

Detección de fallos estructurales en tuberías de hormigón mediante monitorización acústica distribuida (DAS) de fibra óptica de fácil instalación

Detection of structural failures in concrete pipes using easy-to-install fibre optic distributed acoustic sensing (DAS)

Lisbel Rueda-García^a, Daniel Tasquer-Val^b, Medardo Hernández^c y Pedro A. Calderón^d

^a Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de València. Investigadora Posdoctoral. lisruega@upv.es

^b Gdo. Ing. Electrónica Ind. y Automática. Universitat Politècnica de València. Técnico Superior de Laboratorio. datasval@upv.es

^c MSc. Ingeniero Civil. CalSens S.L. Analista de Proyectos y Estudiante de Doctorado. mhernandez@cal-sens.com

^d Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de València. Catedrático de Universidad. pcaldero@upv.es

RESUMEN

El estrés hídrico debido a la sequía subraya la necesidad de reducir pérdidas de agua, especialmente en redes de suministro. Una manera de lograrlo es mejorando los sistemas de monitorización de tuberías para la detección temprana de posibles fallos estructurales. Este estudio analiza la capacidad de un sistema de monitorización acústica distribuida (DAS) de fibra óptica de fácil instalación, empleado anteriormente para la detección de fugas de agua y rotura de armaduras pretensadas, de localizar la aparición de daños estructurales por aplastamiento en tuberías de hormigón. Se realizaron tres ensayos de aplastamiento en un tramo de tubería experimental de grandes dimensiones y se analizaron las señales acústicas detectadas.

ABSTRACT

Water stress due to drought highlights the need to reduce water losses, especially in water supply networks. One way to achieve this is by improving pipeline monitoring systems for early detection of potential structural failures. This study analyses the ability of an easy-to-install distributed acoustic sensing (DAS) fibre optic system, previously used for detecting water leaks and prestressed wire breaks, to locate the onset of structural damage caused by crushing in concrete pipes. Three crushing tests were conducted on a large-diameter experimental pipeline, and the detected acoustic signals were analysed.

PALABRAS CLAVE: monitorización, DAS, fibra óptica, tubería, hormigón, ensayo de campo, fallo estructural.

KEYWORDS: monitoring, DAS, fibre optic, pipe, concrete, field test, structural failure.

1. Introducción

Como se indica en el informe de la Comisión Europea “*Global Drought Overview September 2024*” [1], grandes áreas a nivel mundial se ven afectadas por sequías severas, incluyendo el Mediterráneo y Europa oriental, con

condiciones extremadamente secas y cálidas. La escasez de agua está obligando a replantear la forma en que históricamente se ha gestionado la explotación y el suministro de agua potable. Para gestionar eficientemente los recursos naturales

durante el abastecimiento, es necesario minimizar las pérdidas en los sistemas de suministro de agua potable. Uno de los eventos que provoca pérdidas significativas de agua es el fallo estructural de las tuberías en las redes de suministro de agua. Una forma de evitar estas pérdidas es detectar de manera temprana y precisa dónde ocurrirán estos fallos, de modo que sea posible reparar o reemplazar estas tuberías antes de que el fallo se produzca.

Las tuberías de hormigón armado y pretensado son habituales por su durabilidad y fiabilidad [2]. No obstante, los asentos del terreno, la corrosión de armaduras o el incremento de cargas sobre la conducción pueden provocar roturas estructurales.

Existen varias técnicas para monitorizar tuberías y prevenir fallos estructurales. Destacan las inspecciones visuales y acústicas internas, que requieren vaciar la tubería, o las inspecciones electromagnéticas, que miden la continuidad de los alambres de acero pretensados, cuya rotura por corrosión es la principal causa de fallo de las tuberías pretensadas [2]. Otra técnica para detectar la rotura de los alambres es la monitorización acústica continua mediante hidrófonos [3], útil, aunque limitada en tuberías profundas debido a la atenuación de la señal. Una innovación reciente es el sistema de *Distributed Acoustic Sensing* (DAS), que utiliza fibra óptica para detectar vibraciones, cambios de temperatura y deformaciones en tiempo real [2]. El DAS permite monitorizar kilómetros de tuberías, evitando problemas de corrosión e interferencias electromagnéticas. La instalación de la fibra puede realizarse pegándola a la pared de la tubería [4], enterrándola cerca de la misma [5] o incluso instalándola en su interior en tuberías en funcionamiento mediante el uso de un paracaídas [6]. Pese a que existen publicaciones sobre el uso incipiente del DAS en la detección de la rotura de alambres de pretensado y de fugas [5], no se ha observado hasta la fecha su aplicación para la detección temprana de fallos estructurales originados por

el aplastamiento del tubo debido a un exceso de cargas sobre la conducción.

En una investigación reciente [7], los autores analizaron la capacidad de un sistema DAS fácil de instalar de identificar y localizar la señal acústica producida por la rotura de alambres en tuberías de hormigón pretensado. El sistema empleado consistió en un cable de fibra óptica colocado dentro de la tubería sin necesidad de fijaciones internas y con la posibilidad de instalarlo mientras la tubería está operativa. Con este propósito, se construyó un tramo experimental de tubería de grandes dimensiones donde se simulaban roturas de alambres. Se estudiaron varias variables, entre ellas el origen de la señal (para diferenciar roturas de alambres de eventos de naturaleza similar, como golpes de martillo sobre las paredes de la conducción) y la ubicación del evento en la tubería. Los resultados mostraron que el sistema DAS pudo detectar casi todos los eventos. Además, dos parámetros clave de las señales, la tasa de paso por cero (ZCR) y la energía a corto plazo (STE), permitieron determinar con precisión el origen de la señal y la ubicación.

Esta investigación se centra en la detección de señales acústicas generadas durante el proceso de aplastamiento de tuberías de hormigón armado y pretensado, utilizando el mismo sistema DAS de fácil instalación descrito en [7]. Identificar el ruido asociado a la fisuración estructural es un desafío significativo debido a la complejidad de distinguir estas señales de otros eventos acústicos en un entorno operativo. Para abordar esta dificultad, se realizaron ensayos experimentales de gran envergadura, inéditos hasta ahora. Se construyó en campo un tramo experimental de tubería de grandes dimensiones (1 m de diámetro y 40 m de longitud) lleno de agua. Los ensayos incluyeron el aplastamiento de dos tuberías de hormigón pretensado y una de hormigón armado mediante un actuador hidráulico, generando fisuras y otros tipos de rotura cuya detección acústica fue analizada para identificar patrones que permitan la detección temprana de daños.

2. Materiales y métodos

2.1 Plan de ensayos

Con el objetivo de simular la rotura de las tuberías, se realizaron tres ensayos de aplastamiento en campo en un tramo de conducción construido exclusivamente para el proyecto de investigación mediante la unión de varios tubos. La conducción se llenó de agua, cuya presión se elevó a diferentes niveles según el ensayo. Para cargar las tuberías de hormigón se empleó un marco de ensayo autoportante y un actuador hidráulico. Los detalles del ensayo se describen en las siguientes secciones.

Se ensayaron dos tipos de tubo: tubo de hormigón pretensado sin camisa de acero (PCNP, del inglés *prestressed concrete non-cylinder pipe*) y tubo de hormigón armado con camisa de acero (RCCP, del inglés *reinforced concrete cylinder pipe*). Los ensayos se realizaron con distintas presiones internas del agua en la tubería (ver Tabla 1).

Tabla 1. Principales características de los ensayos.

ID ensayo	Tipo de tubo ¹	Presión agua (bar)
PC-3.0	PCNP	3.0
RC-3.0	RCCP	3.0
PC-0.5	PCNP	0.5

¹ PCNP = tubería de hormigón pretensado sin camisa de acero; RCCP = tubería de hormigón armado con camisa de acero.

2.2 Características de los tubos

Los tubos PCNP ensayados constaban de un núcleo de hormigón, un alambre de pretensado que se enrolla directamente sobre el núcleo de hormigón y un revestimiento de mortero sobre éste (ver Figura 1c). Estas tuberías se extrajeron de una conducción de agua potable que se había instalado en 1969 y se mantuvo en funcionamiento hasta recientemente. Cabe señalar que los tubos presentaban un excelente estado cuando se desenterraron. Los tubos tenían una longitud de 4 m, un diámetro exterior de 1020 mm y un diámetro interior de 850 mm.

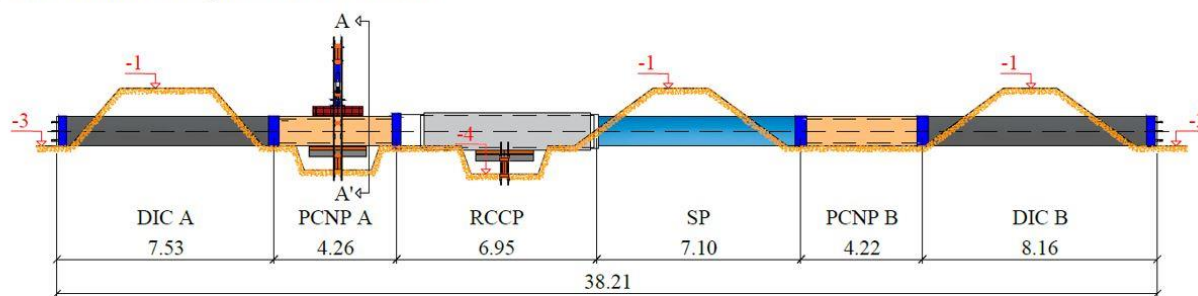
El tubo RCCP consistía en un tubo de hormigón armado que constaba de un tubo de acero revestido interiormente con una capa de hormigón. En el exterior del tubo de acero, el tubo contaba con una capa de hormigón armado con una jaula de armadura de acero (Figura 1d). El tubo también fue extraído de una conducción de los años 70 que se mantuvo en funcionamiento hasta recientemente. En el momento de la extracción la tubería presentaba algunas fisuras longitudinales en clave y hastiales, seguramente debidas a la sobrecarga en clave. El RCCP ensayado tenía una longitud de 6 m, un diámetro exterior de 1300 mm y un diámetro interior de 1100 mm.

2.3 Configuración del ensayo

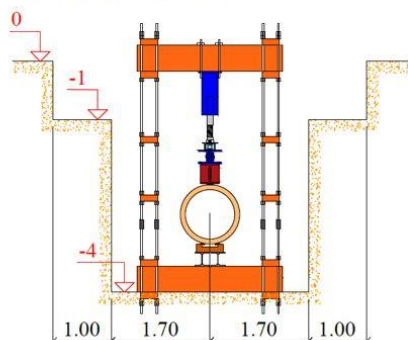
Se construyó una tubería experimental de 38 m de longitud para realizar los ensayos de aplastamiento, así como los ensayos de detección de la rotura de espiras pretensadas analizados en [7] (Figura 1a). La longitud elegida de la tubería garantizaba que hubiera al menos tres tramos de 10 m de cable en su interior, teniendo en cuenta la resolución espacial del sistema DAS utilizado, como se explica en la sección 2.4. Para alojar la tubería, se realizó una excavación con una profundidad máxima de 4 metros (ver Figura 1b). La tubería experimental se construyó utilizando una combinación de tubos, como se muestra en la imagen. Se aseguró que el tramo de 10 m de fibra que captaba las señales generadas en los ensayos de aplastamiento quedara íntegramente en el interior de la conducción mediante la disposición de una tubería en el extremo izquierdo.

La tubería se selló en ambos extremos mediante bridas ciegas equipadas con diferentes válvulas. Una válvula se utilizó específicamente para introducir el cable de fibra óptica, mientras que otra válvula se utilizó para llenar la tubería con agua. Además, se instaló un manómetro en una de las válvulas para regular la presión interna del agua. Cabe señalar que las pruebas se realizaron sin flujo de agua dentro de la tubería.

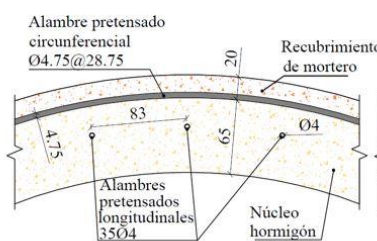
(a) Sección transversal longitudinal de la excavación



(b) Sección transversal A-A'



(c) PCNP



(d) RCCP

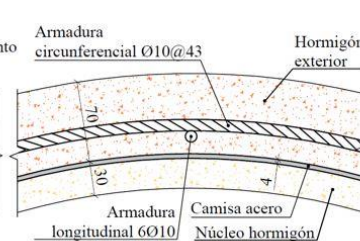


Figura 1. Esquemas de los ensayos: (a) Dimensiones de la excavación y de la conducción realizadas para llevar a cabo los ensayos: ejemplo del montaje para el ensayo de uno de los PCNP. Uds. m. (b) Sección transversal del marco de ensayo. Uds. m. (c) Capas del PCNP. Uds. mm. (D) Capas del RCCP. Uds. mm.

El pórtico empleado para llevar a cabo el aplastamiento de los tubos de hormigón se diseñó tomando como referencia la norma UNE-EN 1916:2008 [8], en la cual se describe el método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia al aplastamiento de tubos de hormigón. Como marco de ensayo se empleó un marco autoportante (Figura 1b). La carga se introdujo mediante un actuador hidráulico de 1,000 kN de capacidad. El actuador se hizo funcionar por medio de un grupo hidráulico portátil que se colocó a una distancia de unos 5 m del pórtico de ensayo. Se empleó un dintel de reparto para cargar longitudinalmente el tubo. Entre el dintel de reparto y la célula de carga se colocó una rótula en sentido longitudinal que permitía mantener la carga vertical en todo momento. De acuerdo con la norma mencionada, se colocaron dos apoyos puntuales longitudinales dispuestos en la sección transversal de manera que formaban un ángulo de aprox. 30° con el centro del tubo. Este apoyo se consiguió mediante una viga de madera con un cajeadado como se muestra en la Figura 1b y dos perfiles metálicos que transmitieron la carga

al dintel inferior del marco de ensayo. Se emplearon bandas de apoyo de elastómero, tanto bajo el dintel de reparto como en ambos apoyos, de 1600 mm de longitud, 100 mm de ancho y 20 mm de espesor. Las columnas del pórtico fueron arriostradas al terreno en cuatro puntos por seguridad en caso de inestabilidad lateral del pórtico.

El mismo pórtico fue empleado para ensayar los tres tubos. Bajo los tubos se dejó montada la parte inferior del marco de ensayo. Sobre esta parte inferior se montó el resto del pórtico, ya fuera sobre uno u otro tubo, mediante la unión de las cuatro barras de cada columna con acopladores. Tras emplear el pórtico en el ensayo PC-3.0, se desplazó el marco al emplazamiento del RCCP para llevar a cabo el ensayo RC-3.0. El PCNP ensayado fue sustituido por otro de iguales características. El tercer ensayo (PC-0.5) se realizó en el PCNP que sustituyó al tubo del primer ensayo. Para ello, se volvió a trasladar el marco al emplazamiento del primer ensayo. En este caso no fue necesario sustituir el RCCP ensayado ya que éste no

presentaba fugas. En la Figura 2 se muestra el montaje sobre el RCCP.



Figura 2. Montaje del pórtico de ensayo sobre RCCP.

2.4 Monitorización

En esta investigación se empleó un tipo de monitorización acústica distribuida (DAS). En concreto, una tecnología basada en OTDR sensible a la fase y pulsos chirpeados (OTDR: reflectometría óptica en el dominio del tiempo; Φ -OTDR: OTDR sensible a la fase). Los sistemas Φ -OTDR son capaces de detectar perturbaciones en la fibra, extrayendo la información de fase de la luz retrodispersada dentro del núcleo de la fibra. De este modo se puede obtener la localización y la intensidad de las vibraciones. El Φ -OTDR de pulsos chirpeados emplea pulsos linealmente chirpeados, lo que permite la medición de cambios distribuidos de deformación y temperatura en un solo disparo, eliminando la necesidad de escaneo de frecuencias [9]. Como describe Pastor Graells [9], la complejidad del sistema es comparable a la del Φ -OTDR clásico, pero conserva sus atributos favorables, como la rapidez de las mediciones con un ancho de banda limitado únicamente por la longitud de la fibra (que puede abarcar varias decenas de km con resoluciones espaciales precisas) y la detección de alta resolución de las fluctuaciones

de temperatura/deformación, que superan con creces las conseguidas con las técnicas Brillouin.

El sistema DAS utilizado en esta investigación tenía una sensibilidad de un nanómetro, una resolución espacial de 10 m, un alcance máximo de 90 km, un alto rendimiento en bajas frecuencias, una elevada relación señal/ruido y no presentaba desvanecimiento. El cable de fibra óptica utilizado era un cable monotubo con cubierta reforzada y fibras monomodo sueltas. Este tipo de cable se seleccionó tras los resultados satisfactorios obtenidos en estudios anteriores del grupo de investigación. El cable presenta las ventajas de ser robusto, estanco e inerte en interacción con el agua, lo que lo hace muy adecuado para su inserción en el interior de tuberías de agua potable sin necesidad de personal o instrumentación altamente especializados. Además, sólo una de las fibras se utiliza en el DAS, por lo que el resto puede emplearse para otros fines, como telecomunicaciones.

El cable de fibra óptica se instaló en la tubería experimental mientras estaba vacía. El cable se colocó sin tensión a lo largo de la base interior de la tubería.

Otros elementos de instrumentación empleados fueron captadores de desplazamiento para medir desplazamientos verticales y horizontales durante los ensayos, y cámaras fotográficas situadas a cada lado del tubo ensayado que tomaron fotografías con una frecuencia de 0.5 Hz para permitir un seguimiento del ensayo a posteriori y observar fisuras en el hormigón.

2.5 Procedimiento de ensayo

La frecuencia de muestreo del sistema DAS fue de 2 kHz en el ensayo PC-3.0 y de 1 kHz en los ensayos RC-3.0 y PC-0.5.

La carga del actuador se introdujo por control de carga. En los ensayos PC-3.0 y PC-0.5 la velocidad de carga fue de 15 kN/min. En el ensayo RC-3.0 fue de 20 kN/min.

3. Resultados, análisis y discusión

3.1 Preprocesado de la señal original

Cuando no se realizaban pruebas en la tubería, es decir, durante la situación de reposo, se observó que el ruido ambiental y del sistema tenía frecuencias bajas con una amplitud muy elevada, muy superior a la correspondiente a las frecuencias más altas de interés en estas pruebas. En consecuencia, se empleó un filtro de paso alto con una frecuencia de corte de 30 Hz para facilitar la visualización de los datos. El resultado de utilizar este filtro puede verse en el ejemplo de la Figura 3a-b. Además, se aplicaron otros filtros de eliminación de ruido para limpiar la señal del ruido ambiente existente y mejorar la detección de señales. Se realizó un análisis *wavelet* discreto (DWT). Se utilizó la transformada *wavelet* de Haar con cuatro niveles, como en [10]. La eficiencia y la sencillez de cálculo de este filtro permiten procesar los resultados en tiempo real, lo que es muy importante para la aplicación del sistema como monitorización continua. Además, la metodología de reducción de ruido (o *denoising*) Minimax, también utilizada en [10], se utiliza como regla de *thresholding*, ya que es beneficiosa para señales con estructuras complejas y características importantes que deben preservarse durante la reducción de ruido. También se aplica la función de *soft threshold* para mejorar la continuidad de la señal. Todo ello da como resultado un gráfico amplitud-tiempo que facilita el reconocimiento de las señales producidas durante la prueba (Figura 3c).

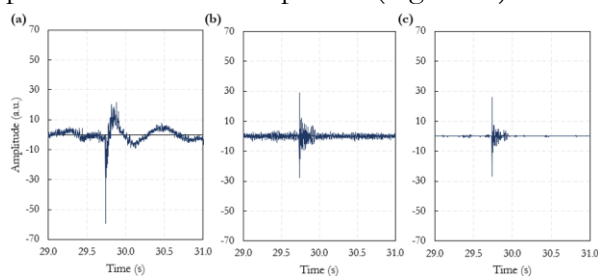


Figura 3. Señal durante la rotura de una espira. (a) Sin filtros. (b) Con filtro de paso alto. (c) Con filtro de paso alto y filtro de reducción de ruido.

3.2 Parámetros de la señal analizados

En la investigación realizada en [7] por los autores, se identificaron los dos parámetros de la señal que resultan más efectivos para analizar el tipo de señales detectadas, que además son fáciles de obtener, y que se usan en el presente trabajo. Otros parámetros, como la frecuencia dominante de la señal, no resultaron útiles para caracterizar este tipo de señales. Estos son:

- Tasa de paso por cero (ZCR). Es el número de veces que la señal cruza el valor de amplitud cero (0 a.u.) en una ventana de una duración determinada. En estos ensayos se utilizó un umbral de 1 a.u. en lugar de cero para evitar posibles ruidos de baja amplitud. Se utilizó una longitud de ventana de 500 ms.
- Energía a corto plazo (STE) (en a.u.²). Es la energía acumulada bajo la curva de amplitud de la señal para una ventana temporal determinada. Se utilizó una longitud de ventana de 500 ms.

3.3 Transcurso de los ensayos

En el ensayo PC-3.0 se alcanzó una carga máxima de 900 kN, momento en el cual se decidió reducir la carga por motivos de seguridad. La apariencia de la tubería durante todo el ensayo fue robusta. No se observaron fisuras en el hormigón importantes durante la mayor parte del ensayo. Las fisuras existentes se hicieron notar cuando comenzó a impregnarse de agua la pared exterior del tubo. Las cámaras mostraron fugas a través de fisuras circunferenciales a partir de los 735 kN. Las fugas de agua llegaron a ser importantes, inundando ligeramente la base de la excavación. Pese a que no se produjo el fallo estructural de la tubería, se alcanzaron cargas elevadas durante el ensayo que provocaron la fisuración del hormigón del tubo, que es principalmente la señal que se pretende detectar mediante el sistema DAS en este proyecto.

El ensayo PC-0.5 mostró características muy similares a las del PC-3.0. En este caso, se

decidió detener el ensayo por motivos de seguridad a los 854 kN, tras observarse un ligero desplazamiento del pórtico de carga y estar cercanos al límite del actuador hidráulico. Todas las fugas de agua se produjeron a través de fisuras circunferenciales que tenían su origen en los hastiales del tubo. La primera fisura se observó a los 590 kN (señalada en la Figura 4). Las fisuras fueron creciendo, fugándose una gran cantidad de agua a través de ellas durante el ensayo que inundó la base de la excavación.



Figura 4. Fotografía del tubo al finalizar el ensayo PC-0.5 (se señala la fuga inicial).

El ensayo RC-3.0, sobre el tubo de hormigón armado, fue muy diferente a los de tubos de hormigón pretensado. Antes del ensayo, el hormigón del tubo presentaba diversas fisuras de su uso anterior. No obstante, durante el transcurso del ensayo no se observó ninguna fuga a través de las fisuras debido a la presencia de la camisa de acero. Con el aumento de la carga, aparecieron nuevas fisuras longitudinales y transversales. Las fisuras longitudinales aparecieron próximas al dintel de reparto y fueron aumentando su tamaño hasta que finalmente se produjo el colapso del tubo en clave debido a un fallo por punzonamiento del hormigón (Figura 5). Se alcanzó el fallo

estructural de la tubería a los 551 kN.



Figura 5. Fallo estructural de la tubería en RC-3.0.

Al inspeccionar el interior del tubo, se observó una gran cantidad de fragmentos de hormigón de gran tamaño sobre la base del tubo de hormigón armado. Estos se desprendieron de la cara interior de la clave del RCCP durante el ensayo de aplastamiento.

3.4 Detección de eventos con DAS

Se analizan las señales captadas por el sistema DAS en los segmentos de cable ubicados completamente dentro del tubo, excluyendo aquellos tramos de fibra que están parcialmente en el exterior. Esto se realiza para minimizar las interferencias del ruido ambiental y garantizar que las señales correspondan exclusivamente al cable sumergido en el agua. Como se detalla en el apartado 2.3, hay tres tramos de 10 metros de fibra óptica que se encuentran completamente contenidos dentro de la conducción. Se identifican como T1, T2 y T3, siendo T1 el tramo en el que se encontraba el marco de ensayo (en la parte izquierda en la Figura 1a).

Se buscó que las señales del DAS tuvieran como mínimo un ZCR de 10 y un STE de 1000 a.u.², ya que, en general estos valores son superiores a los de los ruidos identificados en los

Tabla 2. Resumen de resultados del sistema DAS durante los tres ensayos realizados.

ID Ensayo	Nº eventos con ZCR > 10 y STE > 1000 a.u. ²			$\Sigma(\text{ZCR})$			$\Sigma(\text{STE})$		
	PC-3.0	PC-0.5	RC-3.0	PC-3.0	PC-0.5	RC-3.0	PC-3.0	PC-0.5	RC-3.0
T1	22	25	27	952	693	2144	341729	175637	815940
T2	13	9	22	761	238	1854	242517	84597	579498
T3	15	6	26	736	264	1725	98090	10257	537232

ensayos de rotura de espiras de [7]. Se desarrolló una aplicación que recogía todos los ficheros generados por el DAS durante los ensayos, calculaba los parámetros de la señal y extraía los resultados de forma rápida, permitiendo el uso del sistema en tiempo real. La Tabla 2 resume los resultados de los tres ensayos realizados.

Los resultados de la Tabla 2 muestran que en los dos ensayos realizados sobre PCNPs se detecta claramente un número superior de eventos que reúnen las condiciones marcadas ($ZCR > 10$ y $STE > 1000$ a.u.²) en el tramo de fibra T1, en el que se encontraba el ensayo de aplastamiento. En el ensayo sobre el RCCP, el número de eventos es similar en los tres tramos de estudio, por lo que el número de eventos no es suficiente para distinguir que se está produciendo un fallo en cierto tramo de fibra.

También se indica en la Tabla 2 la suma del ZCR y del STE de todos los eventos detectados durante cada ensayo. Estos valores son claramente superiores en el tramo T1 que en T2 y T3, para los tres ensayos realizados. Esto indica que los valores acumulados de ZCR y de STE podrían ser un indicativo de en qué tramo de la conducción se están produciendo alteraciones o una posible rotura.

Por otro lado, se analizan los valores de ZCR y STE obtenidos en el tramo T1 en cada ensayo. Las señales detectadas con DAS se comparan entre sí empleando un gráfico ZCR-STE como el que se empleó en [7], donde se identificaron tres rangos de valores diferenciados que permitieron distinguir el origen de la señal. Las áreas coloreadas en la Figura 6 muestran dichos rangos. El área verde corresponde a los valores obtenidos para las señales generadas por la rotura de las espiras pretensadas del PCNP. El área roja corresponde al rango medido para las señales generadas por golpes de martillo en la pared exterior de hormigón de la conducción. Finalmente, el área amarilla correspondió a eventos no identificados, que fueron eventos detectados en la señal medida por el DAS que tenían características similares a las señales generadas

por la rotura de espiras o golpes de martillo (señales repentinas, como la que se muestra en la Figura 3c) pero que no procedían de ningún evento realizado a propósito en la tubería, por lo que su origen es desconocido.

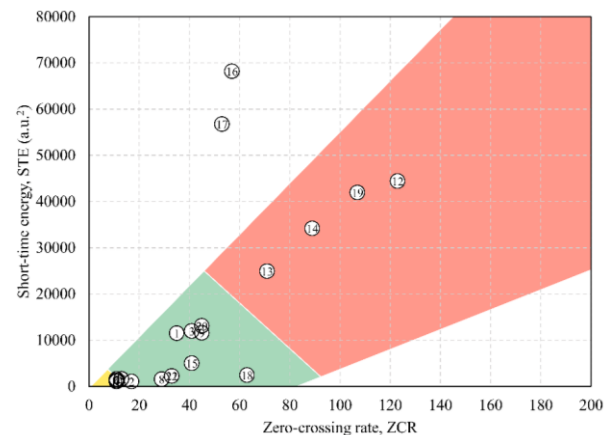


Figura 6. Relación STE-ZCR de las señales detectadas por el DAS durante el ensayo PC-3.0.

En la Figura 6 se muestran los eventos detectados en la señal durante PC-3.0. Los eventos que se dieron antes de alcanzar la carga máxima (eventos 1-11) se situaron en el área característica de la rotura de espiras (área verde) y de ruidos o eventos no identificados (área amarilla). Por otro lado, muchos de los eventos detectados tras alcanzar la carga máxima (eventos 12-22) muestran valores de ZCR y STE superiores, observándose incluso en algunos casos señales de muy alto STE en comparación con su ZCR (eventos 16 y 17). Se cree que estas señales acústicas no correspondían a roturas del tubo, si no a reajustes del pórtico de ensayos durante el descenso de la carga.

En la Figura 7 se representan todos los eventos del ensayo PC-0.5. Se observa que la mayoría de los eventos detectados presentaron baja intensidad, localizándose en las áreas verde y amarilla. Únicamente eventos acontecidos tras la carga máxima del ensayo, que parecen corresponder a reajustes del marco de ensayos, muestran mayor intensidad, y se localizan en el área propia de los golpes de martillo (área roja).

Finalmente, en la Figura 8 se muestran las señales para el ensayo RC-3.0. Los eventos que se detectaron antes de alcanzar el primer máximo de carga (eventos 1-8) se encuentran

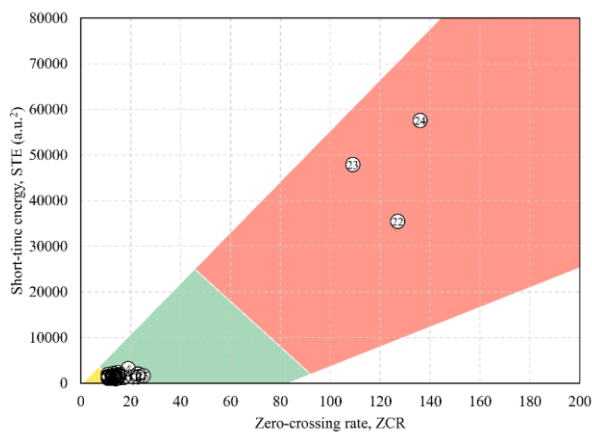


Figura 7. Relación STE-ZCR de las señales detectadas por el DAS durante el ensayo PC-0.5.

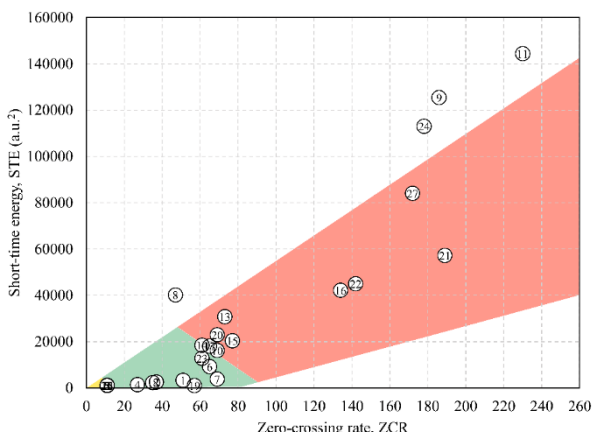


Figura 8. Relación STE-ZCR de las señales detectadas por el DAS durante el ensayo RC-3.0.

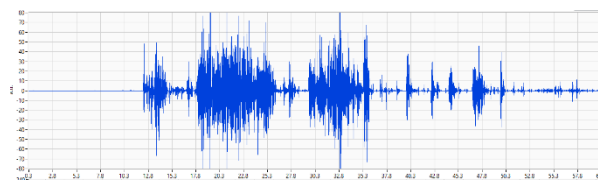


Figura 9. Ejemplo de gráfica Amplitud de la señal (a.u.) - Tiempo (s) de las señales detectadas tras el punzonamiento del tubo en RC-3.0.

mayormente en las áreas verde y amarilla. Estos pudieron corresponder a la formación de fisuras en el hormigón. Tras el primer máximo de carga, momento en el que el dintel de reparto comenzó a punzonar el hormigón en clave del tubo, los eventos detectados presentaron señales acústicas de gran intensidad y continuadas en el tiempo (ver ejemplo en Figura 9), a diferencia de las registradas habitualmente (Figura 3c). Los eventos 9-18 en la Figura 8 corresponden a esta señal. En vista de las observaciones realizadas durante y después del ensayo, se determinó que esta señal acústica provino de la fisuración del hormigón del tubo y del desprendimiento de

fragmentos de hormigón de la clave del tubo que cayeron sobre la base del tubo, donde se encontraba el cable de fibra del sistema DAS, pudiendo incluso golpear el cable. Los eventos 19-24 detectados posteriormente tuvieron características similares y también se relacionan con la formación de fisuras y el desprendimiento de fragmentos de hormigón. Todos ellos ocurrieron durante el ascenso de la carga hasta el máximo absoluto de 551 kN. En general estos eventos se localizan en el área roja o, en algún caso, ligeramente por encima. Los eventos 25 y 26 tuvieron una muy baja intensidad y se produjeron durante el descenso paulatino de la carga. Por el contrario, el evento 27 presentó una gran intensidad y se produjo durante la recogida rápida del pistón del actuador hidráulico, por lo que la señal acústica pudo provenir de la vuelta brusca del marco de ensayo a su posición inicial y posiblemente también del desprendimiento de fragmentos de hormigón.

4. Conclusiones

La detección prematura del fallo de tuberías de hormigón por aplastamiento mediante DAS es un reto de gran complejidad. No obstante, se han obtenido resultados de interés, siendo los más relevantes los siguientes:

1. Las señales detectadas durante el ascenso de la carga, antes de alcanzar la carga máxima, mostraron parámetros (ZCR y STE) similares a los de las señales producidas por la rotura de espiras; es decir, que las señales originadas por el aplastamiento se encuentran en un rango de valores medible. En las tuberías pretensadas no se podría distinguir si el evento detectado se trata de un daño por aplastamiento o de la rotura de una espira, pero se podría afirmar que el tramo de tubería en cuestión está sufriendo algún tipo de daño estructural.
2. Durante el ensayo de aplastamiento del tubo de hormigón armado se produjo, tras alcanzar un pico de carga, una gran fisuración del hormigón y el desprendimiento de fragmentos

de hormigón en el interior del tubo. El sistema DAS detectó con claridad la señal acústica originada por estos eventos. Ésta presentó gran intensidad (altos valores de ZCR y STE).

3. Empleando tanto el número de eventos registrados por el sistema DAS, como sus valores de ZCR y STE, es posible distinguir en qué tramo de la conducción se está produciendo un posible daño estructural, ya que el valor acumulado de estos durante un determinado período de tiempo es superior al registrado en otros tramos de la conducción.
4. Las tuberías de hormigón pretensado empleadas se comportaron de forma más robusta que la tubería de hormigón armado, pero presentaron fugas de agua durante la carga. El sistema DAS, ya empleado para la detección de fugas en un proyecto anterior, podría alertar de la aparición de fugas en ese tramo de la tubería, las cuales podrían deberse al aplastamiento del tubo.

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran la posibilidad de aplicación de este sistema DAS de fácil instalación para la detección precoz de problemas estructurales en tuberías de hormigón armado y pretensado. En el futuro, el equipo buscará implementar los resultados en un algoritmo para procesar e identificar las señales obtenidas por el sistema DAS que además permita determinar el momento adecuado para la sustitución del tubo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Generalitat Valenciana, a través de la Agencia Valenciana de la Innovación (AVI) y “ERDF A way of making Europe” mediante la subvención [INNEST/2021/201], así como la colaboración de CalSens S.L. y del ICITECH UPV.

Referencias

- [1] Joint Research Centre (European Commission), Global drought overview September 2024, 2024.
- [2] M.S. Higgins, P.O. Paulson, Fiber Optic Sensors for Acoustic Monitoring of PCCP, Pipelines 2006 (2006).
- [3] F.A. Travers, Acoustic monitoring of prestressed concrete pipe, Constr Build Mater 11 (1997) 175–187. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00035-4).
- [4] F. Tanimola, D. Hill, Distributed fibre optic sensors for pipeline protection, J Nat Gas Sci Eng 1 (2009) 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2009.08.002>.
- [5] H.-H. Zhu, W. Liu, T. Wang, J.-W. Su, B. Shi, Distributed Acoustic Sensing for Monitoring Linear Infrastructures: Current Status and Trends, Sensors 22 (2022) 7550. <https://doi.org/10.3390/s22197550>.
- [6] A. Lenghi, N. Amatik, M. Wrigglesworth, Expansion of Existing Monitoring System on Great Man-Made River Project Using Acoustic Fibre Optic Technology, Water Pract Technol 3 (2008). <https://doi.org/10.2166/wpt.2008.072>.
- [7] L. Rueda-García, D. Tasquer-Val, P. Calderón-Bofías, P.A. Calderón, Detecting wire breaks in prestressed concrete pipes: an easy-to-install distributed fibre acoustic sensing approach, Struct Health Monit (2024). <https://doi.org/10.1177/14759217241236365>.
- [8] CEN, UNE-EN 1916 Tubos y piezas complementarias de hormigón en masa, hormigón armado y hormigón con fibra de acero, 2008.
- [9] J. Pastor Graells, Chirped-Pulse Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry, Doctoral thesis, University of Alcalá, Madrid, 2018.
- [10] Y. Li, K. Sun, Z. Si, F. Chen, L. Tao, K. Li, H. Zhou, Monitoring and identification of wire breaks in prestressed concrete cylinder pipe based on distributed fiber optic acoustic sensing, J Civ Struct Health Monit (2022). <https://doi.org/10.1007/s13349-022-00605-0>.