maignol J., George L.-A., Wasner S., Sagnier F., Péjouan H. Actualisation de la méthode 38-2 (Actualización del método 38-2), p. 24, 2018.
DVDC/R/016	Varga A., Maillard-Nunes P. Synthèse des méthodes de dimensionnement de chaussées souples / routes non revêtues à l'international (Resumen de los métodos internacionales de dimensionamiento de pavimentos flexibles/carreteras sin asfaltar), p. 93 + Anexos, 2020.
DVDC/R/017	Dony A., Koutiri I., Godard E., Brissaud L., Barrière P., Pouteau B., Millien A., Ollier S. Evaluation du dispositif de mesure de collage des couches d'enrobés in situ par torsion (Evaluación del dispositivo de medición de la adherencia de las capas de aglomerado in situ mediante torsión), p. 46, 2019.
DVDC/R/018A	Tran D. T., Sauzeat C., Di Benedetto H. Endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel (Daños en los aglomerados asfálticos causados por el agua y las heladas). Présentation de la campagne expérimentale et premiers résultats (Presentación de la campaña experimental y primeros resultados), p. 67, 2019.
DVDC/R/018B	Tran D. T., Sauzeat C., Di Benedetto H. Endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel (Daños en los aglomerados bituminosos causados por el agua y las heladas). Présentation de la campagne expérimentale et premiers résultats (Presentación de la campaña experimental y primeros resultados). ANEXOS, p. 82, 2019.
DVDC/R/019	Bolot B., Brandely F., Espinasse B., Grin L., Kobisch R., Marchand J.-P., Odéon H., Périssé L. Retour d'expérience sur les mécanismes de dégradation des chaussées (Retroalimentación sobre los mecanismos de degradación de las calzadas) : Questionnaire complémentaire dirigé à los consejos departamentales y proyecto para las metrópolis, p.25, 2019.
DVDC/R/020	Lorino T. Modèles probabilistes de dimensionnement des chaussées (Modelos probabilísticos para el dimensionamiento de calzadas), p. 32., 2020.
DVDC/R/021	Le Bastard C., Fauchard C., Guilbert D., Beaucamps B. y Gaudin JN. Méthodologie d'exploitation des mesures radar pour la caractérisation des interfaces de chaussées : approche expérimentale (Metodología de explotación de mediciones radar para la caracterización de interfaces de pavimentos: enfoque experimental), p. 35, 2019.
DVDC/R/022	Raillat P., Sagnier F., Wasner S., George L.-A. Relevés automatiques (Registros automáticos), p. 28, 2019.
DVDC/R/023	Martin JM, Menant F, Théret S. MIRANDA : Evaluation d'un capteur de roue (UniWheel) / Expérimentation dans l'Eure, 34 p., 2019. (Evaluación de un sensor de rueda (UniWheel) / Experimento en Eure, p. 34, 2019.)
DVDC/R/024	Théret S. Connaissance du patrimoine routier départemental (Conocimiento del patrimonio viario departamental) CD27, p. 8, 2019.
DVDC/R/025	Tran D.-T., Sauzéat C., Di Benedetto H. Endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel (Daños en los aglomerados asfálticos causados por el agua y las heladas), p. 28, 2020.

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/026	Chazallon C., Mouhoubi S., Dansou A. Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées (Evaluación de la vida útil residual de las calzadas). Modèles de dégradation des structures (Modelos de degradación de estructuras), p. 26, 2020.
DVDC/R/027	Abdo J., Marchand J.-P., Péro F. Durée de vie des chaussées en béton de ciment (Vida útil de los pavimentos de hormigón de cemento), p. 44, 2020.
DVDC/R/028	Bolot B., Brandely F., Espinasse B., Grin L., Kobisch R., Marchand J.-P., Odéon H., Périsset L. Retour d'expérience sur les mécanismes de dégradation des chaussées (Retroalimentación sobre los mecanismos de degradación de las calzadas): Questionnaire complémentaire adressé aux conseils départementaux et projet pour les métropoles - Mise à jour (Cuestionario complementario enviado a los consejos departamentales y proyecto para las metrópolis - Actualización), p. 35, 2019.
DVDC/R/029	Chupin O., Piau J.-M. Modélisation numérique 3D de l'endommagement des chaussées par modèle M4-5n : fissuration & décollements d'interface (Modelización numérica en 3D del deterioro de las calzadas mediante el modelo M4-5n: fisuración y desprendimientos de la interfaz). Développement de l'outil de calcul et applications (Desarrollo de la herramienta de cálculo y aplicaciones), p. 45., 2020.
DVDC/R/030	Dony A., Barrière P., Ollier S., Brissaud L., Godard E. Vers une caractérisation performantielle, in situ, des interfaces des couches de surface - Evaluation du dispositif de mesure de collage des couches d'enrobés in situ par torsion (Hacia una caracterización in situ del rendimiento de las interfaces de las capas superficiales - Evaluación del dispositivo de medición de la adhesión de las capas de aglomerado in situ mediante torsión), p. 27, 2020.
DVDC/R/031	Bolo B., Brandely F., Espinasse B., Grin L., Kobisch R., Marchand J.-P., Odéon H., Périsset L. Retour d'expérience sur les mécanismes de dégradation des chaussées - Questionnaire adressé aux métropoles (Retroalimentación sobre los mecanismos de degradación de las calzadas - Cuestionario enviado a las grandes ciudades), p.19, 2021.
DVDC/R/032	Joly B., Maignol J., Pilet D., Loison E., Guiraud H., Degrange R., Wasner S., Theret S. Relevés automatisés (Registros automatizados): Descripteurs Dégradations et Méthode de Classification (Descriptores Degradación y método de clasificación, p.35, 2022).
DVDC/R/033	Trottier P., Joly B., Maignol J., Martin JM., Pilet D., Degrange R., Loison E., Hebling A., Theret S. Mesures de Déflexions à grand rendement (Mediciones de deflexiones de alto rendimiento), p. 19, 2022.
DVDC/R/034	Masdan M., Pouteau B. Collage des couches d'enrobés - Elaboration d'un seuil de rupture pour essai in situ en cisaillement (Pegado de capas de aglomerado - Elaboración de un umbral de rotura para ensayo in situ en cizallamiento), p.15, 2022.
DVDC/R/035	Chazallon C., Mouhoubi S., Dansou A. Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées (Evaluación de la vida útil residual de las calzadas). Modèles de dégradation des structures (Modelos de degradación de estructuras), p. 28, 2021.
DVDC/R/036	Menant F., Martin J.-M., Radde B., Sagnier F., Kempf Y., Wasner S., Guiraud H. Apport des appareils d'auscultation de type « scanner » pour la détection et la caractérisation en 3-D des déformations de chaussée routière (Aportación de los aparatos de auscultación tipo «escáner» para la detección y caracterización en 3D de las deformaciones de la calzada), p. 55, 2022.
DVDC/R/037	Reynaud P., Picoux B., Manyo E., Petit C. Approche tribologique du contact pneu-chaussées (complément), 23 p., 2020. (Enfoque tribológico del contacto entre neumáticos y calzadas (complemento), p. 23, 2020.)

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/038	Abdo J., Marchand JP, Pero F. Durée de vie des chaussées en béton de ciment (Vida útil de los pavimentos de hormigón de cemento), p. 28, 2023.
DVDC/R/039	Barras M., Druet J. Elaboration d'une méthodologie de traitement de données dans le cadre de l'étude de la durabilité des couches de surface (Elaboración de una metodología de tratamiento de datos en el marco del estudio de la durabilidad de las capas superficiales), p. 40 + Anexos, 2019.
DVDC/R/040	Radde B., Joluy B., Ménand F., Guiraud H., Martin JM., Wasner S. Relevés automatisés – Application in situ des descripteurs dégradations, 24 p., 2023. (Registros automatizados: aplicación in situ de los descriptores de degradación, p. 24, 2023.)
DVDC/R/041	Chupin O., Piau MJ. Modelización numérica 3D del deterioro de las calzadas mediante el modelo M4-5n. Développement de l'outil de calcul (Desarrollo de la herramienta de cálculo), p. 76., 2023.
DVDC/R/042	Dony A., Barrière P., Leroy-Mallol F., Van Rompu J., Attias t., Pouteau B., Ollier S. Vers une caractérisation performantielle in situ des interfaces des couches de surface (Hacia una caracterización in situ del rendimiento de las interfaces de las capas superficiales), p. 20, 2023.
DVDC/R/043	Decamps J.-A., Dony A., Faucon-Dumont S., Mouillet V., Nicolai A., Quigniot S., Van Rompu J. Exploitation complémentaire des données de laboratoire du PN MURE (Explotación complementaria de los datos de laboratorio del PN MURE), p. 39, 2023.
DVDC/R/044	Dony A., Mouillet V., Arghyris A., Faucon Dumont S. Suivi des chantiers MURE (Seguimiento de las obras MURE): Analyse de liants extraits de carottes (Análisis de aglutinantes extraídos de zanahorias), p. 9, 2023.
DVDC/R/045	Maillard Nunes P., Duca L. Étude de l'incidence du comportement réel des matériaux non liés (GNT et sols) sur le dimensionnement des chaussées à faible trafic (Estudio del impacto del comportamiento real de los materiales no ligados (GNT y suelos) en el dimensionamiento de carreteras con poco tráfico), p. 41, 2023.
DVDC/R/046	Druet J. Application d'une méthodologie de traitement de données dans le cadre de l'étude de la durabilité des couches de surface (Aplicación de una metodología de tratamiento de datos en el marco del estudio de la durabilidad de las capas superficiales), p. 97. + Anexos, 2024.
DVDC/R/047	Degrange R., Guiraud H., Joly B., Loison E., Maignol J., Pilet D., Wasner S. Relevés Automatisés (Registros Automatizados). Contribution à l'élaboration d'un indicateur structurel, (Contribución a la elaboración de un indicador estructural) p. 26, 2024.
DVDC/R/048A	Kempf Y., Feeser A., Lesbats D., Grignard N., Wasner S., Joly B., Radde B., Sagnier F., Maignol J., Pilet D., Degrange R. Essais croisés LCMS (Ensayos cruzados LCMS). Exploitation des relevés ASFA (Phase 1) Explotación de mediciones ASFA (Fase 1). p.20, 2024.
DVDC/R/048B	Kempf Y., Feeser A., Lesbats D., Grignard N., Wasner S., Joly B., Radde B., Sagnier F., Maignol J., Pilet D., Degrange R. Essais croisés LCMS (Ensayos cruzados LCMS). Exploitation des relevés ASFA (Phase 2) Explotación de mediciones ASFA (Fase 2). p.190, 2024.
DVDC/R/048C	Kempf Y., Feeser A., Lesbats D., Grignard N., Wasner S., Joly B., Radde B., Sagnier F., Maignol J., Pilet D., Degrange R. Essais croisés LCMS (Ensayos cruzados LCMS). Exploitation des relevés ASFA (Phase 3) Explotación de mediciones ASFA (Fase 3). p.421, 2025.

Referencia del informe	Título del informe
DVDC/R/048D	Kempf Y., Feeser A., Lesbats A., Grignard. N, Wasner S., Joly B., Radde B., Sagnier F., Pilet D., N'guyen T.-S., Georges S. Essais croisés ASFA : livrable de synthèse Ensayos cruzados ASFA: resumen disponible), p. 28, 2025.
DVDC/R/049	Reynaud P., Picoux B., Petit C. Approche tribologique du comportement en surface de chaussée (Enfoque tribológico del comportamiento de la superficie de la calzada) p. 29, 2024.
DVDC/R/050	Hebting A. Essais croisés des matériels de déflexion à grande vitesse (Ensayos cruzados de materiales de deflexión a alta velocidad), p.46. + Anexos, 2024.
DVDC/R/051	de Lesquen D., Van Rompu J., Sagnard N., Hebting A., Odéon H. Déflexion des couches de roulement : état de l'art et approche théorique (Deflexión de las capas de rodadura: estado actual y enfoque teórico), p. 66, 2023.

Características específicas de las diferentes versiones del resumen:

La versión francesa incluye la recopilación de los documentos mencionados anteriormente.

Las versiones en inglés y español no contienen la recopilación de los entregables.

Todos los productos mencionados están disponibles en el sitio web del Proyecto Nacional DVDC: dvdc.fr.