

## Internet of Things e Inteligencia Artificial para la gestión predictiva de pavimentos de hormigón en aeropuertos (eCONPAVE)

Carlos Fernández Navarro, César Bartolomé Muñoz, Vanesa Calvo Alonso, Salvador Fo Alonso, Jesús Iglesias Heras

1 Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Madrid, España, [cfernandez@ieca.es](mailto:cfernandez@ieca.es)

2 Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Madrid, España, [cbartolome@ieca.es](mailto:cbartolome@ieca.es)

3 AENA SME Madrid, España, [vcalonso@aena.es](mailto:vcalonso@aena.es)

4 AENA SME Madrid, España, [sfo@aena.es](mailto:sfo@aena.es)

5 AENA SME Madrid, España, [jiheras@aena.es](mailto:jiheras@aena.es)

### Resumen

eCONPAVE aborda la digitalización de los pavimentos aeroportuarios de hormigón desde una perspectiva aplicada: medir variables físicas relevantes, interpretarlas con un modelo mecánico y convertirlas en información útil para la conservación. El proyecto se ha centrado en el desarrollo de un primer prototipo de sistema de gestión predictiva basado en sensórica IoT, redes de fibra óptica con sensores FBG, modelización por elementos finitos, arquitectura de datos, inteligencia artificial y un entorno APMS orientado al gestor aeroportuario. La comunicación no desarrolla en detalle la capa de identidad digital mediante RFID y pasaporte digital de producto, aunque la considera como una fuente de trazabilidad material dentro del sistema. El trabajo incluyó la definición de variables críticas del ciclo de vida del pavimento, la selección de sensores de deformación y temperatura, el diseño de una red óptica embebida, el desarrollo de un modelo parametrizado de losas aeroportuarias y la validación experimental sobre una losa de hormigón de 3 x 3 m. Los resultados muestran que la fibra óptica puede instalarse en una losa de hormigón con señales estables durante el hormigonado, curado y ensayo, y que la combinación de datos globales de carga-deflexión con deformaciones locales permite distinguir respuestas reversibles, deformaciones residuales y daño asociado a fisuración. eCONPAVE no sustituye la auscultación convencional ni el criterio técnico del gestor, pero añade una capa continua de información que puede ayudar a priorizar inspecciones, interpretar campañas de deflectómetro y optimizar el mantenimiento de pavimentos críticos.

Palabras Clave: pavimento aeroportuario de hormigón; mantenimiento predictivo; fibra óptica FBG; IoT, Inteligencia Artificial.

### 1 Introducción

Los pavimentos de hormigón en aeropuertos son activos críticos. En plataformas, calles de rodaje y puestos de estacionamiento deben soportar cargas concentradas elevadas, gradientes térmicos, movimientos en juntas, posibles pérdidas de apoyo y requisitos de disponibilidad muy estrictos. Una actuación de conservación mal programada no solo tiene impacto técnico; también puede afectar a la operatividad del aeropuerto y a la planificación de posiciones, rodajes o ventanas de mantenimiento.

La gestión habitual de estos pavimentos se apoya en inspecciones visuales, campañas de deflectómetro, evaluación de transferencia de carga en juntas y cálculos estructurales vinculados al marco ACN/PCN. Esta base técnica es robusta y seguirá siendo necesaria. Su principal limitación es temporal: las campañas son puntuales y, entre dos mediciones, pueden aparecer cambios en la respuesta de la losa, en la eficiencia de las juntas, en el apoyo de la base o en la deformación residual acumulada.

eCONPAVE plantea una capa complementaria de información continua. La idea no es sustituir la auscultación convencional, sino conectar el conocimiento del pavimento con sensores embebidos, modelos mecánicos e inteligencia artificial. Así, los datos de deformación, temperatura y carga pueden interpretarse dentro de una lógica estructural, en lugar de tratarse como señales aisladas. Esta aproximación es especialmente útil en firmes de hormigón, donde el comportamiento de cada losa depende de su geometría, su apoyo, sus juntas, su historia térmica y su interacción con cargas repetidas.

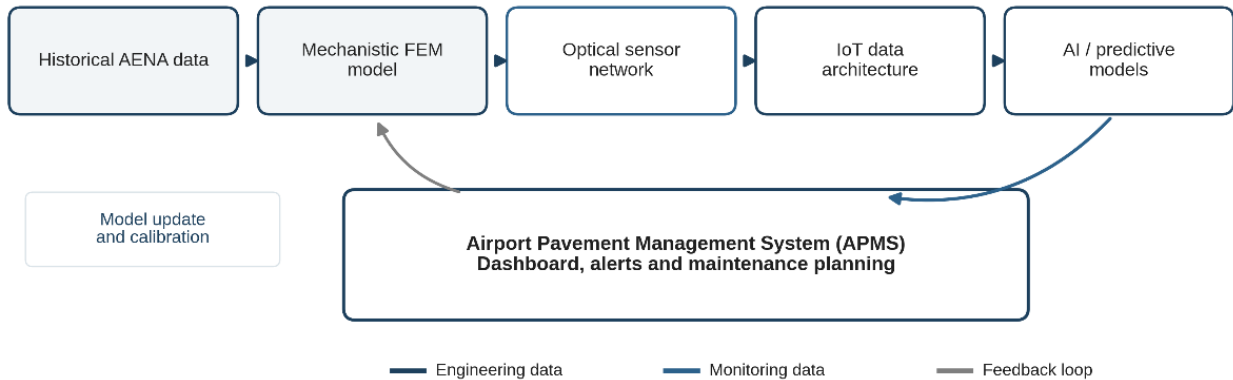


Figura 1. Flujo general de datos eCONPAVE.

## 2 Objetivos y enfoque metodológico

El objetivo del proyecto fue desarrollar un primer prototipo de herramienta inteligente para la gestión predictiva de pavimentos de hormigón en aeropuertos. Para ello se combinaron cinco líneas de trabajo: modelo de comportamiento, sistema IoT, arquitectura de datos y algoritmos, entorno APMS y validación experimental. La secuencia seguida fue deliberadamente próxima a la práctica de ingeniería: primero se identificaron las variables que explican el comportamiento del pavimento, después se modelizó la respuesta esperada y, a partir de ahí, se definió dónde y cómo medir.

Este orden es importante. En infraestructuras críticas, un algoritmo predictivo solo aporta valor si las variables de entrada tienen significado físico y si el gestor puede interpretar por qué se genera una alerta o una recomendación. Por eso eCONPAVE no se diseñó como una plataforma genérica de sensores, sino como un sistema anclado en la mecánica de los pavimentos rígidos aeroportuarios.

Tabla 1. Estructura técnica del proyecto eCONPAVE.

Actividad	Finalidad técnica	Salida principal
Modelo de comportamiento	Identificación de variables, datos históricos y modelo MEF parametrizado.	Base mecánica para interpretar losas, juntas y respuesta bajo carga.
Sistema IoT	Selección de sensores, dosificación compatible, adquisición y almacenamiento de datos.	Arquitectura de sensorización óptica y comunicación.
Algoritmos inteligentes	Estructuras de datos, detección de anomalías y predicción de deterioro.	Comparación modelo-dato y generación de indicadores predictivos.
Capa APMS	Traducción de resultados en cuadros de mando, consultas y alertas.	Interfaz orientada a inspección y conservación aeroportuaria.
Validación experimental	Construcción y ensayo de losa sensorizada de 3 x 3 m.	Evidencia de instalación, calidad de señal y respuesta estructural.

### 3 Variables de comportamiento y arquitectura IoT

La primera fase del trabajo consistió en separar la información del pavimento en tres niveles: información fija, información variable e información interpretada. La información fija incluye la identidad del hormigón, la dosificación, los materiales, la geometría de losas, las capas inferiores y los datos de construcción. La información variable procede de sensores y campañas de auscultación: deformación, temperatura, humedad, carga aplicada, respuesta en juntas o estado de la señal. La información interpretada aparece cuando esos datos se comparan con el modelo y con la historia del activo: eficiencia de transferencia, desviación frente al comportamiento esperado, deformación residual, posible pérdida de apoyo o prioridad de inspección.

Dentro de esta arquitectura se contempló también una capa de trazabilidad mediante RFID y pasaportes digitales de producto. En esta comunicación se menciona únicamente como dato de identificación del material y de conexión con la historia de producción y colocación, sin profundizar en su diseño ni en sus ensayos específicos. El foco técnico se sitúa en la sensorica óptica, la modelización y el uso de la información para gestión predictiva.

Tabla 2. Variables prioritarias para la gestión predictiva del pavimento.

Familia de variable	Motivación técnica	Medición prevista
Identidad Digital del hormigón	Permite relacionar respuesta mecánica con materiales, dosificación, edad, ejecución y colocación en obra.	Identificador físico-digital y registro externo de información estructurada del material.
Deformaciones y tensiones	Permiten analizar flexión, respuesta en juntas, transferencia de carga, fisuración y fatiga.	Sensores ópticos FBG de deformación situados en zonas críticas.
Temperatura y madurez	Permiten compensar deformaciones térmicas y entender el comportamiento a edades tempranas.	Sensores ópticos FBG de temperatura integrados en las matrices.
Humedad bajo losa	Aporta información sobre durabilidad, bombeo de finos, retracción, apoyo y condiciones de interfaz.	Variable complementaria para durabilidad.
Condición operativa	Conecta el sistema con deflexiones, transferencia de carga, PCN y decisiones de mantenimiento.	Datos FWD, modelo MEF, APMS y resultados interpretados.

El sistema IoT se organizó en capas. La losa constituye el activo físico; sobre ella se despliega la capa sensorica; posteriormente aparecen la adquisición, el control de calidad, el almacenamiento y la analítica. Esta separación evita mezclar señales brutas con conclusiones de mantenimiento y permite que cada dato conserve trazabilidad hasta su origen.

#### Arquitectura IoT por capas orientada a pavimentos de hormigón aeroportuarios

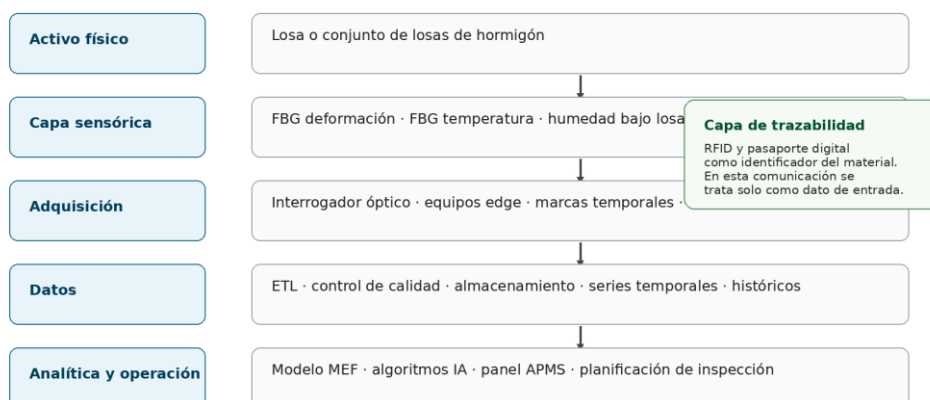


Figura 2. Arquitectura IoT por capas considerada en eCONPAVE.

### 3.1 Selección de sensórica óptica FBG

La tecnología Fiber Bragg Grating (FBG) fue seleccionada como eje de la monitorización de deformación y temperatura. Su interés para un pavimento aeroportuario se debe a varias razones: permite varios puntos de medida en una misma fibra, reduce cableado, presenta inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, puede trabajar embebida o fijada a armaduras, y permite combinar deformación y temperatura en una arquitectura homogénea.

La temperatura no se consideró una variable secundaria. Una losa de hormigón puede deformarse por carga y por gradiente térmico al mismo tiempo. Si no se compensa este efecto, la lectura mecánica puede interpretarse de forma incorrecta. Además, durante el curado, la temperatura aporta información relacionada con la madurez del hormigón y, por tanto, con la evolución inicial de sus prestaciones.



Figura 3. Ejemplo de array FBG empleado para la monitorización de losas

### 3.2 RFID y Pasaporte Digital de Producto (PDP)

La tecnología RFID se implementó como puente físico-digital. La etiqueta RFID no se concibe como el pasaporte digital completo del hormigón. Su función es más robusta: proporcionar un identificador único, como un EPC, que da acceso a un registro digital estructurado de estos pasaportes Digitales de Producto almacenado fuera del material.

Este registro puede contener datos por lotes, constituyentes, diseño de mezcla, fecha de producción, información de transporte y fundición, resultados de pruebas mecánicas, indicadores ambientales, metadatos de sensores y eventos de mantenimiento. En un contexto de pavimento, el DPP puede conectar el lote de hormigón con la losa o sector de pavimento específico donde se colocó. También puede almacenar actualizaciones durante la vida útil.

Esta separación entre identificador físico y registro digital evita sobrecargar la memoria de la etiqueta, permite actualizar la información y crea un enlace rastreable desde producción hasta mantenimiento. También hace que el enfoque sea compatible con activos de larga duración, donde la cantidad de información generada durante el servicio puede ser mucho mayor que la información disponible en el momento de la construcción.

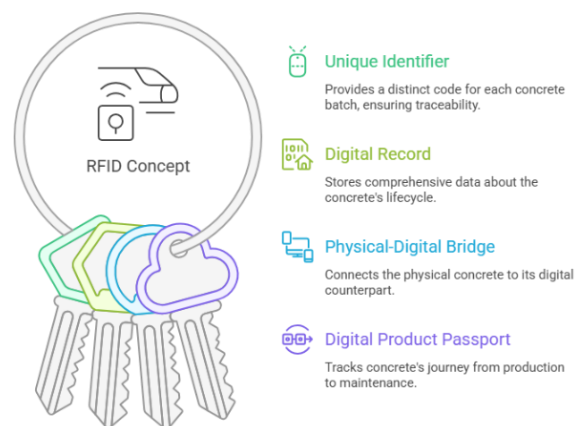


Figura 4. Lógica DPP-RFID

#### 4 Modelo mecánico y posicionamiento de sensores

El modelo de elementos finitos se desarrolló para emular la lógica de evaluación estructural empleada en pavimentos aeroportuarios. Se representó un conjunto de losas de hormigón apoyadas sobre capas inferiores, con contactos entre losas, contacto losa-base, propiedades elásticas parametrizables y posiciones de carga compatibles con ensayos tipo deflectómetro de impacto. La placa de carga de referencia fue circular, de 450 mm de diámetro, y se consideraron distintos niveles y escalones de carga.

La modelización no se planteó únicamente para obtener tensiones y desplazamientos. Su función principal fue generar una respuesta esperada, seleccionar posiciones de sensores y facilitar la comparación posterior entre datos reales y comportamiento teórico de forma que sea una fuente masiva de alimentación de datos para el algoritmo de inteligencia artificial. Esto reduce el riesgo de usar la inteligencia artificial como una caja negra, ya que las desviaciones se pueden analizar frente a una referencia mecánica.

Tabla 3. Características principales del modelo MEF parametrizado.

Elemento del modelo	Implementación en eCONPAVE
Geometría	Retícula de losas de hormigón con análisis detallado de las losas centrales.
Referencia de losa	Dimensiones adaptables; se trabajó con configuraciones de 5 x 5 m en el pre-diseño aeroportuario.
Sistema de capas	Losa de hormigón, capas inferiores y volumen de explanada mejorada.
Carga	Placa circular de 450 mm y distintos niveles de carga.
Juntas	Condiciones de contacto y rozamiento entre losas y entre losa y capa inferior.
Salida de resultados	Desplazamientos, tensiones y deformaciones exportables para el sistema de datos.

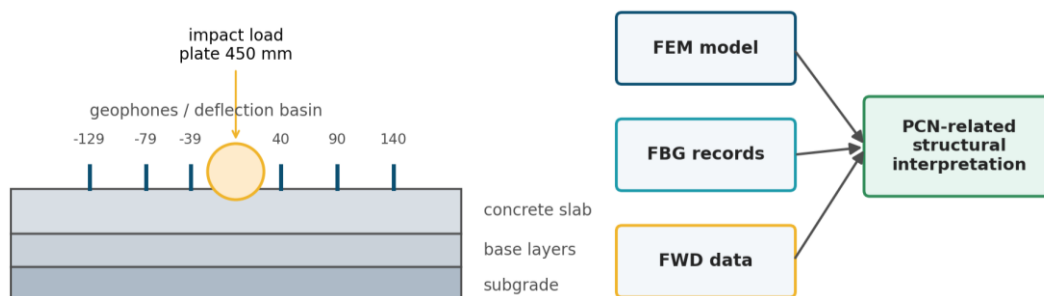


Figura 5. Relación entre auscultación convencional, modelo MEF y registros FBG.

El posicionamiento de sensores se definió a partir de las zonas con mayor interés mecánico: centro de losa, bordes, esquinas y entornos de junta. La red óptica se concibió mediante arrays de sensores, no mediante puntos aislados. Esta decisión permite leer varios sensores con un único interrogador y simplifica la futura implantación en grupos de losas.

El modelo FEM no es solo una herramienta de diseño o verificación. En eCONPAVE pasa a formar parte de la arquitectura de datos. Puede generar características mecanicistas, como rangos de deformación esperados, cuencas de deflexión, concentraciones de tensión y respuesta relativa en las uniones. Estas características pueden compararse con mediciones de sensores o usarse como entradas para algoritmos de IA. El modelo también ayuda a reducir el riesgo de usar la IA como una herramienta puramente estadística. Si un sensor detecta un cambio, el sistema puede evaluar si el cambio es compatible con el comportamiento estructural esperado, con un evento térmico, con una variación en la condición de soporte o con posibles daños.

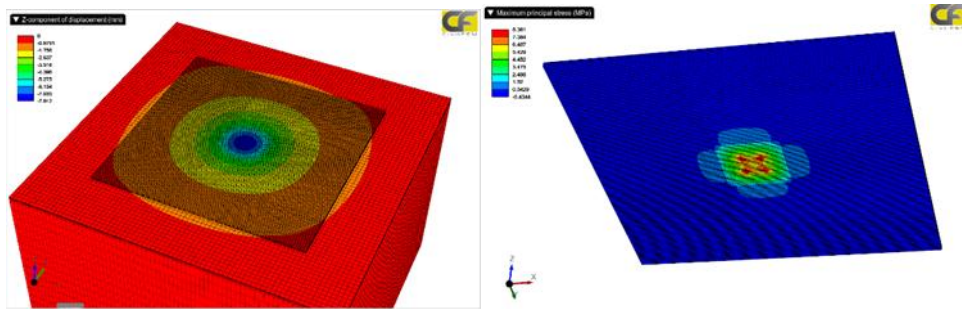


Figura 6. Visualización FEM de la respuesta de la losa de hormigón bajo carga.

El pre-diseño de campo contempló una malla de 3 x 3 losas de 5 x 5 m cada una en el Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas. Para la validación experimental, la prueba de concepto se redujo a una losa controlada de 3 x 3 m, instrumentada con dos arrays ópticos, C2 y D (LOSA C de la figura 4). En conjunto, se instalaron 15 sensores: 9 sensores FBG de deformación FS62RSS-E y 6 sensores FBG de temperatura FS63RTS.

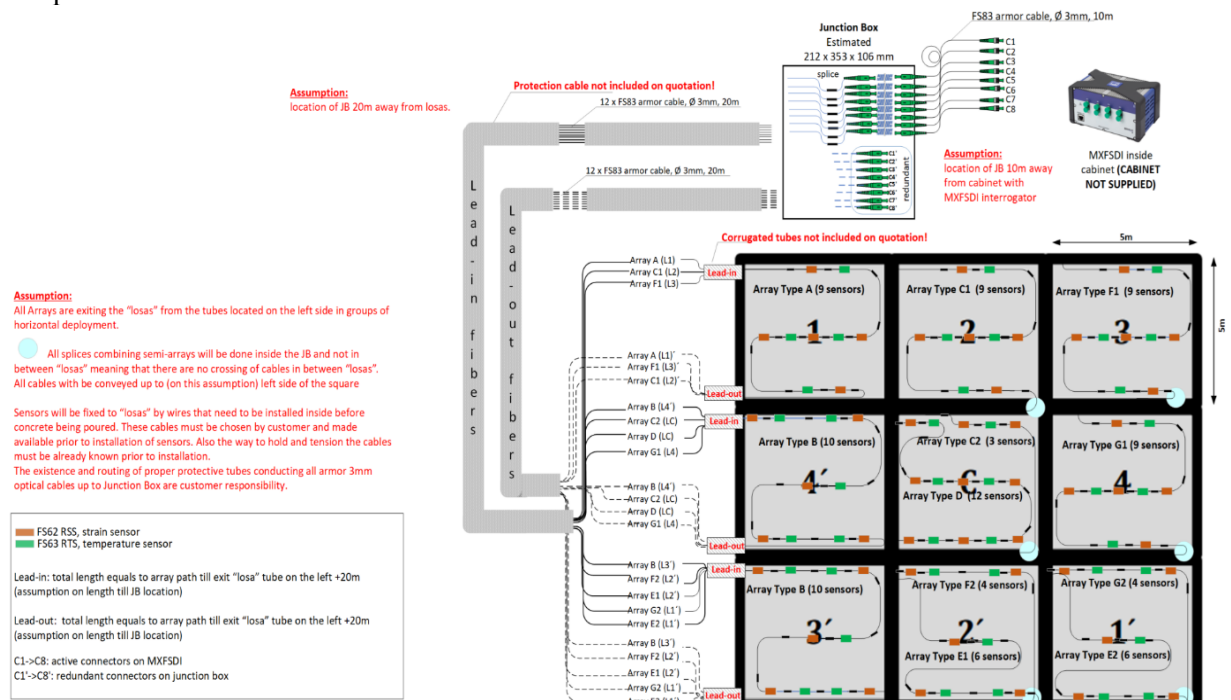


Figura 7. Esquema simplificado de posicionamiento de sensores FBG en el demostrador experimental

## 5 Validación experimental

La validación final se realizó en una losa de hormigón de 3 x 3 m. El hormigón se diseñó para uso en pavimentos, con designación HF-4,5/F/20 USF, cemento CEM II/A-M (P-L) 42,5 R, relación agua/cemento equivalente de 0,40 y contenido de conglomerante de 380 kg/m<sup>3</sup>. La resistencia a flexotracción medida a 28 días fue de 5,6 MPa y la resistencia media a compresión a 40 días fue de 44,2 MPa. Estos valores proporcionaron una base estructural adecuada para el ensayo de demostración.

La instalación de las fibras fue un resultado relevante en sí misma. Los sensores se fijaron a las armaduras con soportes y bridas, se protegieron los recorridos de cable, se verificaron los espectros antes del hormigonado y se mantuvo la adquisición durante el proceso. En obra real, estos detalles son críticos: un sensor adecuado puede fallar si se dobla en exceso, si queda mal protegido durante el vertido o si no se controla la integridad de señal antes de cerrar el elemento.

Tabla 4. Datos principales de la losa experimental sensorizada.

Parámetro	Valor o criterio empleado
Dimensión de losa	3 x 3 m
Hormigón	HF-4,5/F/20 USF
Cemento	CEM II/A-M (P-L) 42,5 R
Relación a/c equivalente	0,40
Conglomerante	380 kg/m <sup>3</sup>
Resistencia a flexotracción	5,6 MPa a 28 días
Resistencia media a compresión	44,2 MPa a 40 días
Sensórica instalada	9 sensores FBG de deformación y 6 sensores FBG de temperatura

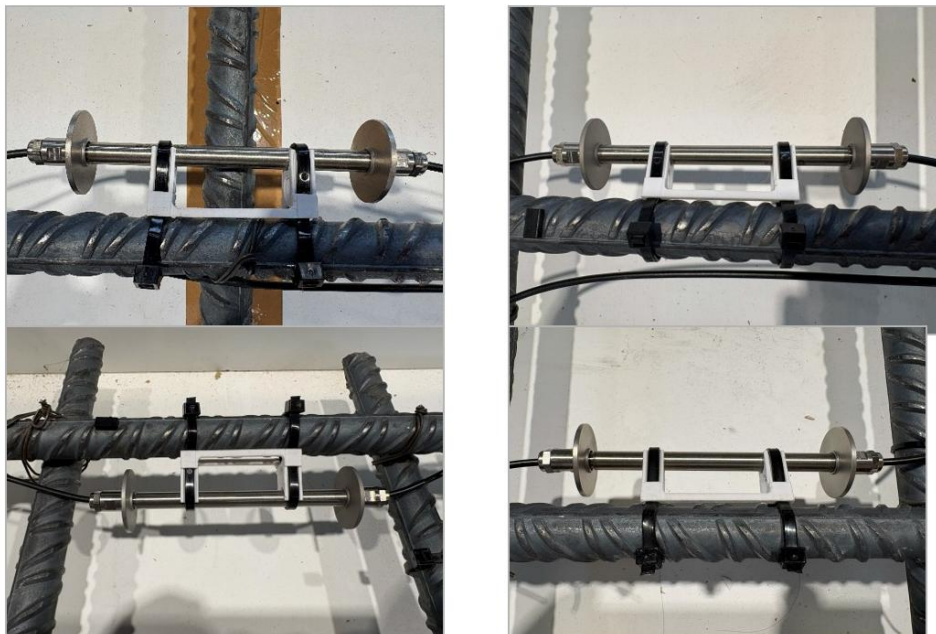


Figura 8. Instalación de sensores ópticos FBG sobre las armaduras de la losa de ensayo.

La instalación en hormigón requiere más que la selección de sensores. El trazado de cables, el radio de curvatura, la protección durante la colada, la fijación al bastidor de soporte, la separación de zonas de alto riesgo y la verificación del espectro óptico antes y después del hormigón son esenciales. Estos aspectos influyen directamente en la fiabilidad del sistema de monitorización y deberían formar parte de cualquier protocolo de despliegue futuro.

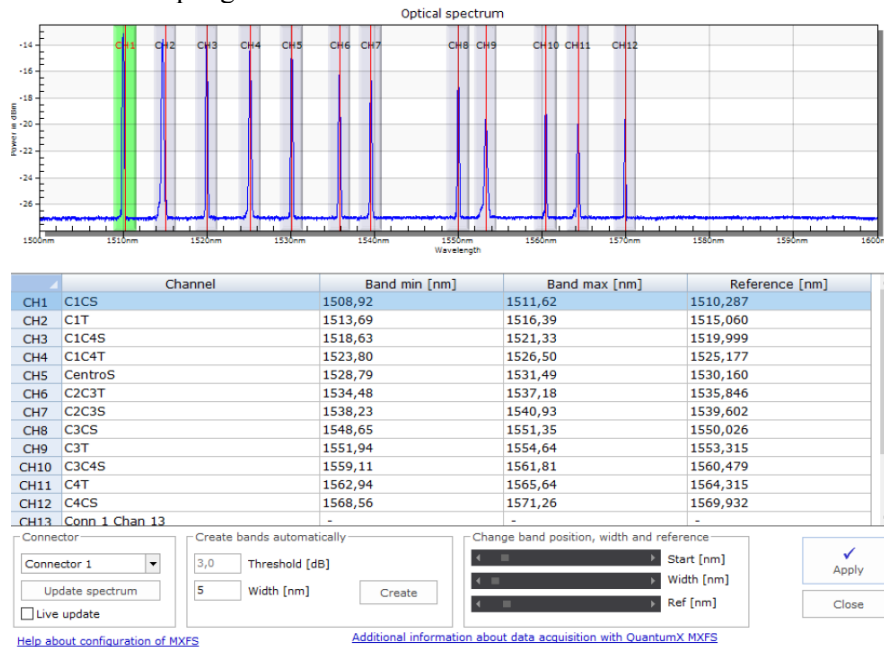


Figura 9. Ejemplo de verificación del espectro óptico tras la instalación del array D

### 5.1 Ensayos de carga y resultados

Durante el ensayo, los sensores ópticos adquirieron datos con una frecuencia de 10 Hz y la máquina de ensayo de 1 Hz. Esta diferencia obligó a sincronizar las series temporales para poder correlacionar carga aplicada, deflexión global monitorizada por la máquina de ensayo y respuesta local de los sensores. El interés del ensayo no estaba solo en alcanzar una carga determinada, sino en generar distintos regímenes de respuesta para alimentar la interpretación predictiva del algoritmo de IA.

Tabla 5. Resultados mecánicos principales de la losa sensorizada.

Ensayo	Configuración	Carga máx. (kN)	Presión máx. (MPa)	Deflexión máx. (mm)	Rigidez secante (kN/mm)	Deflexión residual (mm)	Observación principal
1	Carga centrada	197,9	2,20	6,50	30,5	2,70	Inicio claro de daño y deformación residual elevada.
2	Dos cargas simétricas	260,2	5,78	2,30	113,1	0,20	Respuesta mayoritariamente reversible y diferenciación espacial.
3	Carga centrada alta	353,3	3,93	9,30	38,0	1,44	Respuesta no lineal, fisuración y daño permanente.

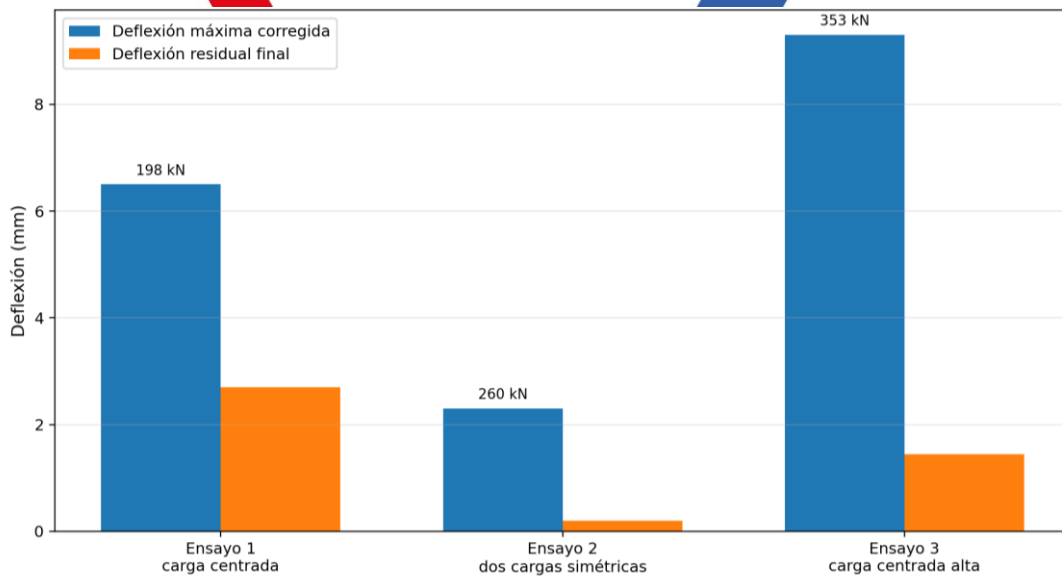


Figura 10. Comparativa deflexiones máximas y residuales en los tres ensayos.

Los resultados permiten distinguir tres comportamientos. El primer ensayo, con carga centrada, alcanzó 197,9 kN y una deflexión máxima corregida de 6,50 mm, con una deflexión residual elevada de 2,70 mm. El segundo ensayo, con dos cargas simétricas, alcanzó mayor carga total, 260,2 kN, pero produjo una deflexión máxima de 2,30 mm y una recuperación prácticamente completa. El tercer ensayo, con carga centrada alta, alcanzó 353,3 kN y generó una deflexión máxima de 9,30 mm, con respuesta no lineal, fisuración y daño permanente.

La lectura local de los sensores aporta una información que la deflexión global no muestra por sí sola. En el ensayo con dos cargas simétricas, los sensores laterales captaron la redistribución de la tracción y el sistema registró una recuperación coherente con la baja deformación residual. En el ensayo de carga centrada alta, el sensor central alcanzó deformaciones más elevadas y mantuvo deformación residual tras descargar. Esta persistencia es coherente con la fisuración observada en la cara inferior de la losa y constituye uno de los argumentos más claros para complementar la auscultación convencional con sensorica embebida.

## 6 Integración en APMS e inteligencia artificial

La capa APMS tiene la función de convertir señales y resultados de modelo en información operativa. Para un gestor aeroportuario, una deformación local o una temperatura aislada no son suficientes. El sistema debe mostrar el estado del sensor, comparar patrones recientes con registros anteriores, detectar desviaciones frente al modelo MEF, relacionar el dato con la losa o sector correspondiente y proponer si procede una inspección, una campaña de auscultación o una actuación de seguimiento.

La arquitectura de datos debe incorporar controles antes de alimentar algoritmos: verificación de unidades, detección de valores fuera de rango, pérdidas de señal, coherencia entre temperatura y deformación, sincronización temporal y evaluación del estado del sensor. Solo después de esta depuración conviene generar variables de entrada para IA, como deformación máxima, deformación residual, pendiente carga-deformación, deriva térmica, energía de ciclo o desviación frente a la respuesta esperada.

En eCONPAVE, la inteligencia artificial se entiende como una capa de apoyo, no como una sustitución del criterio técnico. Su valor está en ordenar datos, detectar patrones y ayudar a priorizar recursos. El modelo mecánico proporciona explicabilidad y evita que el sistema aprenda únicamente correlaciones estadísticas sin base física. Esta combinación es especialmente importante en pavimentos aeroportuarios, donde las decisiones de conservación deben ser trazables y conservadoras.

## 7 Discusión

El principal valor de eCONPAVE es pasar de una gestión basada solo en campañas discontinuas a una gestión apoyada en conocimiento continuo del comportamiento de las losas. Esto puede mejorar la priorización de inspecciones, la interpretación de campañas de deflectómetro, la detección de comportamientos anómalos y la planificación de mantenimiento con menor interferencia operacional. Desde el punto de vista de sostenibilidad, una mejor programación puede reducir intervenciones innecesarias, consumo de materiales, generación de residuos y reparaciones urgentes.

La tecnología aún requiere validación en condiciones reales de aeropuerto. La losa de laboratorio permitió controlar variables y demostrar la viabilidad de instalación y lectura, pero no reproduce de forma completa ciclos térmicos, tráfico real, restricciones de operación, exposición a largo plazo ni mantenimiento bajo ventanas aeroportuarias. También será necesario definir redundancia de sensorica, protocolos de reparación, criterios de aceptación de señal y calibración con campañas reales de auscultación.

A pesar de estas limitaciones, los resultados son suficientemente sólidos para justificar el siguiente paso: un piloto en entorno operativo controlado, preferiblemente sobre un conjunto reducido de losas donde se combinen mediciones FBG, auscultación convencional, datos de construcción y seguimiento APMS. Esta transición permitirá calibrar el sistema frente a pavimentos reales y ajustar los algoritmos con datos de servicio.

## 8 Conclusiones

eCONPAVE ha demostrado la viabilidad técnica de una metodología de gestión predictiva para pavimentos aeroportuarios de hormigón basada en sensorica IoT, fibra óptica FBG, modelo mecánico, arquitectura de datos e inteligencia artificial. El resultado no es un conjunto aislado de sensores, sino un flujo de trabajo orientado a decisiones de conservación.

- La selección de sensores FBG de deformación y temperatura es coherente con las necesidades de un pavimento rígido aeroportuario: permite medir en continuo, integrar varios puntos en una misma fibra, reducir cableado, compensar efectos térmicos y localizar la respuesta en zonas críticas de la losa.
- El modelo de elementos finitos constituye la base física del sistema. Permite seleccionar posiciones de medida, generar respuestas esperadas y comparar los datos registrados con un comportamiento mecánico explicable. Esta conexión es esencial para que la IA no se limite a una lectura estadística de señales.
- La losa experimental de 3 x 3 m validó la instalación de 15 sensores ópticos y generó un conjunto de datos útil para diferenciar respuesta reversible, deformación residual y daño por fisuración. Los tres ensayos de carga demostraron que la combinación de deflexión global y deformación local aporta más información que cualquiera de las dos mediciones por separado.
- La capa de trazabilidad del material mediante RFID y registros digitales se considera dentro de la arquitectura como información fija de identidad y producción, pero su desarrollo específico queda fuera del alcance de esta comunicación. Su integración futura permitirá relacionar comportamiento en servicio con datos de fabricación, materiales y ejecución.

El siguiente paso debe ser la validación en entorno aeroportuario real, con calibración frente a campañas de auscultación y seguimiento de largo plazo. Si esa etapa confirma la robustez observada en laboratorio, eCONPAVE puede convertirse en una herramienta útil para reducir incertidumbre, priorizar mantenimiento y alargar la vida útil de los pavimentos de hormigón en infraestructuras críticas.

### Agradecimientos

El proyecto eCONPAVE (CPP2021-008702) ha sido desarrollado mediante colaboración público-privada con participación de Aena SME, S.A., el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) y Accuro Technology S.L., con apoyo técnico de la Universidad Politécnica de Madrid / Fundación Agustín de Betancourt y HBK FiberSensing en la instrumentación óptica.



### Referencias

[1] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Aerodrome Design Manual, Part 3: Pavements.