

Sistema de monitorización automática en tiempo real de un tramo de la autovía A-62



Automatic monitoring system in real time of a section of the A-62 highway

Julio de Lorenzo Hurtado

Centro de Estudios del Transporte del CEDEX

Jorge Carnerero Manzano

Centro de Estudios del Transporte del CEDEX

En 2015 la Dirección General de Carreteras (DGC) del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible encargó al CEDEX el seguimiento mediante tramos de control del comportamiento estructural y deterioro de los refuerzos de firmes en la RCE.

En 2017, con el inicio de la ejecución del último refuerzo de firme en la autovía A-62, se estableció un tramo de control localizado entre los pp.kk. 110+870 y 111+890. El tramo elegido presentaba una patología de reflexión de fisuras transversales en la capa de rodadura, que se solventó con una actuación de fresado, reposición y recrecido del firme.

Para estudiar el comportamiento de la solución de rehabilitación llevada a cabo, el Centro de Estudios del Transporte (CET) del CEDEX desarrolló un sistema de monitorización automática, en remoto y en tiempo real, instalado en una estación de control de firmes, que se alimentaba de la información recogida por la instrumentación colocada durante la ejecución de la rehabilitación.

La estación ha estado proporcionando datos durante cinco años, lo que ha permitido llevar un control exhaustivo del proceso de deterioro del tramo, en el que las fisuras existentes en la capa de grava cemento han seguido evolucionando y se han vuelto a reflejar en la superficie. Así mismo, se han obtenido conclusiones relevantes relativas al comportamiento de los firmes semirrígidos.

In 2015, the General Directorate of Roads, from the Ministry of Transport and Sustainable Mobility, ordered CEDEX to monitor the structural performance and deterioration of road pavement reinforcements.

In 2017, with the start of the last reinforcement of the road pavement on the A-62, a control section was established between pp.kk. 110+870 and 111+890. The selected section presented a pathology of transverse cracking reflection in the wearing course, which was solved by milling, replacing and a new layer of bituminous mixture.

To study the behaviour of the rehabilitation solution carried out, the Centre for Transport Studies (CET) of CEDEX developed an automatic, remote and real-time monitoring system, installed in a control station, which was fed with the information collected by the instrumentation placed during the execution of the rehabilitation works.

The station has been providing data for five years, which has made it possible to exhaustively monitor the evolution of distresses and obtain conclusions relevant to the performance of this type of pavements.

1. Introducción

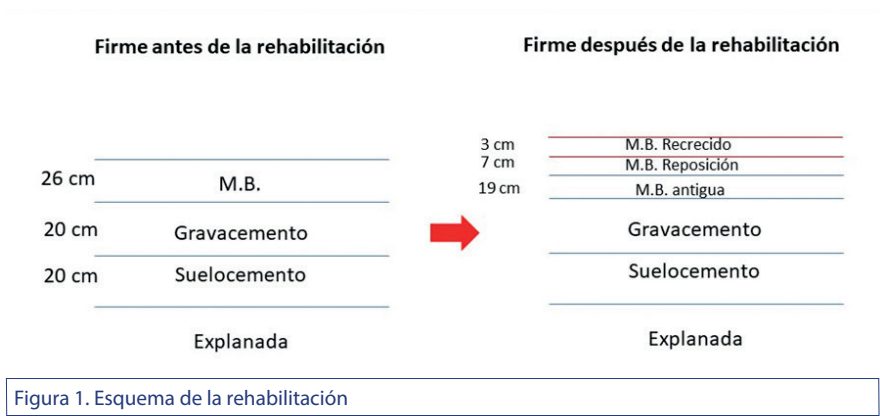
Con el objetivo de analizar la evolución de fisuras a través de parámetros indicativos de capacidad resistente en un refuerzo de firmes, la DGC encargó al CEDEX el seguimiento del comportamiento estructural de un tramo de control con firme semirrígido.

En el año 2017 se realizó una rehabilitación de firme en la autovía A-62, entre Valladolid y Venta de Baños, consistente en el fresado y reposición de un espesor de 7 cm y un recrecimiento de 3 cm. La reposición se realiza con mezcla bituminosa en caliente AC22 bin B 50/70 S, y el recrecido se realiza con mezcla bituminosa en caliente BBTM 11B PMB 40/80-65. Este tramo presentaba una patología de reflexión de fisuras transversales en la capa de rodadura, procedente de la prefisuración realizada en las capas tratadas con cemento y, por sus características, constituía una actuación idónea para el trabajo que se pretendía realizar.

El tramo de control se estableció entre los pp.kk. 110+870 y 111+890, en el carril derecho de la calzada derecha, a la altura de Cabezón de Pisuerga. La categoría de tráfico que circulaba en el año de puesta en servicio era T0 con una IMDp de 6398 vehículos, entre las dos calzadas, que representaba el 18,8% de todo el tráfico. La evolución del tráfico hasta el año 2022 se puede ver en la figura 2.

En el tramo elegido se instrumentaron 3 fisuras existentes en el momento de la rehabilitación, con sensores para la medida de los desplazamientos horizontales y verticales, y se colocaron sensores para la medida de la deflexión superficial, la temperatura a distintas profundidades y la humedad de la explanada.

Entre la calzada y la vía de servicio se implantó la estación de control



que albergaba el sistema de adquisición de datos procedentes de los sensores colocados en el firme y de la estación meteorológica instalada en la propia estación. Se trata de un sistema autónomo y automático, capaz de transmitir datos en remoto y en tiempo real.

Con este sistema el CEDEX ha realizado un seguimiento de la evolución ascendente de las fisuras instrumentadas, y su relación con el resto de los parámetros estudiados.

El sistema comenzó a funcionar en 2018 y ha estado proporcionando datos hasta el 2023. A partir de este momento, la mayor parte de los sensores han dejado de funcionar y por este motivo se ha decidido concluir el estudio.

2. Sistema de auscultación automática

2.1. Descripción de la estación control

En la estación conviven varios subsistemas:

a) Adquisición de datos:

Es el encargado del acondicionamiento, registro y almacenamiento de las señales de medida de las variables dinámicas del firme, y de las variables ambientales que registra la estación meteorológica adjunta.

IMD				
Año	Total	Lige	Pesa	% Pesa
2022	32841	25724	7117	21.7
2021	31180	24395	6785	21.8
2020	24446	18473	5973	24.4
2019	34365	27274	7091	20.6
2018	36052	29715	6337	17.6
2017	34106	27708	6398	18.8
2016	33355	26970	6385	19.1

Figura 2.

Está integrado por dos data-loggers multicanal y un módulo de registro.

b) Comunicaciones:

Está compuesto por un switch que conecta todos los dispositivos de los distintos subsistemas, formando una red interna; más dos enrutadores que permiten el acceso de forma remota a través de una interfaz web desde cualquier PC.

c) Alimentación:

La electricidad la proporciona un sistema autónomo de energía fotovoltaica, formado por una placa solar, dos baterías y un inversor.

d) Instrumentación:

La instrumentación se compone de un conjunto de sensores, de distintos tipos, instalados en el firme, en cada una de las tres fisuras monitorizadas. Todos los sensores están conectados al subsistema de adquisición de datos.

2.2. Descripción de la instrumentación instalada

En el tramo de control se instalaron distintos tipos de sensores:

- Sensores de desplazamiento (LVDT): encargados de medir los movimientos de las fisuras. Instalados a cota de la reposición, en ambas rodadas, unos miden en horizontal, la abertura de fisura; y otros en vertical, el escalonamiento entre labios de fisura.
- Sondas térmicas: instaladas a tres profundidades distintas de las capas bituminosas.
- Sensores de humedad: instalados en la explanada, a 1 metro de profundidad desde la coronación. Están equipados, a su vez, de un sensor térmico.
- Sensores de deflexión: son sensores de movimiento, como los primeramente descritos, instalados en vertical y bajo la superficie de rodadura.
- Sensores meteorológicos: pertenecientes a la estación meteorológica adjunta. Se compone de sensores de temperatura, humedad ambiental, radiación y un pluviómetro automático.

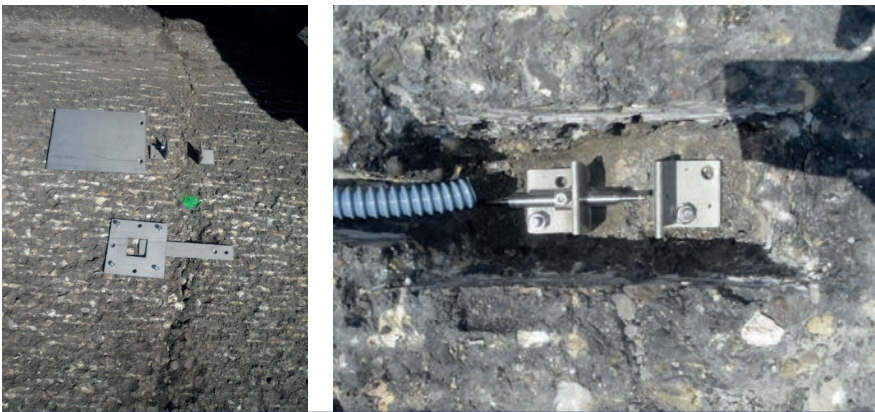


Figura 3. Sensorización de fisura transversal (desplazamiento horizontal)



Figura 4. Estación de control de firmas A-62



Figura 5. Esquema de instrumentación

En la figura 5 se muestra la disposición de la instrumentación del tramo.

3. Monitorización

La estación de control quedó totalmente operativa en marzo de 2018, y se mantuvo activo hasta enero de 2023, cuando eran ya muy pocos los sensores de desplazamiento que seguían funcionando, decidiéndose por ello cerrar el periodo de estudio.

En este intervalo, la estación fue programada para que tomara señales dinámicas de 100 vehículos pesados diarios, en un horario fijo predeterminado. Este criterio se adoptó para conciliar que el peso de datos dinámicos registrados (frecuencias de adquisición de 600 datos por segundo) fuese asumible por el sistema y que, por otro lado, el tamaño de la muestra fuese representativa.

En cambio, los datos meteorológicos, de mucho menor peso, se registraron cada 10 minutos, las 24 horas del día y todos los días del año.

4. Análisis de datos

Con los datos proporcionados por la estación, se establecieron varios indicadores del comportamiento del refuerzo del firme:

- Movimientos horizontales (abertura de fisura).
- Movimientos verticales (escalonamiento de fisura).
- Pulso dinámico.
- Deflexión.

Todos ellos se basan en el análisis de la señal dinámica que se obtiene como resultado del paso de la carga sobre cada sensor. Respecto de la sensorización del tramo se ha de destacar la excelente calidad de las



Figura 6. Ejemplos de señales según los tipos de vehículos

señales registradas, que permitía sacar una información muy precisa.

En cada señal obtenida se puede observar, claramente, el número de ejes del vehículo (lo que permite identificar el tipo de vehículo), incluso la magnitud de su carga. En definitiva, se puede analizar: la magnitud de la señal, la frecuencia entre señales, la forma de la señal y su duración.

Gracias al registro continuado de todas las señales medidas, se obtuvieron diferentes resultados en los indicadores anteriormente descritos, que se explican a continuación

Paralelamente, se realizó el seguimiento del desarrollo de las fisuras a partir de los resultados de las inspecciones visuales realizadas, donde se observó un claro sincronismo entre la aparición de las fisuras en la capa de rodadura y las singularidades que fueron marcando las gráficas de los distintos sensores.

Por último, también se ha realizado el análisis de los datos obtenidos por los sensores meteorológicos y las sondas térmicas y sensores de humedad embebidas a distintas profundidades.

4.1 Parámetros de comportamiento y deterioro del firme:

a) Movimientos horizontales:

Aportan información sobre la abertura de la fisura a través de un

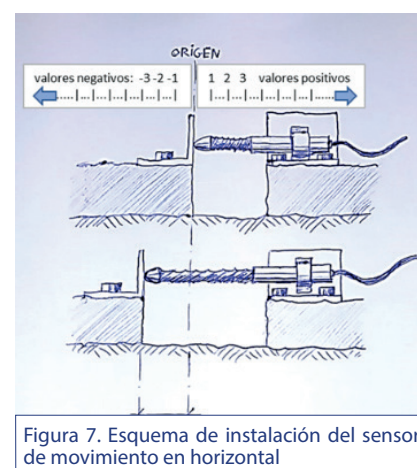


Figura 7. Esquema de instalación del sensor de movimiento en horizontal

sensor de movimiento instalado entre labios de fisura.

Estos sensores pueden ser medidos en "estático", analizando el estado de abertura que tiene la fisura a lo largo del tiempo; o en "dinámico", analizando el movimiento de abertura al tiempo de paso de la carga.

Análisis de la abertura en "estático": se compara el movimiento de abertura de las tres fisuras a lo largo del periodo de años estudiado.

Si los datos se llevan a un gráfico en el que en ordenadas está la abertura en mm y en abscisas el tiempo, se puede observar que las aberturas acompañan a los periodos estacionales, cerrándose en verano y abriéndose en invierno, en un rango de unos 0,6 mm. Por otro lado, a lo largo de los años, la magnitud de la abertura va aumentando ligeramente. En dos de las tres fisuras, que han tenido un comportamiento muy similar, en cada periodo anual las fisuras

van ganando amplitud de abertura en orden de 0,1 mm/año.

Análisis de la abertura en “dinámico”: se estudia, a lo largo del periodo de años, la máxima abertura de la fisura al paso de las cargas.

En este caso, en un gráfico homólogo, que contempla las tres fisuras a lo largo del tiempo, se puede observar cómo en los periodos estivales la máxima amplitud de señal es más alta y en los inviernos, más baja.

Esto correspondería al menor módulo de la mezcla en verano, provocando las cargas mayores deformaciones.

A su vez, a lo largo de los años, la amplitud de respuesta va aumentando ligeramente, seguramente por la disminución del módulo al envejecer la mezcla. En este sentido, si se ajustan rectas de regresión a cada una de las nubes de puntos de cada fisura, marcan una evolución muy similar de los movimientos horizontales, obteniéndose en todas unas pendientes ascendentes en torno a las 3 millonésimas.

Por otro lado, si comparamos los movimientos horizontales entre rodadas en cada fisura, podremos comprobar que la rodada derecha tiene valores ligeramente más elevados que la rodada izquierda, en un rango entre 4 y 6 micras.

Esto puede deberse a que la fisuración comienza por el exterior de la calzada (lado derecho), lo que podría deberse al efecto del bombeo transversal y a que, en el arcén, el espesor de mezcla bituminosa sobre la gravacemento es menor, haciendo esta zona más vulnerable.

En este sentido, resulta interesante comprobar cómo en los periodos de verano se altera claramente la pauta, igualándose el movimiento horizontal de ambas rodadas. No se ha encontrado una causa clara para este fenómeno, pero podría influir

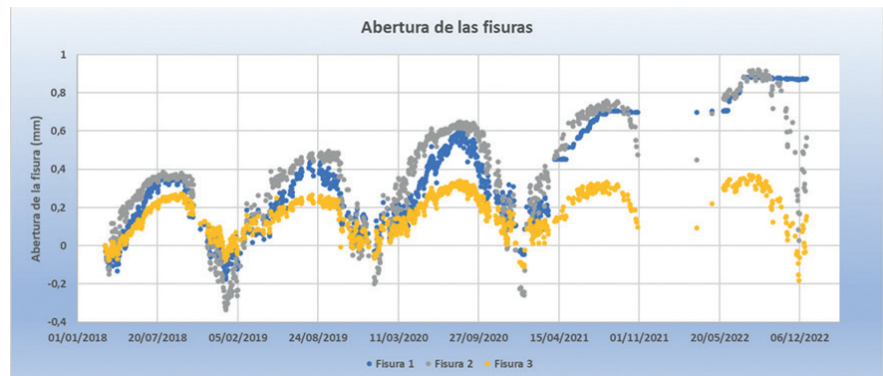


Figura 8. Aberturas en mm de cada fisura a lo largo del periodo de estudio

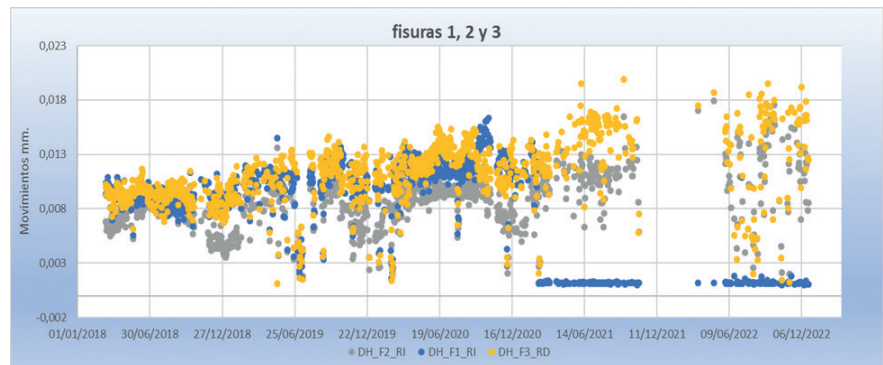


Figura 9. Máximas aberturas al paso de una carga a lo largo del periodo de estudio

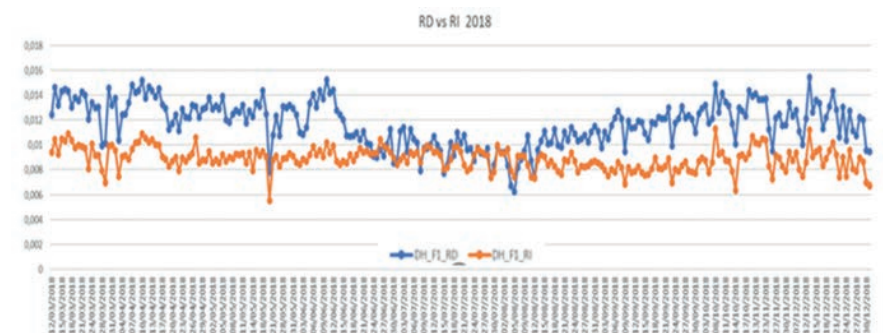


Figura 10. Comparación de movimientos entre ambas rodadas

también la mayor elasticidad de la mezcla en el verano.

b) Movimientos verticales:

Son indicativos de los escalonamientos de la fisura. Igual que los movimientos horizontales, pueden ser medidos en “estático”, analizando el nivel de escalonamiento que tiene la fisura a lo largo del tiempo; o en “dinámico”, analizando el movimiento de cizalla al paso de la carga.

Del análisis en “estático”, se obtuvieron pautas parecidas al parámetro anterior, respecto a la sincronía con

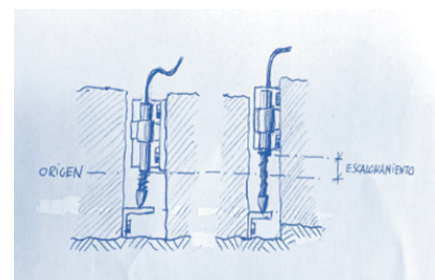


Figura 11. Esquema de instalación del sensor de movimiento en vertical

las variaciones estacionales, aunque con unas curvas más suaves. Ahora los ciclos verano invierno están en amplitudes de 0,2 mm. En cambio, la ganancia de amplitud de un año

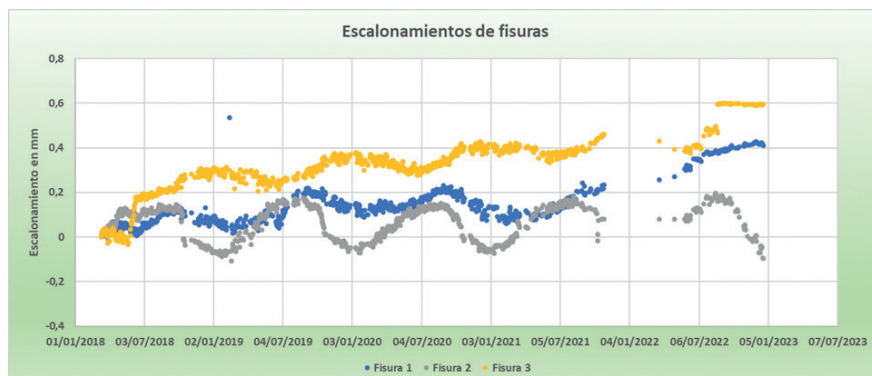


Figura 12. Escalonamientos en mm de cada fisura a lo largo del periodo de estudio

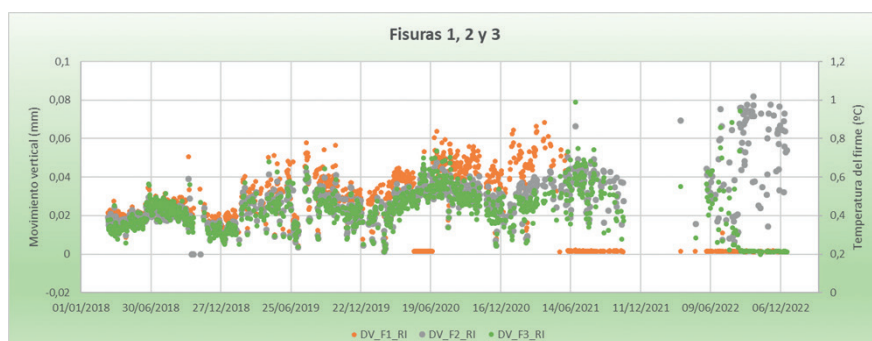


Figura 13. Máximos escalonamientos al paso de una carga a lo largo del periodo de estudio



Figura 14. Pulso dinámico

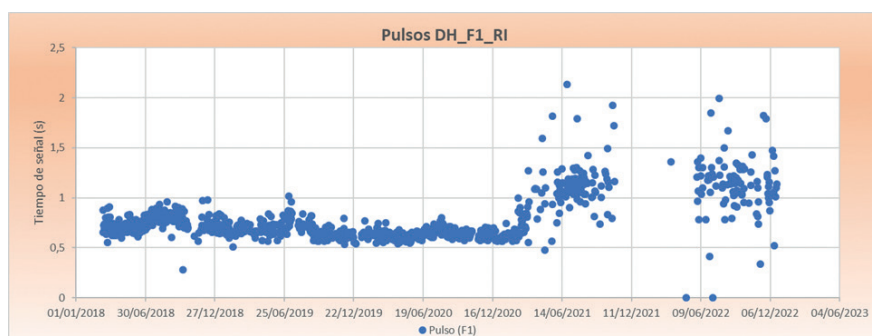


Figura 15. Duración de las señales (pulsos) a lo largo del periodo estudiado

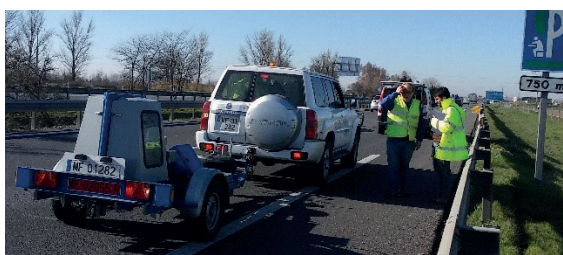


Figura 16. Ensayo con deflectómetro de impacto

a otro está en torno al caso anterior: 0,1 mm/año.

Respecto al análisis “dinámico”, se encuentran resultados similares al análisis “dinámico” de los movimientos horizontales; la amplitud del movimiento de cizalla al paso de la carga va aumentando ligeramente con los años y sus valores también son mayores en la rodada derecha.

Igualmente, si se ajustan rectas de regresión a cada una de las nubes de puntos, todas marcan una evolución muy similar, con pendientes en torno a las 0,2 millonésimas.

c) Pulsos dinámicos

El pulso dinámico es la duración de la señal durante la aplicación de la carga.

El pulso dinámico se mostró muy constante durante los primeros años del sistema de monitorización, estando por lo general comprendido entre 0,5 y 1 segundo. Pero a partir de marzo de 2021, sufrió un aumento en duración y dispersión, llegando hasta los 2 segundos. Este momento coincidió con la aparición en superficie de la primera fisura.

d) Deflexión superficial

El indicador “Deflexión superficial” hace referencia al desplazamiento vertical de la superficie del pavimento al paso de una carga. Los tres sensores de deflexión dispuestos en el tramo tuvieron muy poca vida debido a la agresividad del tráfico. En su lugar, se decidió realizar varias campañas de auscultación con deflectómetro de impacto. Con ello se evaluó, por un lado, la evolución de la deflexión en la zona estudiada y por otro, la evolución de las fisuras a través del grado de transferencia de cargas entre “losas”.

A la vista de las campañas deflecométricas realizadas, se pudo observar que las deflexiones superficiales en todo el periodo se mantuvieron

constantes, con valores muy satisfactorios. Además, pese a estar las fisuras claramente formadas en superficie, el porcentaje de transferencia de cargas entre ambos lados de las fisuras ha sido lo suficientemente alto como para asegurar el correcto comportamiento estructural.

4.2 Parámetros ambientales

En este apartado se analizan los datos proporcionados por la estación meteorológica y, además, por los sensores de temperatura y humedad instalados en el aglomerado y en la explanada.

a) Temperatura y humedad ambiental, radiación y precipitación:

En el período estudiado, los valores de radiación, temperatura y humedad ambiente han sido muy similares todos los años a lo largo del estudio; lo que nos indica que ninguno de ellos ha podido influir de manera particular en el desarrollo de las fisuras.

En cambio, en el caso de las precipitaciones, se observó una disminución brusca a partir del 2021.

Esta circunstancia sí podría haber influido en el desarrollo de las fisuras, pero este periodo de menor precipitación se produjo una vez que las fisuras habían aparecido en superficie. Por tanto, se puede pensar que el proceso de fisuración se desarrolló atendiendo a las características mecánicas del tramo y por las cargas del tráfico, sin ser influido externamente por cambios en los parámetros ambientales.

b) Temperatura del firme

Se han registrado temperaturas en el firme a tres profundidades: 5, 10 y 29 cm. Su análisis se ha realizado de dos formas: una, relativa a las variaciones de temperaturas del firme diarias y, otra, respecto de las variaciones anuales.

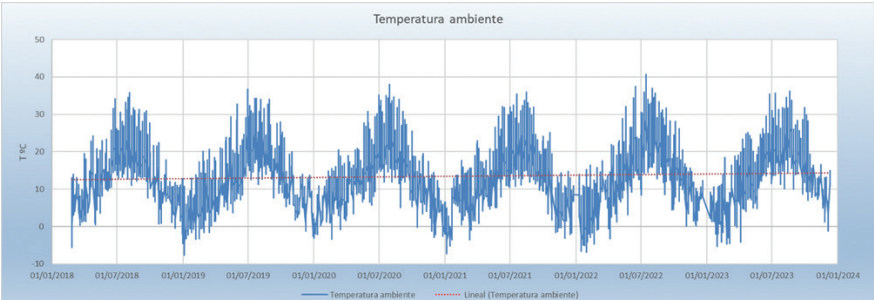


Figura 17. Temperatura ambiente en el periodo estudiado

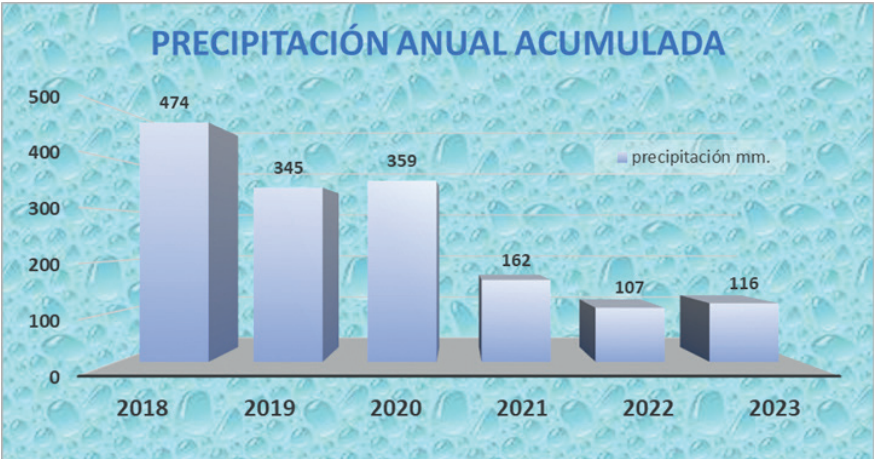


Figura 18. Precipitaciones anuales acumuladas

En cuanto a las variaciones diarias, se contemplan en el siguiente gráfico dos días aleatorios, consecutivos, donde la línea en amarillo representa la radiación solar; la verde, la temperatura ambiente; la negra, la temperatura de la capa de rodadura; la azul, la de la capa intermedia y la roja, la de la base.

Se observan de modo general una serie de peculiaridades:

Los puntos donde empieza a producirse radiación (inicio del día), coinciden exactamente con los momentos en los que la temperatura superficial del firme y la ambiental empiezan a subir. En cambio, la reacción de las temperaturas en capa intermedia y base es más lenta, marcándose un desfase en los comienzos de subida de sus curvas.

Del mismo modo, van adquiriendo sus máximos y sus mínimos de forma desfasada.

A lo largo del día, las curvas térmicas van cambiando su posición relativa, es decir, la capa más profunda, que es la más caliente durante la noche pasa a ser la más fresca durante el día.

El hecho más notable es, sin duda, cómo vuelven las curvas térmicas a su orden inicial, una vez caída la noche. En vez de cruzarse de forma desfasada, como en el proceso de calentamiento del día; en el enfriamiento de la noche, se cruzan las tres curvas en un mismo punto. Esto ocurre, de forma general, en todos los días del año, indicando que hay un momento al anochecer en el que todo el espesor de firme estaría a la misma temperatura, que sería el punto de convergencia térmica.

Por otro lado, cuanto más profunda es la capa, la pendiente de la curva es más tendida, mostrando menores variaciones de temperatura, debido al efecto de abrigo de las capas superiores.

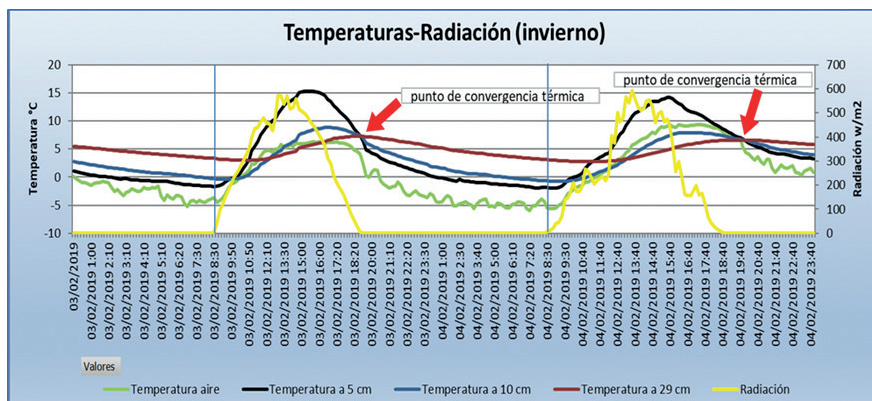


Figura 19. Ciclo térmico en dos días consecutivos

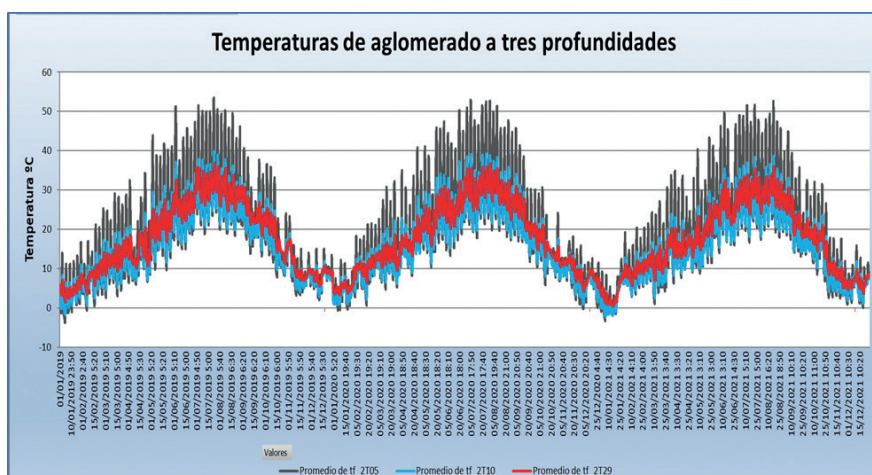


Figura 20. Temperaturas a tres profundidades entre 2019 y 2021

Respecto a las variaciones anuales, en el gráfico siguiente, a modo de ejemplo, se contemplan tres años consecutivos, donde, en este caso:

- La temperatura a 5 cm fluctúa anualmente entre -3°C y 52°C ($T=55^{\circ}\text{C}$).
- La temperatura a 10 cm fluctúa anualmente entre -2°C y 39°C ($T=41^{\circ}\text{C}$).
- La temperatura a 29 cm fluctúa anualmente entre 2°C y 36°C ($T=34^{\circ}\text{C}$).

Lo más relevante en este sentido es que, en relación con las temperaturas máximas, el factor más determinante para la transferencia de calor es la radiación, de forma que la máxima temperatura en la rodadura es notablemente superior al resto de las capas. En cambio, las máximas temperaturas en la intermedia y

la base son muy similares debido al efecto de protección que la capa de rodadura ofrece frente a la radiación.

De otra forma, para las temperaturas mínimas, donde la forma de transferencia de calor entre capas es la conducción, las temperaturas mínimas de las capas de rodadura e intermedia son muy parecidas. La mínima, en la capa de base, es ligeramente superior por la protección que las dos capas superiores le dan. Es decir, podría decirse que la capa intermedia funcionaría térmicamente de manera similar a la rodadura en los momentos fríos y de forma similar a la base, en los cálidos. O sea, que la capa más afectada por altas temperaturas es la capa de rodadura, mientras que la afección por temperaturas bajas, además de la rodadura, se extiende también a la capa intermedia.

El día más frío de la serie fue el 13 de enero de 2021; en el que se registró $-4,5^{\circ}\text{C}$ en la capa de rodadura; $-3,8^{\circ}\text{C}$ en la capa intermedia y 0°C en la base. Coincidió con el final de la borrasca Filomena. En este sentido, se entendió interesante hacer un estudio de la evolución de los días con temperatura por debajo de cero en el firme, a lo largo de la serie de años estudiada.

Como puede verse, el número de días al año en los que se produce esta circunstancia ha tenido una tendencia a ir incrementándose, en el periodo estudiado.

c) Temperatura de la explanada

Este parámetro se midió a un metro de profundidad de la coronación de explanada y se ha analizado su relación con la temperatura de la capa de rodadura. En el siguiente gráfico, correspondiente al año 2019, se observa en trazo azul el abanico diario de temperaturas correspondientes a la capa de rodadura; la línea roja corresponde a la explanada; y las curvas azul oscura y amarilla, a sus polinomios de ajuste respectivos.

En valores medios, la explanada, que se mantiene en un rango entre 8 y 25°C , está más caliente que la superficie de asfalto entre los meses de septiembre y febrero, para pasar a estar más fría entre marzo y agosto.

Evidentemente, la explanada está más protegida térmicamente que las capas de mezcla bituminosa; por lo que, en periodos invernales se mantendrá más caliente que la superficie de aglomerado y, en el estío, más fresca. Lo que llama la atención, en este caso, es la exactitud de las fechas en las que cambia de sentido en todos los años de la serie estudiada (febrero-marzo y agosto-septiembre). Esto se puede apreciar con mayor claridad en las curvas de tendencia.

d) Humedad de la explanada

Los dos sensores de humedad instalados en la explanada se mantuvieron operativos durante todo el periodo de estudio.

Se han comparado los registros de humedad con los datos de precipitación de la estación meteorológica.

Si se analizan los datos de un año concreto, por ejemplo, 2019, se observa que los dos sensores de humedad relativa, aunque no marcan los mismos niveles, se mueven siempre al unísono, reaccionando con respecto a la precipitación cuando se da un umbral de lluvia entre 3 y 5 mm. En ese momento, se distinguen dos patrones; uno en el periodo húmedo, donde se pasa a un estado de saturación con una pendiente muy fuerte y permanece allí unos 8 o 12 días, para después, pasar a un estado seco de forma igualmente brusca. El otro patrón, está en periodo seco, donde las precipitaciones no son suficientes para entrar en saturación y las bajadas son inmediatas al término de las lluvias, formándose picos en las gráficas, en vez de mesetas.

La cantidad de precipitación no parece influir en el tiempo en el que la explanada se mantiene saturada. Independiente de la cantidad y duración de la lluvia, el paso al estado seco sucede al cabo de 8-12 días a partir de que deja de llover o la precipitación desciende por debajo de 3 o 5 mm. Entonces, la explanada pasa de forma casi inmediata estado seco.

El punto, quizás, más interesante, es que generalmente, la explanada no experimenta periodos intermedios de humedad. Tiende a estar en su punto máximo o en su punto mínimo, pasando súbitamente de húmeda a seca y viceversa. Esto, sin duda, corresponde a su carácter

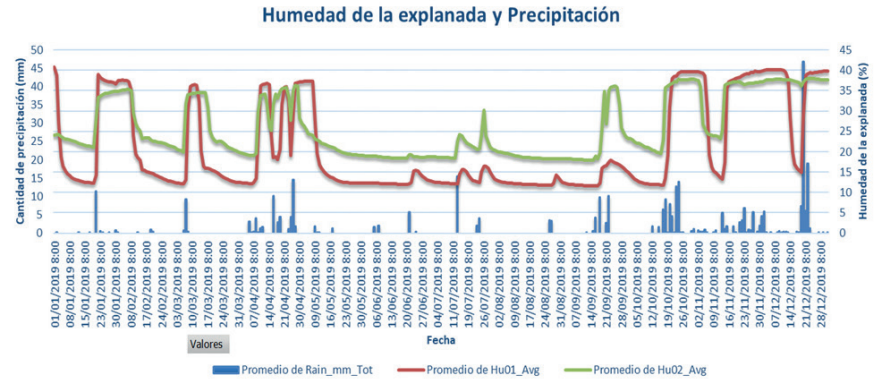


Figura 21. Humedad de explanada y precipitación en un año (2019)

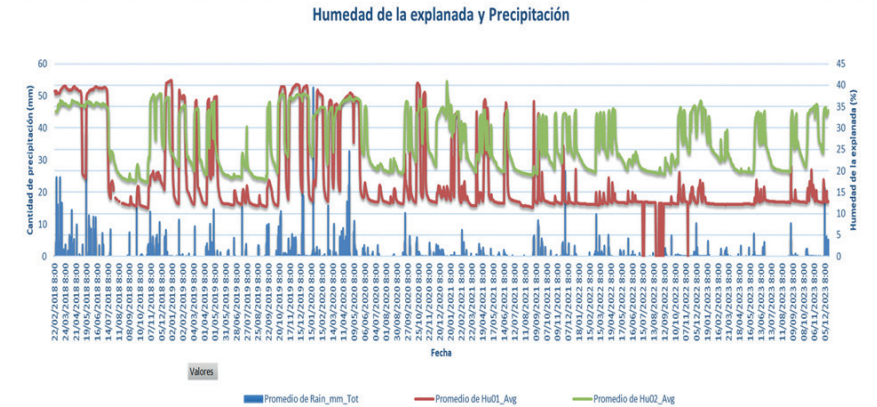


Figura 22. Humedad de explanada y precipitación en la serie anual (2018-2023)

granular, con buenas condiciones de drenaje.

Si se analiza el periodo completo de 2018 a 2023, se observa que a partir de 2021 los periodos de estío empiezan a difuminarse, alternándose temporadas secas y húmedas de forma más anárquica. Además, la forma de las curvas de humedad cambia, presentando máximos más puntiagudos, o sea, los periodos saturados son más breves. Por otro lado, los niveles de saturación bajan sensiblemente. En definitiva, se observa un cambio en la dinámica de humedades de la explanada a partir de 2021, año en el que las precipitaciones experimentaron un claro descenso, como se citó anteriormente.

5. Conclusiones

Por la diversa cantidad de datos obtenidos y por su calidad, se han podido recabar interesantes conclusiones respecto al comportamiento del refuerzo y la variación de determinados parámetros ambientales en el firme (temperatura a varias profundidades y humedad de la explanada).

Respecto al fenómeno de reflexión de fisuras, éste se ha producido aproximadamente en 4 años; los sensores instalados han sido sensibles a este fenómeno, detectando la aparición de la fisura unos meses antes de que ésta se reflejara claramente en la rodadura.

Pese a la formación de las fisuras en superficie y al elevado tráfico pesado, los datos de deflexiones indican que la presencia de esta

fisuración no ha afectado a la transmisión de cargas a través de ellas y, además, la capacidad portante del tramo no se ha visto afectada.

Los movimientos horizontales y verticales dinámicos en las fisuras monitorizadas han ido aumentando a lo largo del periodo de estudio, aumentando en verano y disminuyendo en invierno, probablemente por la mayor rigidez de las mezclas en invierno. La abertura ha ido aumentando aproximadamente 0,1 mm/año y se han acumulado escalonamientos entre labios de fisura entre 0,2 y 0,5 mm durante el periodo de estudio, según la fisura monitorizada.

En cuanto a las temperaturas en las distintas profundidades de las capas bituminosas, la monitorización ha mostrado minuciosamente cuál es la dinámica térmica que se produce en su interior y su relación con los parámetros ambientales externos. Se observa que la capa de rodadura es con diferencia la más sensible a los cambios térmicos y, por tanto, la más expuesta a la influencia del cambio climático. En la capa de rodadura, la menor temperatura mínima registrada fue de -3°C y la mayor temperatura máxima de 52°C, lo que supone una oscilación térmica de 55°C.

Por otro lado, la capa intermedia es casi tan sensible a las temperaturas bajas como la rodadura, de ahí que, respecto a las labores de mantenimiento y rehabilitación, haya que atender a ambas capas de igual forma. En esta capa, la menor temperatura mínima registrada fue de -2°C y la mayor temperatura máxima de 39°C, lo que supone una oscilación térmica de 41°C.

Por último, en la capa de base el rango de temperaturas fluctuó entre 2°C y 36°C, por lo que la variación térmica en el periodo de estudio fue de 34°C.

En relación a la humedad de la explanada y la pluviometría, la monitorización también ha revelado interesantes conclusiones, como el paso entre estados saturado a seco y viceversa, de forma súbita, sin estados intermedios de humedad y de forma casi inmediata al momento en el que se produce la precipitación.

6. Futuras líneas de investigación

Por el excelente nivel de monitorización obtenido en este tipo de estación, se considera interesante efectuar el seguimiento del comportamiento estructural y deterioro de otros refuerzos en la RCE. La línea a seguir, en este sentido, sería la de desarrollar unos equipos más compactos, más simples, con posibilidad incluso de ser portátiles, más fácilmente instalables, y por ende, más baratos.

Particularmente, sería muy interesante implementar un sistema de monitorización en una sección en la que se ejecute un refuerzo con sistemas antirremonte de fisuras en firmes semirrígidos con problemas de reflexión de fisuras procedentes de las capas tratadas con cemento, para avanzar en el comportamiento de este tipo de soluciones de rehabilitación.

Para complementar el conocimiento sobre los parámetros que influyen en la mecánica de los firmes, sería conveniente instalar una báscula dinámica en el sistema de monitorización. Esto permitiría obtener inputs basados en experiencias reales para los modelos de diseño de soluciones de refuerzo.

Con respecto a las conclusiones obtenidas sobre la dinámica térmica dentro de las capas bituminosas y las relativas a la humedad de la explanada, por su afección al cálculo

de las deflexiones y, por tanto, su posible implicación en el cálculo de soluciones de rehabilitación de firmes según la norma 6.3 IC, sería oportuno complementar el estudio llevado a cabo en otras secciones de la RCE, con distintas tipologías de explanada y características climáticas, con el objetivo de conocer en mejor medida la influencia de la humedad de la explanada en las deflexiones medidas en un firme.

Agradecimientos

Los autores del artículo desean expresar el merecido agradecimiento que corresponde al equipo del CEDEX que realizó en 2017 la implantación de la estación de instrumentación, a Belén Cadavid Jáuregui, Julián García Carretero y muy especialmente a Javier Pérez Ayuso.

También se quiere agradecer el apoyo del responsable de este trabajo por parte de la Subdirección General de Conservación y Gestión de Activos y de la Dirección Técnica del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, Álvaro Navareño, por impulsar este proyecto, y la colaboración recibida de la Demarcación de Carreteras del Estado en Castilla y León, en particular a Javier Payán y Ana Isabel Fernández. Por último, se agradece la colaboración técnica de Ángel Pizarro y José Luis Lozano de la compañía H.B.K., y de Jorge T. Ruiz e Iñigo Cenoz, de Eo6 Ingeniería S.L.P. ❖