

SISTAM: Un sistema disruptivo para el diagnóstico no invasivo de la penetración de cloruros en infraestructuras de hormigón armado

Jesús Aivar¹, Victor Hernández², Natalia Ramirez³

¹ SISTAM/NeutronXplore, Paracuellos de Jarama, Madrid, España, jesus.aivar@sistam.eu

² SISTAM/NeutronXplore, Paracuellos de Jarama, Madrid, España, victor.hernandez@sistam.eu

³ SISTAM/NeutronXplore, Paracuellos de Jarama, Madrid, España, info@sistam.eu

Resumen

El diagnóstico del estado interno de infraestructuras civiles representa actualmente uno de los principales retos en los planes de mantenimiento predictivo y conservación de activos estratégicos.

Diversos estudios internacionales estiman que el deterioro de infraestructuras críticas generará pérdidas superiores a 2,5 billones de dólares anuales a nivel global [1]. Asimismo, el mercado asociado a tecnologías avanzadas de monitorización y mantenimiento predictivo presenta tasas de crecimiento superiores al 10,4% CAGR [2], impulsadas por la necesidad de aumentar la resiliencia y vida útil de las infraestructuras civiles.

En infraestructuras de hormigón armado, la corrosión inducida por cloruros constituye aproximadamente el 70% [3] de las causas de reducción de vida útil estructural. Este fenómeno resulta especialmente crítico en estructuras postesadas, donde el deterioro puede evolucionar internamente sin evidencias superficiales hasta alcanzar estados avanzados de fallo ej. Puente Moradi, O-Castro, etc.).

En este contexto, la solución SISTAM propone el desarrollo de un sistema innovador de auscultación profunda basado en tecnología de neutrones, empleando sensores avanzados y algoritmos para la determinación del perfil de cloruros en infraestructuras civiles. El sistema busca proporcionar capacidades sin precedentes en la detección y análisis interno en estructuras de hormigón, y otros elementos constructivos críticos por ejemplo en puentes postesados y zonas concretas de difícil acceso como los anclajes de tendones de acero, permitiendo identificar de forma no invasiva, si existe corrosión interna, presencia de humedad u otras patologías químicas, con elevada precisión.

La solución integra una técnica desarrollada y aplicada por la empresa NeutroXplore y un centro de investigación del CSIC que ha sido validada a nivel laboratorio, estando actualmente desarrollando el prototipo, de forma que se disponga de una herramienta crucial para generar modelos de diagnóstico avanzados orientados al mantenimiento predictivo y la optimización de costes de conservación. El enfoque planteado pretende mejorar significativamente la seguridad, sostenibilidad y eficiencia en la gestión de infraestructuras civiles.

El presente trabajo describe la solución del sistema, los retos técnicos asociados al desarrollo y las principales aplicaciones previstas en el ámbito de la ingeniería civil e industrial.

Palabras Clave: Auscultación profunda, Corrosión, Neutrones, Estructuras Postesadas, mantenimiento predictivo.

1 Introducción al problema

La creciente necesidad de garantizar la seguridad y durabilidad de infraestructuras críticas ha impulsado el desarrollo de nuevas técnicas de inspección no destructiva capaces de proporcionar información precisa sobre el estado interno de las estructuras. Las metodologías tradicionales presentan limitaciones en cuanto a profundidad de inspección, resolución y capacidad de caracterización interna.



Figura 1. Imagen del colapso del puente Moradi (2018) [4]

Numerosas infraestructuras civiles construidas durante los últimos 60-70 años —como puentes, vasijas de contención de centrales nucleares, estructuras offshore o determinadas infraestructuras portuarias— incorporan sistemas de tendones postesados de acero de alta resistencia como elemento esencial para garantizar su capacidad portante e integridad estructural.

Estos tendones están generalmente constituidos por cordones de acero trefilado alojados en vainas metálicas o poliméricas e inyectados posteriormente con lechadas cementosas o grasas protectoras para minimizar los procesos de corrosión. Sin embargo, la experiencia acumulada en las últimas décadas ha demostrado que dichas barreras de protección no siempre resultan completamente eficaces. Deficiencias en los procesos de inyección, daños en las vainas, fallos de impermeabilización o la penetración progresiva de humedad y agentes agresivos, especialmente cloruros, pueden favorecer la aparición de procesos de corrosión localizada en los tendones.

Este fenómeno resulta especialmente crítico en sistemas pretensados y postesados debido a las elevadas tensiones mecánicas a las que se encuentra sometido el acero. En estas condiciones, mecanismos como la corrosión por picaduras o la corrosión bajo tensión pueden desarrollarse de forma prácticamente inadvertida y derivar en roturas frágiles y repentinas, con consecuencias potencialmente catastróficas para la seguridad estructural.



Figura 2. Izquierda: vaina metálica corrugada con procesos avanzados de oxidación. Derecha Sección transversal de un tendón postesado compuesto por cordones de 7 alambres [5].

De acuerdo con la figura a continuación las técnicas actuales (extracción de probetas con análisis posterior de laboratorio, cámaras multispectrales, difracción por rayos X, etc.) que se emplean para analizar la corrosión, son invasivas o se limitan a nivel superficial. Por otro lado, las soluciones no invasivas —como imagen o mediante ultrasonidos— no ofrecen información química y detectan daños solo cuando ya son visibles o detectables macroscópicamente.



Figura 3. Diagrama de las técnicas convencionales para estudiar corrosión (Fuente: Elaboración Propia)

Las técnicas convencionales de auscultación, basadas principalmente en métodos electroquímicos superficiales o en la extracción localizada de testigos, permiten únicamente detectar daños ya avanzados o requieren procedimientos destructivos, lentos y costosos. Existe, por tanto, una necesidad tecnológica clara en desarrollar soluciones capaces de realizar una auscultación profunda, no invasiva y predictiva de este tipo de infraestructuras, permitiendo identificar procesos de corrosión interna antes de que se manifiesten externamente mediante fisuración, pérdida de sección resistente o fallos estructurales.

2 Objetivos del proyecto

El programa SISTAM propone el desarrollo de un sistema avanzado de auscultación basado en técnicas que emplean radiación neutrónica incidente para caracterizar a través de su interacción con la materia, el estado químico interno de estructuras de hormigón armado y pretensado a gran profundidad.

La tecnología SISTAM tiene como objetivo proporcionar una herramienta de diagnóstico innovadora, inexistente actualmente en el mercado, especialmente orientada a infraestructuras críticas donde las técnicas convencionales de inspección presentan importantes limitaciones operativas, de penetración y de sensibilidad frente a procesos de degradación interna.

La detección temprana de estos procesos de degradación constituye uno de los principales retos en el mantenimiento de infraestructuras críticas ya que las técnicas convencionales de inspección presentan importantes limitaciones debido a la profundidad a la que se localizan los tendones y a

la imposibilidad de acceder directamente a ellos sin recurrir a actuaciones invasivas o destructivas.

Frente a esta problemática, SISTAM persigue validar una nueva aproximación tecnológica capaz de realizar una auscultación profunda, no invasiva y fiable del estado interno de estructuras críticas. El sistema permitirá detectar de forma temprana la presencia y concentración de cloruros a diferentes profundidades, proporcionando una medida directa del riesgo asociado a procesos de corrosión interna antes de que estos se manifiesten externamente mediante fisuración, desprendimientos o pérdida de capacidad resistente.

Asimismo, el programa pretende demostrar la viabilidad de sistemas transportables de inspección avanzada capaces de operar in situ sobre infraestructuras reales, proporcionando información de alto valor para estrategias de mantenimiento predictivo, gestión de activos y extensión de vida útil de infraestructuras críticas.

En este contexto, SISTAM aspira a convertirse en un estándar de referencia para el diagnóstico avanzado de estructuras de hormigón pretensado y postesado, contribuyendo al desarrollo de nuevas metodologías de inspección profunda aplicables al ámbito de la ingeniería civil y las infraestructuras estratégicas.

3 Estado actual del programa SISTAM

Hasta la fecha, hemos completado con éxito la viabilidad científico -técnica de la técnica en entorno de laboratorio. Para ello, además de simulaciones previas se han realizado ensayos experimentales sobre muestras representativas de hormigón con los mismos materiales empleados en infraestructuras civiles construidas hace más de 50 años, incorporando barras de acero de 8mm de diámetro, con distintos grados de corrosión inducida.

Estas pruebas empíricas han permitido verificar la capacidad de la técnica para detectar variaciones asociadas a procesos de degradación interna y establecer una primera correlación para la detección y cuantificación de cloro en hormigón, así como a la determinación de la profundidad a la que éste se encuentra embebido en la estructura.

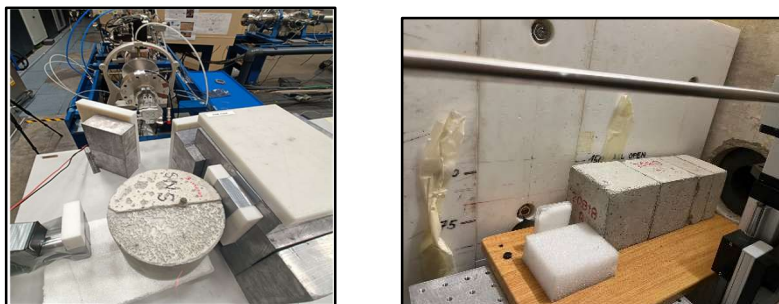


Figura 4. Interior del búnker de irradiación durante las medidas experimentales

Paralelamente, se ha desarrollado la ICU (Instrument Control Unit), considerada uno de los subsistemas críticos de la arquitectura del sistema SISTAM. Esta unidad es la encargada de la operativa de los módulos principales, su sincronización y la adquisición y procesamiento de las señales generadas durante la inspección. Esta unidad constituye el “cerebro” del sistema, integrando funcionalidades de coordinación de secuencias de análisis y calibración, interfaz con el usuario, presentación y exportación de resultados, así como protocolos de seguridad y protección radiológica asociados a la operación del sistema.

Asimismo, se han realizado primeras sesiones de validación funcional de la unidad centralizada de control (E-box), como etapa previa a su transición hacia un nivel industrial.



Figura 5. Prototipo funcional de la ICU SISTAM, “E-BOX”

Actualmente, los trabajos se centran en el planteamiento del subsistema mecatrónico, orientado al diseño de la plataforma de posicionamiento, integración y operación de SISTAM en entornos reales de inspección. En esta línea, se están evaluando configuraciones basadas en brazos robóticos y sistemas de reconocimiento del entorno mediante tecnología LIDAR, con capacidad de planificación y ejecución de trayectorias seguras y reconfiguración dinámica durante la inspección.

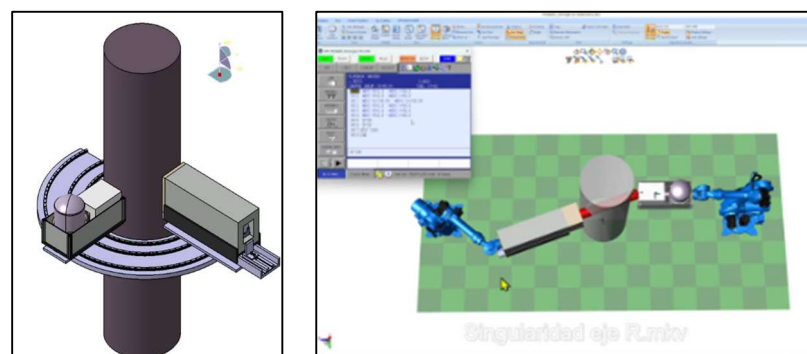


Figura 6. Concepto inicial del sistema (izq). Simulación del sistema mecatrónico de SISTAM utilizando brazos robóticos (drcha.)

El objetivo es avanzar hacia plataformas transportables y robustas capaces de operar sobre infraestructuras complejas, garantizando precisiones milimétricas en el alineamiento emisor-receptor y reduciendo la dependencia de la operación manual en futuras campañas de auscultación in situ.

4 Financiación y pasos futuros

Tras la validación experimental alcanzada hasta la fecha en entorno de laboratorio, el programa SISTAM afronta una nueva fase orientada al desarrollo de un prototipo mínimo viable (MVP) capaz de operar en entornos reales de inspección.

El objetivo estratégico del programa es disponer en 2028 de un sistema piloto plenamente integrado y validado en campañas reales de auscultación sobre infraestructuras civiles críticas, particularmente en puentes postesados, infraestructuras portuarias y estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes agresivos.

Esta fase permitirá demostrar la operatividad, repetibilidad y robustez del sistema en condiciones representativas de uso operativo como paso previo al inicio de su comercialización previsto para 2029.

Para alcanzar dicho objetivo, la hoja de ruta de madurez de la innovación tecnológica contempla varias líneas de avance:

- Evolución desde configuraciones de laboratorio hacia un sistema compacto y transportable de SISTAM.
- Desarrollo del sistema mecatrónico para posicionamiento semi-automatizado y operación segura en campo.
- Fabricación y validación del prototipo mínimo viable.
- Integración avanzada de la ICU con los módulos principales reales para verificar los protocolos de seguridad, automatización operativa y tratamiento inteligente de datos.
- Desarrollo de algoritmos avanzados de reconstrucción, correlación físico-química y análisis predictivo apoyados en IA.
- Ejecución de campañas piloto sobre infraestructuras reales en colaboración con operadores y propietarios de infraestructuras.
- Desarrollo del marco de certificación y procedimientos operativos necesarios para su explotación comercial.

Se ha estimado que la transición desde el estado actual de desarrollo hasta un MVP validado en entorno operacional requerirá una inversión acumulada del orden de 2M de euros durante el periodo 2027-2028, dependiendo del alcance de las campañas piloto, el grado de madurez del sistema y las capacidades de automatización finalmente integradas.

Esta financiación permitiría acelerar significativamente la maduración tecnológica del sistema y consolidar una solución Deeptech única en el ámbito de la auscultación no destructiva avanzada de infraestructuras civiles.

En este contexto, NeutronXplore busca actualmente la incorporación de socios estratégicos e inversores privados que permitan acompañar el crecimiento tecnológico y empresarial del programa SISTAM, facilitando la incorporación en las participaciones de la sociedad para continuar con la siguientes fases de su desarrollo y comercialización:

La compañía considera especialmente relevante la participación de entidades vinculadas a:

- mantenimiento y conservación de infraestructuras;
- fondos especializados en deeptech e infraestructuras críticas.
- ingeniería civil de patologías químicas en estructuras
- empresas de construcción y concesionarias;
- sector energético y nuclear;

El objetivo de esta apertura es establecer alianzas que permitan no solo financiar la evolución tecnológica del sistema, sino también acelerar su futura implantación industrial y comercial a escala nacional e internacional.

La validación satisfactoria del MVP de SISTAM abriría la puerta a una nueva generación de estándares de diagnóstico profundo orientadas al mantenimiento predictivo de infraestructuras críticas, posicionando a España y al ecosistema industrial asociado en una posición de liderazgo internacional en el ámbito de la auscultación avanzada mediante técnicas neutrónicas.

5 Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo recibido por parte del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través del Programa Torres Quevedo (PTQ2023-013267), así como a la Fundación para el Conocimiento Madri+d, ESA BIC Madrid Region (Ref. 4000139801/22/NL/MM/an) y al programa Deeptech Madrid, por su apoyo al emprendimiento y desarrollo inicial de SISTAM.

Igualmente, destacar el respaldo de la Agencia Espacial Europea (ESA), la Agencia Espacial Española (AEE) y al programa ESA Broker Spain (Ref.4000144531-SF-01-2024) indispensables para la maduración de la transferencia tecnológica hacia otras aplicaciones no espaciales y al desarrollo del prototipo ICU. Por último, agradecer al programa CSIC COCREA por impulsar la transferencia de conocimiento científico hacia aplicaciones industriales innovadoras en colaboración con científicos e institutos generadores de conocimiento (IFIC).

Esperamos seguir contando con su apoyo en fases sucesivas del desarrollo del prototipo mínimo viable de SISTAM.

6 Referencias

- [1] Weichen Xu, Ruiyong Zhang, Jizhou Duan, Donal Terry Greenfield (April 2024). *Corrosion is a global menace to crucial infrastructure act to stop the rot now*. www.nature.com.
- [2] Structural Health Monitoring Market Size & Share – Global Forecast to 2029 (April 2014). *MarketsandMarkets™* <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/structural-health-monitoring-market-101431220.html>
- [3] Nuria Rebolledo IETCC Foro ARPHO 4/03/2026. Monitorización de la durabilidad de la reparación en estructuras de hormigón armado Presentación IETCC CEDEX
- [4] El periódico.com 14/08/2018. Imagen “Vista de la sección del viaducto que se ha desplomado en Génova” Autor Luca Zennaro.
- [5] ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural – Corrosión en tendones de puentes. Publicación Marzo 2026 [Link](#)