

INSPECCIONES Y REACONDICIONAMIENTO EN TORRES DE REFRIGERACIÓN DE TIRO NATURAL



JESÚS SANTOS ALONSO

Ingeniero Civil / Responsable de Conservación y Servicios (Mantenimiento).
Central Nuclear de Cofrentes.
IBERDROLA

INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de las centrales nucleares es generar energía segura, limpia y fiable. Con este propósito se destinan los esfuerzos para garantizar que todos y cada uno de los sistemas, estructuras y componentes (ESC) que conforman las centrales, cumplan los más altos requisitos de seguridad, rendimiento y fiabilidad.

Existen multitud de componentes y estructuras que cumplen una función imprescindible y que, por tanto, deben ser rigurosamente cuidadas y mantenidas. Tal es el caso de estructuras como las torres de refrigeración de tiro natural, cuyo cometido es el de enfriar por evaporación el agua del ciclo térmico que circula a través del condensador y limitar el aumento de temperatura del agua de refrigeración reincorporada a embalses y cauces, emitiendo las características nubes de vapor de agua de las centrales nucleares.

TORRES DE TIRO NATURAL

Las torres de refrigeración de tiro natural son obras de ingeniería particularmente singulares, de gran envergadura y complejidad estructural. No obstante, estas estructuras, no son únicas de las centrales nucleares (siendo habitual su presencia en otras industrias con ciclos térmicos), ni tampoco todas las plantas cuentan con ellas, si bien es cierto que suelen ser elementos a menudo identificados con la industria nuclear. De las centrales nucleares españolas, únicamente Ascó I y II, Trillo y Cofrentes cuentan con este tipo de estructuras.

En el caso concreto de Cofrentes, la instalación cuenta con dos torres situadas en el extremo noreste del emplazamiento con una de las geometrías más singulares de la cons-

trucción civil, el hiperboloide de revolución, y cuya superficie exterior está compuesta por más de 51 000 m² de hormigón armado.

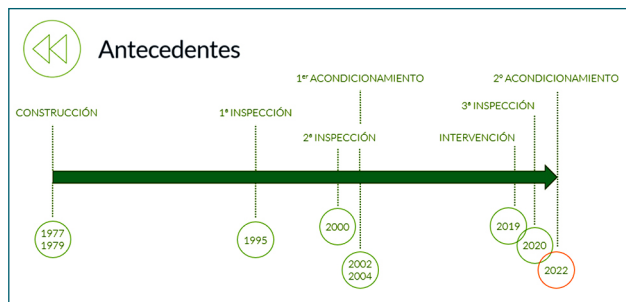
Su construcción se llevó a cabo entre los años 1977 – 1979, iniciándose con la ejecución de ambas cimentaciones en paralelo durante el primer año y continuando con la ejecución en serie de la lámina de las torres durante los siguientes años, dándose por finalizada la parte estructural de la Torre Este en 1978 y de la Torre Oeste en 1979 y habiendo empleado un total de 25 y 24 meses en su construcción, respectivamente.

En cuanto a la altura, estas superan los 120 m; sus diámetros de 90 m en la base, 52 m en garganta y casi 57 m en coronación, junto con su significativa esbeltez, con mínimos de 15 cm de espesor en zonas concretas (el máximo espesor son 70 cm), hacen de estos colosos la estructura de hormigón armado más representativa y característica de la central, junto con el edificio de contención.

Por su importancia, singularidad y magnitud, además de por estar en intemperie y expuestas a los agentes meteorológicos, el uso de los procesos y tecnologías adecuadas, y cada vez más vanguardistas e innovadoras se hacen imprescindibles para poder llevar a cabo las actividades exhaustivas de inspección, diagnóstico, mantenimiento y mejora con mayor seguridad, eficiencia y optimización de resultados.

ANTECEDENTES

Desde su construcción, a lo largo de la vida de la central las torres han sido objeto de inspecciones para monitorizar el estado de la estructura y acondicionamientos puntuales,



cuyos métodos y tecnologías adaptadas a la complejidad de la estructura y su acceso, han ido evolucionando con el paso del tiempo. Así, las primeras inspecciones y caracterización del estado de la lámina exterior de hormigón, desarrolladas con métodos de auscultación por fotogrametría, han dado paso a la reciente inspección mediante drones del 100 % de la superficie exterior (2020), minimizando el empleo de personal especialista en técnicas de posicionamiento vertical con cuerdas y reduciendo el tiempo empleado y consecuentemente los riesgos, además de mejorar la eficiencia en los trabajos.

Primeras inspecciones

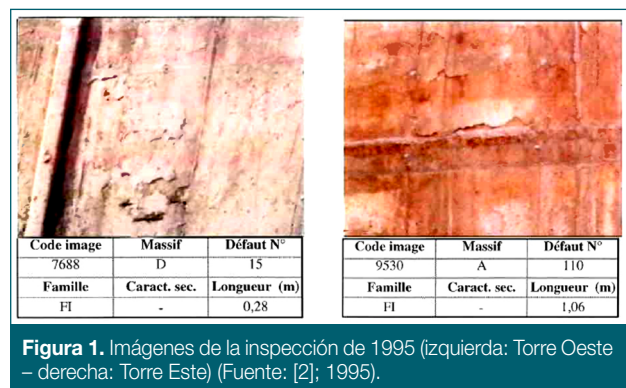
La primera inspección exhaustiva realizada sobre la lámina exterior fue llevada a cabo en 1995.

Se llevó a cabo una inspección visual del 100 % del paramento exterior de las dos torres, empleando para ello el denominado método C.N.S. (Cartografía Numérica de Estructuras), usado especialmente en la auscultación de grandes obras de ingeniería civil. El objetivo se centraba en presentar el estado general de la superficie exterior del hormigón y las posibles degradaciones, permitiendo el seguimiento de su evolución en el tiempo, a la vez de obtener y clasificar las anomalías existentes y cuantificar y programar los trabajos de reacondicionamiento a realizar.

Para realizar los trabajos se empleó un equipo óptico avanzado para la época que, posicionándose en diversas estaciones, permitía el registro y visualización de los defectos existentes en la lámina.

La duración de los trabajos de captación de las imágenes fue de apenas 17 días, siendo por tanto un método ágil incluso para la época actual, si bien es cierto que la calidad de las imágenes dista mucho de la que se puede obtener hoy en día (Figura 1).

Durante el año 2000 se llevó a cabo una nueva inspección



de la superficie exterior para determinar el grado de deterioro de la estructura y poder establecer vías de actuación para su acondicionamiento. Para ello, se hizo uso de un sistema de teledetección mediante técnicas fotogramétricas del 35 % de la superficie del paramento exterior de cada torre, denominado *Crack View* (posicionando el equipo en varios puntos), que supusieron la captación de más de 250 000 fotografías, la extracción de 12 testigos de hormigón por torre para posteriores ensayos de laboratorio y la realización de ensayos esclerométricos *in situ*. Así, se pretendía obtener un volumen suficiente de datos que tuvieran representatividad y fueran extrapolables al estado del total de la superficie de la torre, para poder llevar a cabo un programa y ejecución del reacondicionamiento. De idéntica forma a la inspección realizada en 1995, se presentan resultados gráficos y estadísticos donde se refleja una clasificación y situación de las patologías según el sistema de coordenadas establecido. Los tiempos de inspección también fueron similares (3-4 semanas), siendo el tratamiento de los datos el proceso más complejo y dilatado en el tiempo (entre un 60 % - 70 % del periodo total de la inspección). Como ocurrió en la anterior inspección, la calidad de las imágenes dista mucho de la que se puede obtener hoy en día, pero ya se atisban los primeros pasos para automatizar algunas partes del proceso de inspección (Figura 2).

Reacondicionamiento

Partiendo de las conclusiones de la inspección, durante los años 2002 – 2004, se llevó a cabo el proceso completo de adecuación del total del paramento exterior de las torres que supuso el saneado del hormigón y armaduras que presentaban anomalías y la aplicación de un revestimiento anticarbonatación a la totalidad de la superficie exterior de las torres. La duración de los trabajos de acondicionamiento fue considerable y se realizaron en serie. En esta intervención se emplearon 12 meses de ejecución para la Torre Este y 13 meses para la Torre Oeste con una media de 18 trabajadores por torre, para corregir los más de 10.000 defectos identificados (Figura 3).

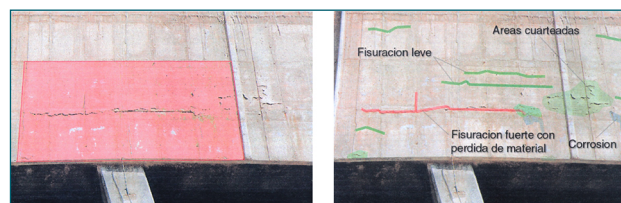


Figura 2. Imagen de la inspección de 2000 (izquierda) e imagen marcada con los defectos identificados (derecha) (Fuente: [3]; 2001).

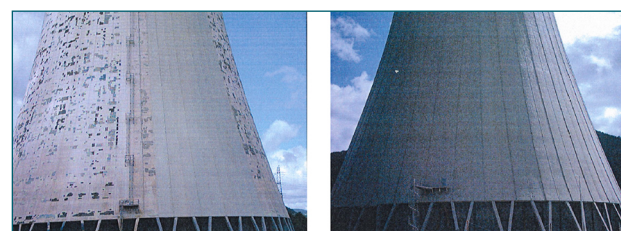


Figura 3. Torre Este en proceso de saneamiento del hormigón (izquierda), y una vez finalizado el reacondicionamiento con el revestimiento anticarbonatación aplicado (derecha) (Fuente: [4]; 20

ACTUALIDAD

Inspección 2020

En 2020 se toma la decisión de realizar una inspección, diagnóstico y propuesta de reacondicionamiento del total de la lámina exterior de las dos torres de tiro natural, cuyo objetivo se centra en caracterizar el estado de la lámina exterior de hormigón como ya se hiciera en el pasado.

La inspección consistió en el análisis del 100 % de los 51 000 m² de la superficie exterior de la lámina de las dos torres mediante el uso de drones o RPA (*Remotely Piloted Aircrafts*) y personal especializado. Además de por su rapidez en la grabación de las imágenes, esta tecnología permite realizar los trabajos en zonas que por su envergadura o su difícil acceso, supondrían asumir ciertas limitaciones (inspección parcial de la superficie), riesgos (acceso mediante métodos más complejos) o lentitud en los trabajos. Esta actividad se desarrolló en menos de una semana y se obtuvieron dos vídeos por vertical con imágenes normales y termográficas.

La inspección fue complementada con el reconocimiento puntual *in situ* mediante ensayos no destructivos y extracción de muestras para ensayos en laboratorio mediante técnicas de posicionamiento vertical con cuerdas y a través de las propias plataformas de las escaleras de acceso a coronación. Con esto se obtiene mayor información para conocer las características y estado de la estructura y de los materiales que la componen, permitiendo además verificar y contrastar los datos obtenidos mediante los RPA (Figura 4).

La fase de diagnóstico y generación de la documentación, consistente en el procesado, tratamiento y análisis conjunto de la gran cantidad de datos obtenidos para la presentación de resultados, es la actividad que mayor tiempo de desarrollo consume (en torno al 70 % del tiempo total) y recursos cualificados requiere.

En base al informe realizado, se entregó la propuesta de reacondicionamiento, incluyendo métodos alternativos, propuesta de materiales, programa de intervención y estimación económica del mismo (Figura 5).

Reacondicionamiento y mejora

Con los resultados obtenidos de la inspección, se ha formulado un programa de intervención para el reacondicionamiento de la lámina, cuyo desarrollo ha comenzado en 2022 y tiene previsión de continuar durante los próximos años de forma programada, ejecutándose con personal especialista en técnicas de posicionamiento vertical con cuerdas y

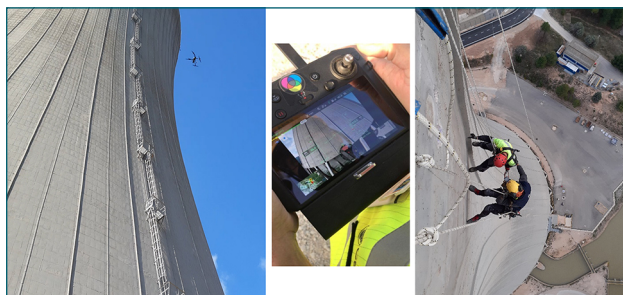


Figura 4. Fase de inspección de verticales con RPA y extracción de testigos.

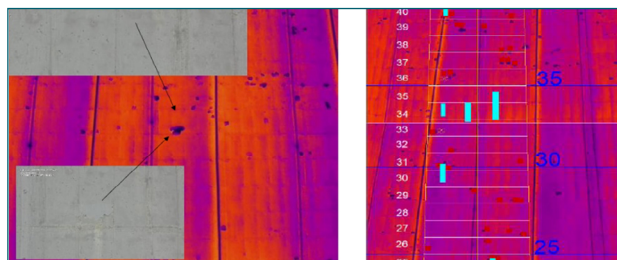


Figura 5. Fotogramas obtenidos mediante termografía, correlación con imágenes normales e identificación y marcado de defectos (Fuente: [5]; 2021).

priorizando las áreas según el volumen de defectos y su criticidad, para garantizar la seguridad personal y estructural.

Esta primera intervención ha subsanado el 100 % de los defectos observados en las zonas priorizadas, consiguiendo la eliminación de los daños ya manifestados y evidentes, y todos aquellos latentes o incipientes para evitar problemas a futuro.

Teniendo en cuenta las características de las torres y su afectación por los condicionantes atmosféricos, se hizo necesaria una planificación y supervisión exhaustiva de los trabajos, con el fin de que estos se desarrollaran con la máxima seguridad en cumplimiento de todos los requerimientos establecidos.

Para ello, se elaboró la documentación y permisos generales y específicos, tales como el Plan de Seguridad y Salud y el Plan de Rescate en trabajos de posicionamiento con cuerdas. Así mismo, el equipo ejecutor estaba compuesto por técnicos especialistas en trabajos verticales con cuerdas y homologados según criterios IRATA (homologación específica reconocida a nivel internacional).

El seguimiento se realizaba de manera independiente y diaria por un coordinador de Seguridad y Salud, personal de Iberdrola y los propios ejecutores, mediante supervisiones y reuniones *PreJob* y *PostJob* diarias para identificar los puntos críticos y aspectos de mejora, poniendo en común el control y las necesidades de ejecución en reuniones de planificación semanal.

De igual manera, en estos trabajos ha sido esencial la aplicación y cumplimiento de las Técnicas de Prevención del Error Humano, tales como (Figura 6):

- Métodos de verificación en la ejecución de los trabajos y en el uso de EPI, cuerdas y anclajes.
- Adherencia a los procedimientos.
- Toma de decisiones conservadoras.
- Uso de la experiencia previa.

CONCLUSIONES

Con la visión en conjunto de las características de las torres y los resultados y experiencias obtenidas de las intervenciones de inspección y reacondicionamiento llevados a cabo desde su construcción, se pueden extraer una serie de conclusiones significativas.

En base a estas, se consigue afianzar el método y advertir aquellos puntos de mejora e innovación en los trabajos de inspección y reacondicionamiento para garantizar el seguimiento periódico del estado de la estructura e identificación temprana de patologías.



Figura 6. Trabajos de reacondicionamiento (2022).

Por ejemplo:

- En todas las inspecciones se identifica como principal proceso durable la carbonatación del hormigón, que deriva en la aparición de defectos por despasivación de las armaduras (denominado técnicamente proceso de “corrosión generalizada”), descartando corrosiones puntuales/por picadura o degradación por ataque químico (cloruros y sulfatos, respectivamente)
- El proceso está presente en toda la superficie de ambas torres, aunque localizada de manera puntual, por lo que se puede afirmar que el estado de los elementos de hormigón de las torres es adecuado acorde a su edad y exposición, encontrando puntualmente algunas armaduras expuestas a la corrosión por despasivación o que pudieran estarlo en los próximos años, pero estando dentro del periodo comúnmente denominado “de iniciación” de forma generalizada, siendo previsible que dicho periodo se agote mucho más allá de la vida útil de la central nuclear.
- Se demuestra la gran utilidad de complementar las inspecciones visuales con la extracción de muestras para ensayos en laboratorio y el reconocimiento in situ mediante ensayos no destructivos (aunque sea de manera puntual), a la hora de comparar y contrastar los resultados obtenidos mediante imagen y realizar correcciones de los cálculos teóricos en la fase de análisis de los datos.
- Una buena praxis a la hora de ejecutar la corrección de los defectos es esencial para evitar reintervenciones. En

este sentido, cabe destacar que la aplicación de revestimientos anticarbonatación consigue paliar en gran medida los efectos externos sobre el hormigón, evitando un mayor avance en la profundidad del frente de carbonatación a pesar de los valores relativamente altos de porosidad que pueda presentar el hormigón.

Por último, como ocurre con cualquier otra tecnología, los métodos empleados para las tareas de inspección y reacondicionamientos están en continua evolución.

- En los últimos años ha quedado patente la gran aplicación que tienen los drones y robots para inspección de grandes estructuras o aquellas que, por diversas circunstancias, presenten dificultades de accesibilidad.
- Igualmente, la tecnología de captación de imágenes, grabación de video y capacidad de almacenamiento de datos se ha incrementado exponencialmente, permitiendo obtener gran cantidad de información precisa y de detalle para poder tratar posteriormente. Un claro ejemplo es la incorporación de imágenes termográficas, que permiten obtener datos de posibles defectos ocultos, en fase temprana o cuya extensión real aún no se ha puesto de manifiesto, así como descartar discontinuidades en la superficie frente a patologías reales.
- Esto, junto con la actual incursión de la inteligencia artificial (IA) que estamos viviendo, supone una transformación en cuanto a la capacidad y autonomía del análisis de datos, presentación de conclusiones y planteamiento de soluciones adecuadas y contrastadas.

En los próximos años, veremos la aparición de *softwares* comerciales de análisis de imágenes e identificación de defectos mediante IA, reduciendo los tiempos de tratamiento de datos, permitiendo monitorizaciones de las estructuras más frecuentes y precisas, con el fin de identificar de forma temprana las patologías y proponer soluciones adecuadas.

REFERENCIAS

- [1]. C.N. Cofrentes, Planos de proyecto de construcción, 1977.
- [2]. SITES, Rapports d'inspection visuelle CNS des tours de réfrigération de Cofrentes, octobre 1995.
- [3]. HCC, Informe de inspección de la estructura de hormigón de las torres de tiro natural de la C.N. Cofrentes, mayo 2001.
- [4]. HCC, Dossier final y documentos asociados de obra del acondicionamiento de los paramentos exteriores de las torres de tiro natural de C.N. Cofrentes, junio 2004.
- [5]. INES ING., Informe de inspección, diagnóstico y propuesta de reparación de la lámina exterior de las torres de tiro natural en la C.N. Cofrentes, junio 2021.
- [6]. C. Andrade et al. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción, Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras, 1998.
- [7]. Jiménez Montoya et al. Barcelona: Gustavo Gili S.A, Hormigón Armado, 2001.
- [8]. Ministerio de Fomento, Anejo 9 de la Instrucción del Hormigón Estructural, EHE-08, 2008.
- [9]. YouTube, Video de construcción de las torres de refrigeración. Sociedad Nuclear Española, 2020. (<https://www.youtube.com/watch?v=LO3UHL4aBvQ>).■