Implementación de un nuevo sistema de visión para la determinación de la resistencia del hormigón y progreso de hormigonado en la construcción del edificio de oficinas en Avenida Manoteras 12, Madrid

Deployment of a new vision system for concrete strength measurements and concreting progress in the construction of the office building on Avenida Manoteras 12, Madrid

Rubén Alonso Alonso [a], Ángel Sánchez de Dios [b], Ramón Sánchez Fernández [c], Miguel Martin Cano [d], Emiliano Pinto [e]

[a] MSc. Structural Engineer. Sacyr. Structural Department. raalonso@sacyr.com

[b] MSc. Civil Engineer-Structural Engineer. Sacyr. Structural Department. asanchezd@sacyr.com

[c] MSc. Civil Engineer-Structural Engineer. Sacyr. Chair of Structural and Architectural Department. rsfernandez@sacyr.com

[d] Civil Engineer. Sacyr. Construction R&D. mcano@sacyr.com

[e] Structural Engineer, MEng, MSc, CEO SidcoDX. epinto@sidcodx.com

RESUMEN

Durante la construcción del edificio de Oficinas Manoteras 12 se implementa una nueva tecnología para la industria de la construcción (SidcoDX) mediante la cual es posible medir y digitalizar el hormigonado. Para ello, se instala un sistema de visión compuesto por una cámara infrarroja y un computador Internet of Things (IoT) en lo alto de una de las grúas torres de la obra. Mediante dicho sistema, y la instalación de varios sensores de temperatura en el hormigón (termopares) a efectos de verificación de resultados, es posible determinar en tiempo real, información valiosa como el avance de hormigonado, junto con la temperatura y resistencia del hormigón.

ABSTRACT

During the construction of Manoteras' building, Sacyr has implemented the new technology SidcoDX. Through this new vision system, it is possible to measure and digitalise the concrete pouring. The system is composed of an infrared camera and an IoT gateway installed at the top of a tower crane. By this system, and also the installation of several termical sensors in the concrete (thermocouples), in order to verify the results, it is possible to know in real-time information very useful as the progress of the concreting, temperature and concrete strength.

PALABRAS CLAVE: Método madurez, transformación digital, BIM, cámara termográfica, SidcoDX.
KEYWORDS: Maturity method, digital transformation, BIM, infrared thermography, SidcoDX

1.Introduccion

Sacyr ha llevado a cabo las obras para la construcción de un edificio de oficinas en Avenida de Manoteras 12 de Madrid. En esta obra, Sacyr aplicó nuevas tecnologías para la determinación del índice de madurez del hormigón (tecnología SidcoDX), lo que ha

permitido monitorizar en tiempo real la resistencia del hormigón. Con dicha información se posibilita, tal y como se detallará más adelante, reducir en lo posible los tiempos de ejecución suponiendo un gran beneficio para la obra tanto en términos de plazos de ejecución como, en consecuencia, en términos económicos.

1.1 Descripción general de la estructura

El proyecto del nuevo edificio tiene una superficie construida de aproximadamente 20.888 m^2 y consta de dos plantas sótano, una planta baja que tiene la función de acceso al edificio, una planta primera que funciona como entreplanta, y 5 plantas de servicios empresariales (de 2ª a 6ª). Así mismo, dispone de una planta de cubierta donde se alojan parte de las instalaciones. En la ubicación del nuevo edificio, existía previamente un edificio el cual fue demolido casi en su totalidad dejando únicamente sin derribar los forjados de sótano 1 y planta baja los cuales se rehabilitaron para el nuevo edificio.

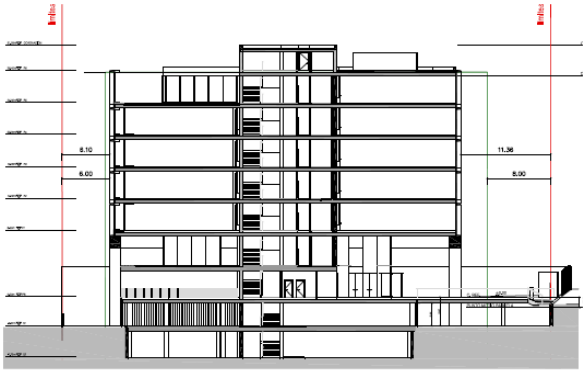

Figura 1. Sección tipo del edificio.

Figura 2. Infografía 3D edificio.

La estructura portante principal, está formada por pilares de hormigón armado de sección rectangular, así como pantallas que, aparte de soportar la carga vertical del edificio, funcionan como elementos de gran rigidez frente ante los esfuerzos horizontales de viento. Además, y de forma excepcional, en la planta sexta nacen pilares metálicos para soportar el retranqueo de la cubierta.

En cuanto a los forjados, es de destacar que las plantas sobrerasante se resuelven mediante forjados unidireccionales postesados de hormigón armado, de canto total 45 cm y con una capa de compresión de 12 cm. El intereje entre nervios es de 1,8 m y el ancho de estos es de 50 cm. Existen vanos de hasta 16m de luz aproximadamente, que permiten obtener un esquema funcional de planta libre en las zonas de trabajo.

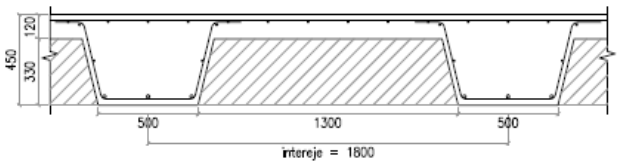

Figura 3. Sección forjado postesado unidireccional. e=33+12 cm

Para una mejor comprensión de la geometría en planta de los forjados, se adjunta a continuación la geometría de una planta tipo:

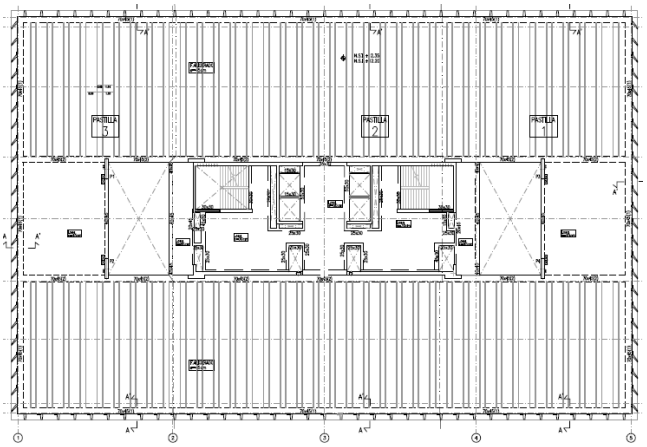

Figura 4. Geometría planta tipo (66,5 m x 43 m).

Una de las principales particularidades de la estructura es la capacidad portante de la fachada; los forjados postesados se apoyan en las fachadas dotándolas por tanto de un carácter

estructural. Dichas fachadas, cuya superficie total está en el entorno de los 4.700 m^2, se resuelven a través de elementos prefabricados cuya particular geometría en forma de "alas de avión", complica los procesos de fabricación y montaje.

Figura 5. Infografía 3D fachada.

Figura 6. Panel prefabricado de fachada. Mock-up.

En cuanto a la cimentación, se resuelve mediante cimentación profunda (pilotes) en el perímetro exterior del edificio, y mediante losa de cimentación en la zona central del mismo.

1.2 Principales condicionantes de la obra. Necesidades.

Se trata de un edificio donde las unidades relativas a estructura y fachada son singulares. Destaca la complejidad de las fachadas prefabricadas, que dificultan su fabricación en la planta del prefabricador, a lo que se une, además, la gran variedad de piezas con geometrías diferentes. Asimismo, dado el carácter estructural de la fachada, el proceso de ejecución se veía condicionado, ya que antes del hormigonado de una planta, era necesaria la colocación de los paneles perimetrales lo cual podía suponer una ralentización en lo referente a la velocidad de ejecución respecto a los procesos constructivos más estándares.

Teniendo en consideración las dificultades anteriores, en combinación con que el plazo total de ejecución de toda la obra era de tan solo 18 meses, el departamento de ingeniería de Sacyr buscó soluciones o metodologías que permitiesen reducir al máximo los tiempos de ejecución para afrontar con mayores garantías el reto que suponía el cumplimiento de los reducidos plazos de ejecución requeridos. En este sentido se identificaron dos ítems que condicionaban, y podían ralentizar, la velocidad de ejecución:

- Operaciones de tesado: Tal cual se ha detallado anteriormente los forjados se resuelven mediante hormigón postesado. Según los cálculos realizados, para poder tesar, se requería una resistencia mínima a compresión del hormigón de 25 MPa.
- Plan de cimbrado y descimbrado: Se elaboró un detallado plan de cimbrado y descimbrado de la estructura con la técnica de recimbrado [1]. En dicho plan se determinaron las resistencias mínimas a compresión del hormigón necesarias f_{cki} de cada nivel para poder hormigonar el forjado inmediatamente superior. En líneas generales, la resistencia mínima necesaria era del entorno del 90% de f_{ck28} (≈36 MPa).

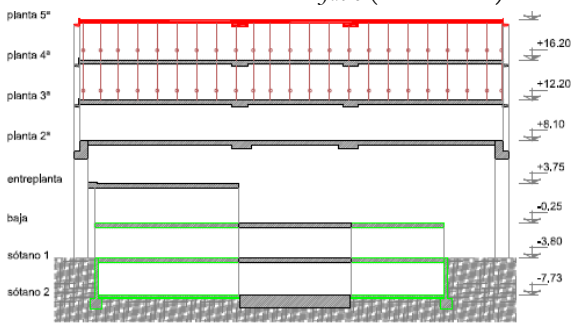

Figura 7. Plan de cimbrado. Esquema de una planta tipo.

En este sentido, Sacyr, con el fin de obtener lo antes posible tanto la resistencia mínima de tesado, como la resistencia mínima requerida acorde al plan de cimbrado, definió una fórmula de trabajo del hormigón de altas resistencias con la cual se obtendrían 25 MPa a las 24h (posibilitando así el tesado a las 24h del hormigonado). El hormigón propuesto fue un HP-40 B/20/IIa con la adicción de un superplastificante de alta actividad utilizado para la producción de hormigones de baja viscosidad y reología mejorada. Además, se aumentó el contenido de cemento respecto a la formula base.

En definitiva, se puede afirmar que, tanto el inicio de las operaciones de tesado como incluso el propio hormigonado de los forjados (plan de cimbrado), dependían, en gran medida, de la obtención de unas determinadas resistencias mínimas a compresión del hormigón.

Esta dependencia de la evolución de la resistencia del hormigón lleva a Sacyr a implementar nuevas tecnologías (Tecnología SidcoDX) para la determinación del índice de madurez del hormigón, y que permitiesen monitorizar, en tiempo real, la resistencia del hormigón. De esta manera se podía determinar cuál era el momento exacto, y sin demoras, a partir del cual, era posible iniciar las tareas de tesado de un forjado o incluso iniciar el hormigonado de un determinado forjado en correspondencia con las exigencias del plan de cimbrado.

2. Tecnología SidcoDX. Bases.

La tecnología SidcoDX es una nueva implementación tecnológica para la industria de la construcción que mediante la instalación de un sistema de visión en lo alto de las grúas torres y junto a una metodología patentada, permite medir y digitalizar, en tiempo real, el hormigón vertido y la temperatura del hormigón y, en consecuencia, obtener la resistencia a compresión en miles de puntos.

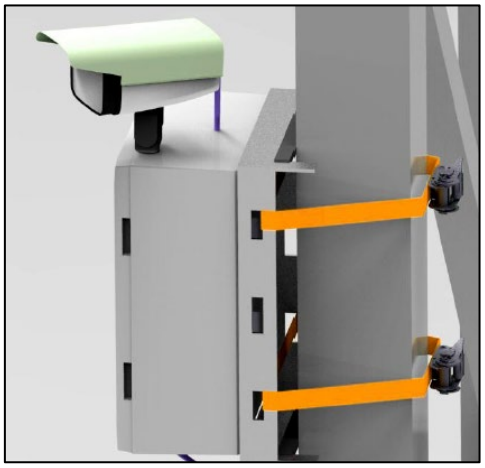

Figura 8. Cámara termográfica. Fuente: SidcoDX.

Para la implementación de esta metodología, es necesario caracterizar previamente el hormigón mediante la obtención de su curva de madurez teórica. Además, para mostrar la información obtenida, se precisa interactuar con tecnología BIM mediante la implementación de un modelo de REVIT completo de la estructura.

Otro de los beneficios asociados a esta tecnología es que, a través de la citada integración en el modelo BIM, es posible detectar y medir, en tiempo real, la cantidad de hormigón vertido permitiendo comprobar el progreso de la etapa de hormigonado de forma continua.

En definitiva, esta metodología supone un método completamente innovador para el control, de forma exhaustiva, de la calidad del hormigón (resistencia a compresión). La implementación equivale a tener más de 300.000 termopares instalados en la obra, es decir, es posible obtener en esa misma cantidad de puntos la resistencia en el hormigón. Además, aporta otras ventajas en cuanto la posibilidad de acelerar los tiempos de desencofrado y obtener un control preciso de la producción de los volúmenes de hormigonado durante la ejecución de la estructura.

3. Implementación de la tecnología.

Se describe a continuación los diferentes pasos llevados a cabo en la obra de referencia para la implementación de la tecnología descrita.

3.1 Instalación de la cámara y termopares.

En primer lugar, fue necesaria la instalación de del sistema de visión en lo alto de una de las grúas torre del edificio. En este sentido hay que destacar que la instalación es sencilla, siendo el peso y dimensiones del sistema bastante acotadas (menor a 5 Kg). Además, la conexión al suministro eléctrico es muy estándar.

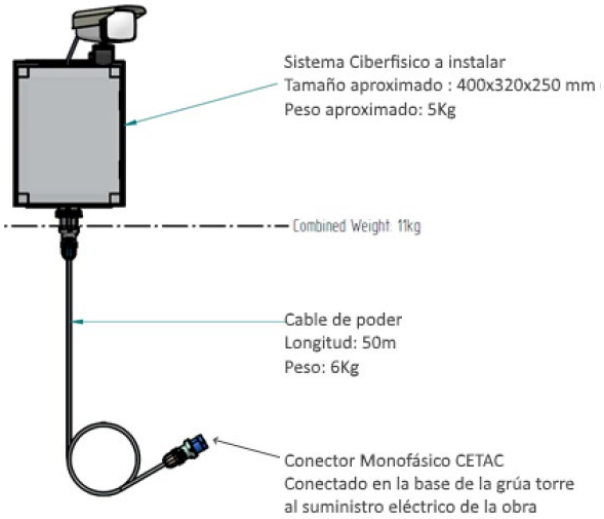

Figura 9. Esquema general del equipo a instalar en la grúa torre. Fuente: SidcoDX

Figura 10. Imagen de la cámara instalada en la grúa.

Así mismo se instalaron en el forjado, en el momento de su hormigonado, termopares en diferentes puntos que sirvieron para calibrar y confirmar las mediciones de temperatura arrojadas por la cámara termográfica.

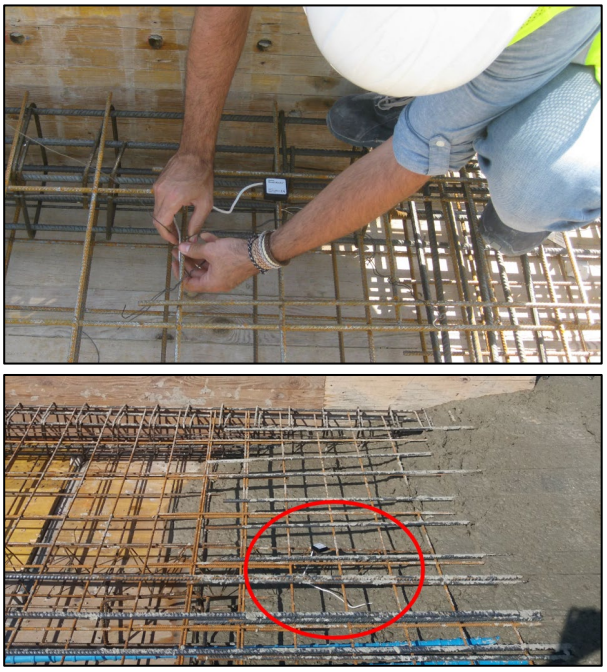

Figura 11. Colocación de termopares en el momento del hormigonado del forjado.

3.2 Método de la Madurez

Mediante la cámara termográfica se obtiene la temperatura del hormigón. Sin embargo, para la obtención de las resistencias a compresión, es necesario aplicar el método de la madurez del hormigón.

El método de la madurez es una técnica simple y no destructiva empleada en la monitorización de la evolución de resistencia de un hormigón. Este método, ampliamente contrastado y cuyo origen data de la década de 1940, se basa en la relación existente entre la edad del hormigón, su temperatura de curado, y la correlación con su resistencia a compresión simple. Es decir, a través de la denominada curva de madurez del hormigón, es posible correlacionar la resistencia a compresión del hormigón con su madurez (función dependiente de la temperatura y de la edad).

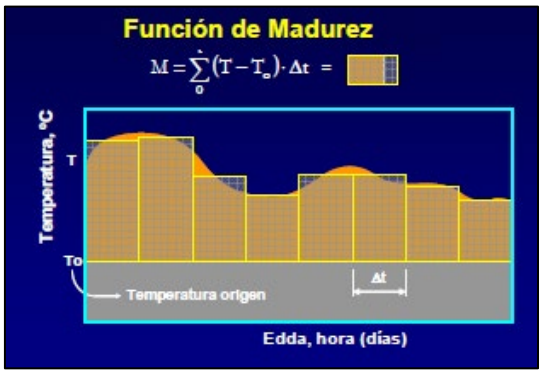

Figura 12. Función de Madurez.

El concepto de madurez asume que las muestras de una mezcla de hormigón que tengan la misma "madurez" tendrán la misma "resistencia", con independencia de la combinación de tiempo y temperatura con la que se alcance dicha madurez.

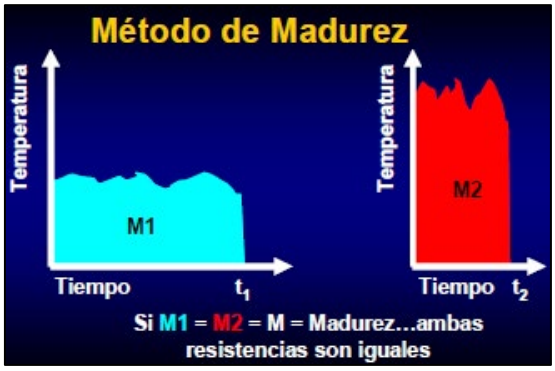

Figura 13. Método Madurez: A "igual madurez" se obtiene "igual resistencia".

El principio en el que se basa este método asume que la tasa de desarrollo de resistencia a edades tempranas en el hormigón está relacionada con la tasa de hidratación del cemento y su temperatura.

El cálculo del índice de madurez del hormigón está regulado por la normativa ASTM C 1074-98 [2].

La implantación actual de este método en el ámbito de la ingeniería civil ha resultado desigual, y poco generalizada, a pesar de las muchas ventajas que aporta respecto a las técnicas destructivas tradicionales basadas en rotura de probetas. A ello han contribuido, entre otros factores, el cambio normativo que requiere su implantación en determinados países, el elevado coste económico que suponía la adquisición de tecnología para su monitorización o la dificultad a priori de llevarlo a cabo, frente a las técnicas tradicionales destructivas, más económicas y contempladas en las normativas estructurales a nivel mundial.

Desde hace ya algún tiempo están surgiendo nuevas tecnologías, como la tecnología SidcoDX utilizada en este proyecto, con sus propias particularidades y campo de aplicación, que tratan de facilitar la implantación de este método de monitorización de hormigón en el ámbito de ingeniería civil y edificación y que buscan acelerar procesos cruciales dentro de la construcción del proyecto, como la etapa de encofrado y postesado. Además, al integrar esta información obtenida en tiempo real en el sitio de trabajo, a las plataformas de gestión actuales como el BIM, contribuyen enormemente a la toma de decisiones basada en datos y, por lo tanto, también, a la mejora de la productividad.

Dentro del ámbito de la transformación digital de la sociedad, la implantación de estas nuevas tecnologías e implementada en la obra de referencia, contribuye al desarrollo de la sociedad, mejorando tanto técnica como económicamente las actuales técnicas de determinación de resistencia.

Teniendo en cuenta que no existe una única función de madurez que sea aplicable a cualquier mezcla de hormigón, cualquier metodología empleada en la determinación de la madurez requiere llevar a cabo los siguientes pasos:

- Determinación de la función de madurez específica para el hormigón empleado.
- Determinación de la relación entre la resistencia a la compresión y el índice de madurez (Curva de madurez).

Por lo tanto, en base a lo anterior, a partir de la curva de madurez se puede obtener de forma directa la resistencia de un hormigón conociendo únicamente su madurez, la cual, es a su vez función de la temperatura (dato extraído de la cámara) y de la edad (conocida en todo momento).

Para determinar la curva de madurez es necesario realizar un determinado número de probetas de hormigón para su rotura a compresión a diferentes edades y monitorizar sus registros de temperatura. En este sentido, para la obra de referencia, una vez confirmada la fórmula de trabajo del hormigón que se iba a utilizar, se realizaron probetas para rotura a compresión según EHE [3] a 1, 2, 3, 7, 18, 21 y 28 días.

Así mismo, se insertaron sensores de temperatura en dos probetas para monitorizar y registrar la temperatura en todo el periodo (hasta los 28 d).

Figura 14. Sensores de temperatura en probetas.

En la figura 16 se adjuntan todos los datos recogidos por el laboratorio en cuanto a temperaturas y resistencias. Igualmente se representa la curva de madurez obtenida.

3.3 Modelo BIM

Para la implementación de la metodología SidcoDX ha sido necesaria la realización de un modelo BIM de la estructura. Mediante la integración en dicho modelo BIM, es posible detectar y medir, en tiempo real, la cantidad de hormigón vertido permitiendo determinar el progreso de la etapa de hormigonado de forma continua.

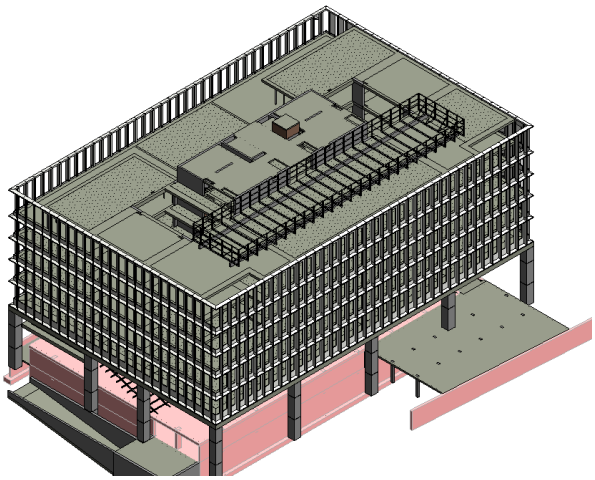

Figura 15. Modelo BIM estructura.

Dicha información puede ser muy valiosa, por ejemplo, para valorar y hacer seguimiento de planificaciones de obra.

Fecha	Edad (días)	Hora de Rotura	Edad (h)	Incremento edad (Δh)	Temperatura Instantanea (ºC)	Temperatura media (ºC)	Resistencia compresión (MPa)	Madurez media	Σ Madurez media	Madurez instantanea	Σ Madurez instantanea
23/05/2019	0	9:31	0	0	18,0	0,0	0,0	0	**0**	0	**0**
24/05/2019	1	9:31	24	24	33,2	23,7	25,7	569	**569**	797	**797**
25/05/2019	2	9:31	48	24	26,2	30,0	31,0	720	**1.289**	629	**1.426**
26/05/2019	3	9:31	72	24	21,1	22,9	33,1	549	**1.837**	506	**1.932**
31/05/2019	7	9:31	168	96	21,7	21,6	35,8	2.074	**3.911**	2.083	**4.015**
11/06/2019	18	13:00	436	268	21,5	21,4	44,4	5.735	**9.646**	5.751	**9.766**
13/06/2019	21	9:31	504	69	21,4	21,5	46,5	1.474	**11.120**	1.466	**11.232**
21/06/2019	28	9:31	672	168	21,3	21,5	53,7	3.619	**14.739**	3.578	**14.811**

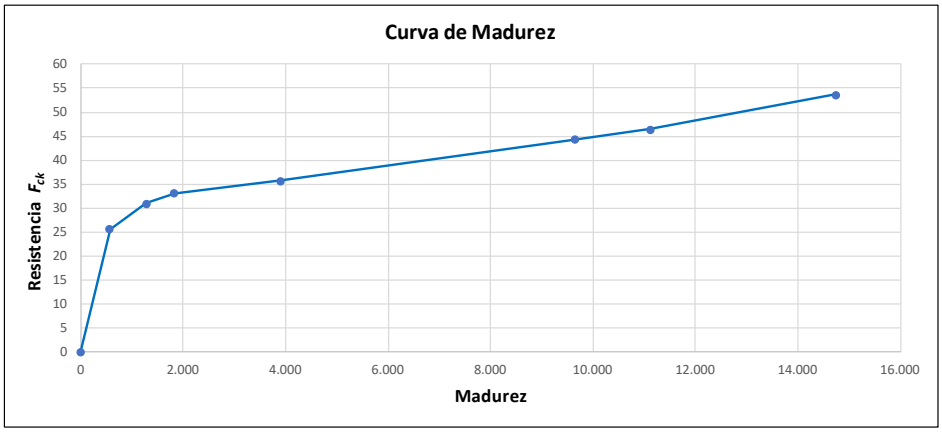

Figura 16. Curva de madurez para el hormigón designado en la obra.

3.4 Resultados

A raíz de los resultados obtenidos en la monitorización de los forjados a través de la cámara de infrarrojos, se pudo observar que los resultados de temperatura obtenidos tuvieron muy buena correlación a los obtenidos por los termopares colocados en diferentes puntos del forjado en el momento del hormigonado. Las figuras 17 y 18 muestran la relación de temperaturas y curvas de resistencias respectivamente, adquiridas a través de la implementación SidcoDX y termopar. Para todas las pastillas monitoreadas, las diferencias de resistencias entre ambas metodologías fueron menor a 1%.

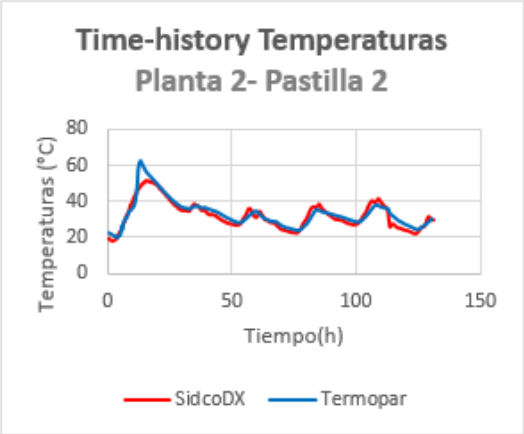

Figura 17. Temperaturas obtenidas a través de SidcoDX (rojo) y termopar(azul). Planta 2, pastilla 2.

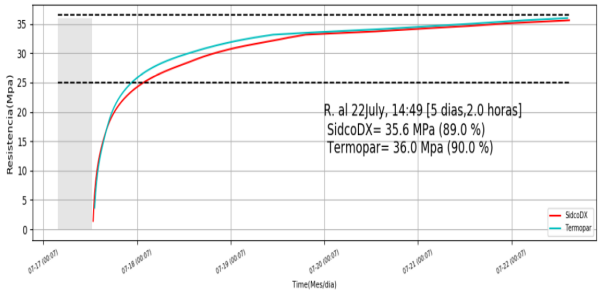

Figura 18. Resistencias obtenidas a través de SidcoDX(rojo) y termopar(azul). Planta 2, pastilla 2.

La función de estos termopares era la de verificar las mediciones de la cámara termográfica. Por tanto, esto supone, sin duda, una conclusión muy positiva de esta tecnología, dado que, la eficacia y validez del método de la madurez ya está históricamente muy probada y, es la utilización de una cámara termográfica, lo que realmente supone una innovación en el sector.

Complementariamente, la figura 19 muestra una imagen térmica sobre la cual se aplica la metodología patentada, y se detecta la pastilla hormigonada, junto, en este caso, a un tramo de una viga. Toda esta información es procesada en tiempo real en la nube para ser integrada finalmente a la interfaz de usuario de SidcoDX que se muestra en la figura 20.

Figura 19. Imagen con cámara termográfica: Se indica el hormigonado detectado.

En esta interfaz del programa (figura 20) se puede seleccionar el punto deseado del forjado obteniéndose de manera inmediata la siguiente información:

- Edad del hormigón.
- Histórico de temperaturas.
- Resistencia a compresión obtenida a partir de la curva de madurez que previamente fue ingresada en el programa.
- Volúmenes de hormigón vertido (progreso de la obra).

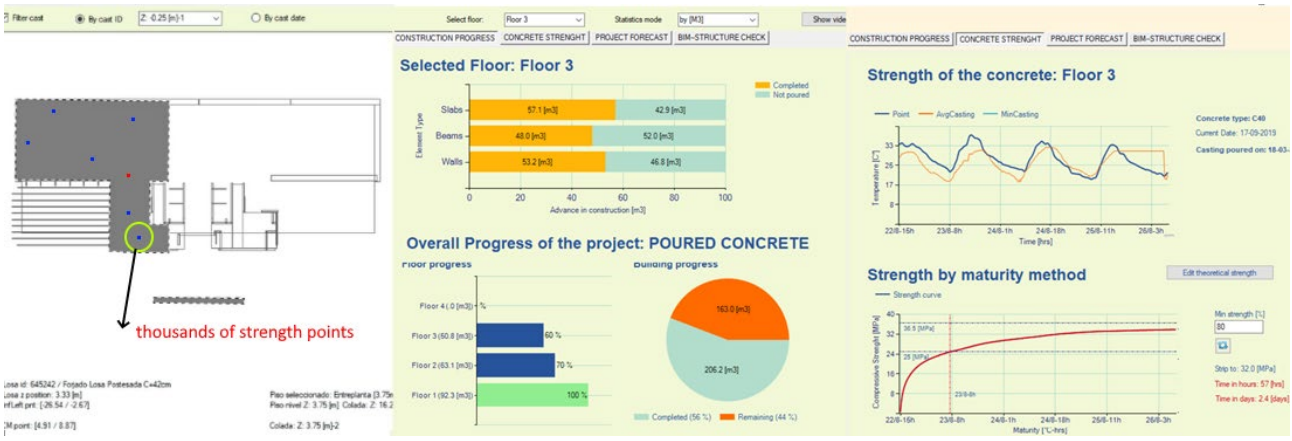

Figura 20. Salida de resultados programa SidcoDX: Ventana izquierda muestra el nuevo hormigón vertido en obra integrado con BIM, en el centro se despliega la información de progreso y finalmente a la derecha las curvas de temperaturas y resistencia del hormigón en el punto seleccionado.

Asimismo, se pueden insertar alertas medinte las cuales, de forma automática, el programa avisa cuando se llega a una determinada resistencia objetivo que previamente se ha definido. En el caso de la obra de referencia se introdujeron dos alertas correspondientes a dos resistencias objetivo; la primera de ellas de 25 MPa que alertaba sobre la posibilidad de iniciar las tareas de tesado, y la segunda, de 36 MPa relacionado con el plan de cimbrado y descimbrado.

Finalmente, es de crucial importancia revisar, y modificar si fuese necesario, la curva de madurez del hormigón, según avanzan los trabajos de ejecución de los forjados asegurando tener una curva de madurez perfectamente calibrada y actualizada al hormigón colocado en obra. De esta manera se asegura una óptima correspondencia entre la madurez de obra y la determinada en el laboratorio.

4. Conclusiones

Los resultados derivados de esta nueva implementación suponen un importante avance tecnológico que, entre otras, aporta las siguientes ventajas:

- ✓ Reducción de tiempo de tesado y optimización en las operaciones de cimbrado y descimbrado, al obtener la resistencia en tiempo real en un número prácticamente indefinido de puntos, en comparación con los puntos chequeados tanto con rotura de probetas como con uso de termopares.
- ✓ La recolección de datos desde la obra es automática y no requiere de personal adquiriendo información de termopares, por ejemplo.
- ✓ Mediante visión directa de la camara termográfica se puede obtner de una manera muy rápida una vision global del estado del curado del hormigón.
- ✓ Sistema no destructivo para el cálculo de resistencia.
- ✓ Puede reducir los costes de ensayos de laboratorio.
- ✓ Proporciona información fiable de determinadas zonas críticas estructurales donde se desee y sea importante confirmar la resistencia del hormigón.
- ✓ Acelera y optimiza la producción y flujos de trabajo.
- ✓ Control y seguimiento en tiempo real del progreso de la obra gruesa. Al incorporar esta tecnología en varios proyectos a la vez, es posible obtener índices de desempeño (KPI) de avance, que

permitan mejorar la productividad en cada obra en ejecución.

- ✓ Detección de diferencias geométricas (ejecutado vs diseño según BIM).

Agradecimientos

Se agradece la colaboración por parte de todos los que han intervenido en la ejecución de esta obra y, muy especialmente, a la empresa Sidcodx Limited por toda su aportación en la aplicación de esta nueva tecnología.

Referencias

[1] Calculo, construccion, patologia y rehabilitacion de forjados de edificacion: unidireccionales y sin vigas-hormigon metalicos y mixtos. 5º Edición (2002). INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones). José Calavera Ruiz.

[2] ASTM C 1074-98: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method.

[3] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.