

Aplicación de la metodología de madurez armature.es a la reducción de plazos de construcción de puentes del Eje Atlántico de Alta Velocidad

Application of Concrete Maturity Method armature.es to reduce construction deadlines of two bridges on the High Speed Atlantic Railway, Spain

Cristina VÁZQUEZ_HERRERO

Dr. Ingeniero de caminos, canales y puertos
Universidad de A Coruña
Profesora Titular de Universidad
cvazquezh@udc.es

Susana LENGUAS GIL

Ingeniero de caminos, canales y puertos
Enriba SL
Directora General
susanalenguas@icloud.com

Gustavo VÁZQUEZ_HERRERO

Ingeniero de caminos, canales y puertos
Cimarq SL
Director General
gustavo.vazquez@cimarq.es

Félix SÁNCHEZ-TEMBLEQUE

Dr. Ingeniero industrial
Universidad de A Coruña
Profesor Asociado
fsanchez@udc.es

RESUMEN

Durante la construcción de los viaductos de O Marco y Ulló del Eje Atlántico de Alta Velocidad, del tramo UTE Vilaboa (Aldesa y Arias Hermanos) se aplicó un nuevo procedimiento basado en el método de la madurez según la ASTM C1074-2011. La metodología armature.es permitió el diseño ecológico de la dosificación de hormigón, minimizando la cantidad de cemento por metro cúbico; posibilitó la reducción de los plazos de postesado de cada vano de 72 horas a 36 horas. Asimismo, se pudo controlar que la dosificación del hormigón puesto en obra se ajustaba a la fórmula diseñada. Se logró evitar que se produjesen bajas de resistencias durante la construcción.

ABSTRACT

During the construction of two bridges, O Marco and Ulló, of the High Speed Railway called Atlantic Axis, Joint Venture UTE Vilaboa (Aldesa and Arias Hermanos), a new procedure was applied based on the concrete maturity method after ASTM C1074-11. This methodology, armature.es, allowed an ecologic design of the concrete mix, reducing the amount of cement per cubic meter; it also enabled the reduction of the posttensioning deadline from 72 to 36 hours; moreover, it was checked that the concrete mix placed in situ matched the designed concrete mix. During the construction there were no issues related to low concrete strength.

PALABRAS CLAVE: puentes, instrumentación, método de la madurez, ensayos no destructivos, ASTM C1074-11.

KEYWORDS: bridges, monitoring, concrete maturity method, non destructive testing, ASTM C1074-11

1. Introducción

El ensayo de probetas del control de calidad, aunque estas se conserven “in situ” hasta la edad de ensayo, no tiene en cuenta las condiciones térmicas reales en la estructura, por lo que su resistencia no es representativa de la estructura, a la misma edad [1,2].

La medida y registro de la temperatura interna de las probetas y del hormigón en las estructuras permite la estimación de la resistencia real de las estructuras con precisión. Los métodos de estimación de las resistencias a edades tempranas en función de las temperaturas se denominan métodos de control de la madurez (*concrete maturity method*) [1]. Estos métodos están recogidos en la normativa internacional y se emplean de forma complementaria a los métodos destructivos convencionales y otros ensayos no destructivos [3].

La madurez del hormigón está contemplada implícitamente en el Eurocódigo [4] y en la normativa española EHE-2008 en diversos apartados (Art. 20.2.3, Art. 71-74, Art. 86), pero las propiedades mecánicas a edades tempranas se refieren únicamente a la edad cronológica, sin tener en cuenta el historial de temperaturas internas del hormigón (Art. 31, Art. 39º) [5].

Según el método de la madurez, se define edad equivalente, según la ecuación 1 (Freiesleben, Hansen and Pedersen) [1]:

$$t_e = \sum e^{-Q \left[\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_a} \right]} \Delta t \quad (1)$$

Donde:

t_e = edad equivalente del hormigón a la temperatura de referencia T_r .

T_a =temperatura interna media del hormigón en el intervalo Δt , °K.

T_r =temperatura de referencia, temperatura de curado de probetas. °K.

Δt =intervalo de tiempo en el que la temperatura media interna del hormigón es T_a

$Q=E_a/R$ =energía de activación aparente (J/mol) dividida por la constante de los gases perfectos, R (J/(mol K)), °K.

De esta forma, se reemplaza el concepto de edad cronológica por edad equivalente a una determinada temperatura de referencia (típicamente $T_r=20^\circ\text{C}$ o 23°C), para tener en cuenta las condiciones termohigrométricas durante el fraguado y endurecimiento del hormigón, que condicionan la resistencia del hormigón a edades tempranas.

En la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de La Coruña se desarrolló un nuevo procedimiento denominado *armature.es* (www.armature.es), basado en el método de la madurez según la ASTM C1074-11 [3], y otros ensayos no destructivos (extracción de testigos, índice de rebote, determinación de la velocidad de ultrasonidos [6-8]), que se aplicó a la determinación de la edad de transferencia de pretensado de vigas prefabricadas pretensadas con el hormigón de referencia de la planta, y con hormigón con áridos reciclados, con el fin de evaluar las prestaciones del hormigón con áridos reciclados (proyecto Tecnoval).

En el caso de puentes con sección cajón, como los viaductos de O Marco y Ulló, la temperatura no es uniforme dentro de cada fase de hormigonado, lo que impide la aplicación del método *match-curing*. Por ello se procede a la instrumentación de varias zonas de la sección transversal, que experimentarán temperaturas diferentes y, en consecuencia, presentarán una madurez distinta en un momento dado. Interesa conocer los historiales de temperatura, tanto de las zonas más frías como de las zonas que experimentan temperaturas más elevadas, con el fin de:

- Estimar la resistencia real de la estructura en la zona más fría, cuya madurez es mínima, que es la que condiciona los plazos de aplicación de cargas a edades tempranas.

- Comprobar que la temperatura máxima a edades tempranas no supera los límites establecidos en la bibliografía y en las normativas, de 50°C en las 2 horas, y 100°C en las 6 horas posteriores al amasado del hormigón [1].

En la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de La Coruña se desarrolló, en colaboración con la empresa Cimarq SL, un nuevo procedimiento denominado *armature.es* (www.armature.es), basado en el método de la madurez según la ASTM C1074-11, que se aplicó a la determinación de la edad mínima de aplicación del postesado de las diferentes fases constructivas de los tableros de los viaductos de O Marco y Ulló, del tramo UTE Vilaboa del Eje Atlántico de Alta Velocidad. Estos viaductos, de sección transversal cajón de 13.30 m de ancho y 4.30 m de canto se construyeron mediante autocimbra inferior, constando el viaducto de O Marco de diez vanos, dos en los extremos de 45 metros y ocho interiores de 60 metros.

2. Procedimiento de certificación de la madurez del hormigón en obra *armature.es*

A continuación se detallan los pasos del procedimiento *armature.es*, para poder certificar que, transcurrido un tiempo real desde el hormigonado (t) el hormigón tiene la resistencia exigida (resistencia objetivo) para poder aplicar una determinada carga a edades tempranas (transferencia del pretensado, aplicación del postesado, descimbrado,...).

- 1 **Diseño de la dosificación.** Diseñar la dosificación de hormigón (fórmula) que permita la obtención de las resistencias iniciales exigidas en un plazo razonable, teniendo en cuenta el intervalo de temperatura interna $[T_{min}, T_{max}]$ al que estará sometida la estructura.
- 2 **Determinación de parámetros de madurez.** Determinar experimentalmente o acotar la energía de activación aparente u otros parámetros de madurez para la dosificación diseñada, en el intervalo $[T_{min}, T_{max}]$. Como resultado se proporcionará el intervalo de predicción de la energía de activación $[E_{a,max}$ y $E_{a,min}]$, que se empleará para determinar la edad equivalente, o índice de madurez del lado de la seguridad [9].
- 3 **Determinación de las propiedades mecánicas vs. madurez.** Determinar en el laboratorio las curvas propiedad mecánica vs. índice de madurez de la fórmula diseñada (por ejemplo, resistencia a compresión y resistencia a tracción indirecta, respecto a la edad equivalente). Eventualmente se calibrarán otros ENDs con el ensayo de probetas [6-8], para obtener las curvas {resistencia vs. índice END}.
- 4 **Diseño de la instrumentación y ENDs.** Diseñar la instrumentación de cada fase constructiva de la estructura, con el fin de monitorizar las zonas más frías y las zonas de temperaturas más elevadas, que se hormigonan en último lugar en cada fase, y por lo tanto sean menos maduras (zonas representativas) [9]. Planificación de la realización de ENDs de contraste.
- 5 **Control efectuado in situ.** Durante el proceso constructivo se recopilará y analizará la siguiente información:
 - 5.1 Resultados de resistencia de probetas del control y, eventualmente, de las probetas conservadas in situ, varias de las cuales estarán instrumentadas con sensores de temperatura para conocer su temperatura interna (ASTM C1074-11) [3].
 - 5.2 Resultados de ENDs realizados en probetas de control y en diferentes zonas de los elementos prefabricados (índice de rebote y ultrasonidos) [6-8].

- 5.3 Registros de temperatura ambiente y humedad relativa del aire en las inmediaciones de la cimbra.
- 5.4 Registros de temperatura interna de la estructura de hormigón en las zonas representativas.
- 6 **Análisis de datos y estimación de la resistencia.** Con la información obtenida se estimará la edad equivalente o índice de madurez del hormigón en las zonas representativas. Se comprobará que la estructura no experimenta temperaturas excesivas a temprana edad, que provoquen bajas resistencias a largo plazo. Se comprobará, asimismo, que la dosificación del hormigón colocado en obra se ajusta a la fórmula diseñada, de acuerdo con ASTM C1074-11 [3]. Eventualmente se podrá comprobar la homogeneidad del hormigón de los prefabricados, y la ausencia de zonas con baja resistencia mediante la realización de ENDs (índice de rebote y ultrasonidos) [7,8].
- 7 **Toma de decisiones.** Se efectuará una inspección de los elementos prefabricados, con el fin de comprobar el adecuado curado del hormigón (la superficie de la estructura son encofrar deberá estar saturada de agua), descartar la existencia de heterogeneidades (mediante ENDs), y detectar posibles fisuras. Si la inspección es satisfactoria, y la resistencia estimada mediante el método de la madurez y ENDs en un momento determinado es mayor o igual que la resistencia objetivo, se autorizará la transferencia de pretensado. En caso contrario, se deberá esperar hasta que dicha condición se cumpla o se adoptarán medidas correctoras [9].

3. Aplicación del procedimiento *armature.es* a la fase 7 del viaducto de O Marco

A continuación se aplica la metodología diseñada a la reducción del plazo de aplicación del postesado de la fase 7 del tablero del viaducto de O Marco (véanse las Figuras 1 y 2), inicialmente previsto tras 72 horas del final del hormigonado y compactación del hormigón.



Figura 1. Alzado del viaducto de O Marco



Figura 2. Sección transversal del tablero

3.1. Diseño de la dosificación

La dosificación de hormigón HP-40/B/12/IIIa de los viaductos de O Marco y Ulló se diseñó mediante pruebas en la planta de hormigón de Holcim Sequeiros II (Pontevedra). El objetivo era obtener un hormigón bombeable de altas resistencias iniciales para poder reducir al máximo la edad de tesado, prevista inicialmente en 72 horas. El tiempo de transporte, espera de cubas y bombeo al tablero se estimó en 50 minutos, período durante el cual el hormigón debía mantener una consistencia blanda. Se midió el descenso aparente de cono debido al bombeo, que resultó de 5 cm a la salida de la bomba. El cono exigido en el hormigón colocado en el tablero fue de 13

cm, lo que motivó el diseño de un hormigón con cono de 23 cm a la salida de la planta. La resistencia característica exigida para poder tesar el tablero es el 80% de la resistencia de proyecto, es decir, 32 MPa.

Componente	Cantidad
CEM I 52,5 R Holcim (kp)	419
Arena Ramsa (kp)	901
Grava 6/12 Berducido (kp)	883
Glenium ACE 324 BASF (litros)	5
Pozzoloth BASF (litros)	2,2
Agua total (kp)	144
Temperatura ambiente (°C)	31

Tabla 1 Dosificación de HP-40/B/12/IIIa

A fin de lograr altas resistencias iniciales se decidió emplear cemento CEM I 52,5 R, una arena cuarcítica lavada procedente de la planta de machaqueo de Ramsa, y una grava granítica disponible en las proximidades de la obra. Con estos materiales se diseñó la dosificación de hormigón (véase la Tabla 1) que presentó un comportamiento en fresco y unas propiedades mecánicas adecuadas (véase la Tabla 2). Como se puede observar, la resistencia de proyecto se alcanzaba en las probetas normalizadas en aproximadamente tres días.

Propiedad	Valor
cono a 5 minutos (cm)	23
cono a 50 minutos (cm)	18
fcm,24h (MPa)	29
fcm,36h (MPa)	38
fcm,48h (MPa)	41
fcm,72h (MPa)	47
fcim,24h (MPa)	1,2
fcim,36h (MPa)	1,7
fcim,48h (MPa)	2,5
fcim,72h (MPa)	2,9

Tabla 2 Propiedades del hormigón fresco y endurecido HP-40/B/12/IIIa

3.2. Determinación de parámetros de madurez

Investigaciones recientes cuestionan la validez del procedimiento de determinación de la energía de activación del hormigón de la ASTM C1074-11 y defienden que la energía de activación aparente depende, no sólo de la dosificación empleada, sino de la temperatura de curado y del tiempo [1]. En consecuencia, se ha optado por definir un intervalo de predicción para este parámetro, basándonos en los resultados experimentales y en las referencias internacionales, lo que ha conducido a los valores de la Tabla 3 [1,3,9].

$E_{a,min}$	$E_{a,max}$
35000 (J/mol)	50000 (J/mol)

Tabla 3 Acotación de la energía de activación aparente

3.3. Determinación de propiedades mecánicas vs. madurez

En esta etapa se aborda la determinación de las propiedades mecánicas vs. El índice de madurez, mediante la monitorización y ensayo a rotura de las probetas confeccionadas en las pruebas realizadas en la planta de hormigón.



Figura 3. Instrumentación probetas fase 2

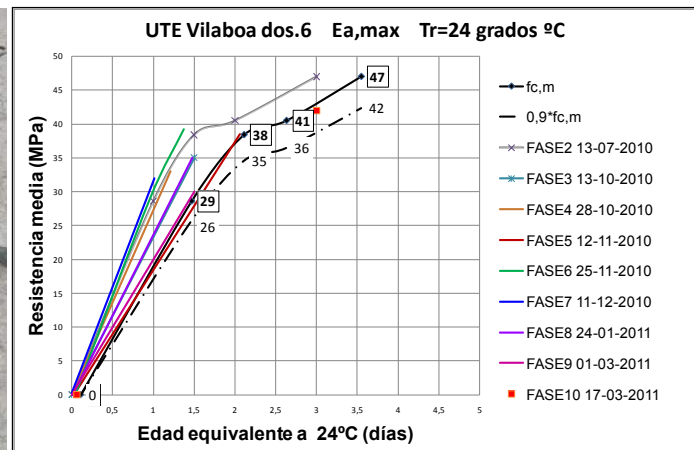


Figura 4. Curva res. compresión-madurez

En la Figura 3 se observan las probetas de control de calidad instrumentadas con sensores para medir la temperatura interna, así como dataloggers para medir la temperatura exterior y humedad relativa de conservación de las probetas del control de calidad. De esta forma se pudo obtener la curva de referencia {resistencia vs. edad equivalente}, obtenida mediante las pruebas realizadas en la planta de hormigón, según la ASTM C1074-11. También se observan en la Figura 4 las curvas experimentales obtenidas a partir de las probetas de cada una de las fases constructivas. Como se puede apreciar, las curvas resistencia vs madurez de cada fase presentaron valores del lado de la seguridad respecto a las curvas de referencia (ASTM C1074-11) . No se produjo ninguna baja de resistencia, ni ningún problema con el suministro del hormigón, en ninguna de las fases constructivas, lo que constituye una gran ventaja de la aplicación del método de la madurez en obras.

3.4. Diseño de la instrumentación

Se dispusieron numerosos sensores de temperatura en cada fase constructiva (véase la Figura 5). Estos dispositivos (véase la Figura 6) fueron diseñados y construidos en el Laboratorio de Instrumentación del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil, CITEEC, de la Universidad de A Coruña. Previa calibración de los mismos en el laboratorio, estos sensores se dispusieron en la zona del tablero que se hormigona al final de cada fase, en la que el hormigón va a presentar la mínima madurez y, consiguientemente la mínima resistencia de toda la fase constructiva.

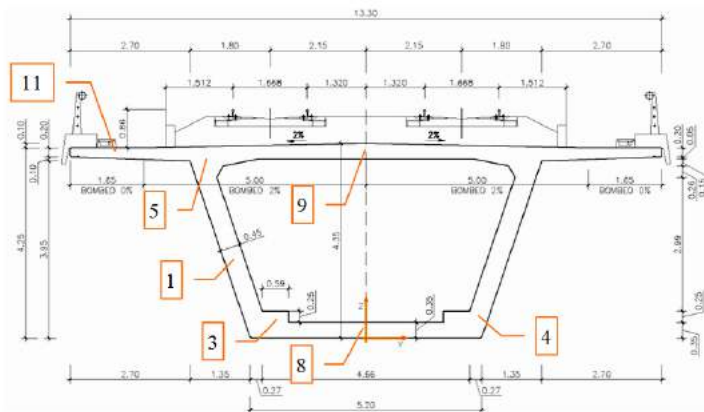


Figura 5. Distribución de sensores de temperatura



Figura 6. Sensores in situ

3.5. Control efectuado in situ

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la fase 7 del tablero del viaducto de O Marco, que tuvo lugar en condiciones invernales. En la Figura 7 se observa la temperatura registrada por el sensor 11 de la figura 5 respecto al tiempo transcurrido tras el hormigonado. Este sensor es representativo de zonas más expuestas al aire y con menor espesor de la sección transversal y, consiguientemente, con menor madurez. En dicha gráfica se comprueba cómo el hormigón aumenta su temperatura debido a las reacciones exotérmicas de fraguado del cemento, hasta alcanzar 60°C al cabo de 12 horas del hormigonado. Posteriormente se aprecia el descenso cuasilíneo de temperatura por la disipación del calor de hidratación, hasta 35 grados al cabo de día y medio.

En la Figura 6 se observan las dos curvas de edad equivalente respecto al tiempo real en la zona del tablero instrumentada con el sensor 11, correspondientes a las cotas del intervalo de predicción de la energía de activación aparente [9]. Una vez transcurridos 1.5 días desde el final del hormigonado (edad a la que se desea tesar), la edad equivalente de la zona instrumentada es de 4 días, de acuerdo con la Figura 8. De acuerdo con la figura 5, la resistencia media del hormigón para una edad equivalente de 4 días es de al menos 47 MPa, lo que significa que, aplicando la simplificación de la EHE-08 para estimar la resistencia característica (restando a la característica 8 MPa), se ha alcanzado prácticamente la resistencia de proyecto al cabo de día y medio.

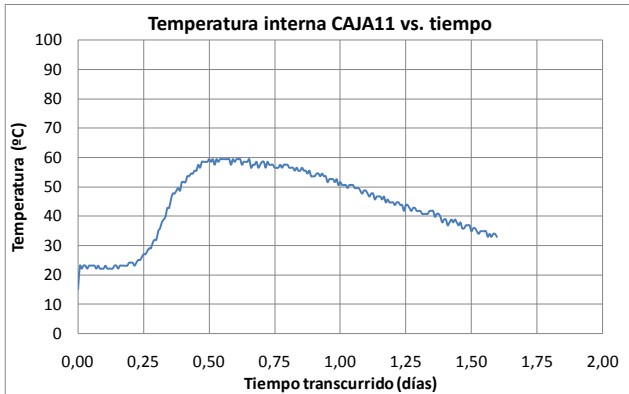


Figura 7. Temperatura interna vs. tiempo

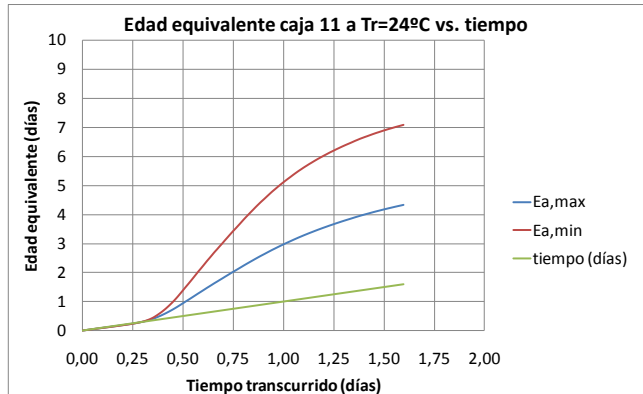


Figura 8. Edad equivalente vs. tiempo real

3.6. Análisis de datos y estimación de la resistencia in situ

En las Figura 9 se representa la temperatura interna de la probeta instrumentada con la caja A2, así como la temperatura ambiente y la humedad relativa a las que estuvo expuesta la probeta. Como se puede observar, no se han cumplido las condiciones de la normativa UNE-EN de conservación de probetas de control de calidad hasta su ensayo [3,4], ni en cuanto a temperatura ambiente ni en cuanto a humedad relativa. Precisamente una de las ventajas de este método es comprobar el adecuado funcionamiento de las cámaras húmedas de los laboratorios de control de calidad.

En la Figura 10 se presentan las curvas edad equivalente respecto a tiempo real de la probeta instrumentada con la caja A2: como se puede observar, la edad equivalente máxima apenas alcanza el valor de un día al cabo de día y medio de tiempo real.

Estos resultados ponen de manifiesto la diferente madurez de las probetas del control de calidad, con respecto a la estructura real de la que se obtuvieron, lo que pone de manifiesto la conveniencia de aplicar el método de la madurez para el control de plazos de construcción, cumpliendo los requisitos de seguridad laboral y estructural.

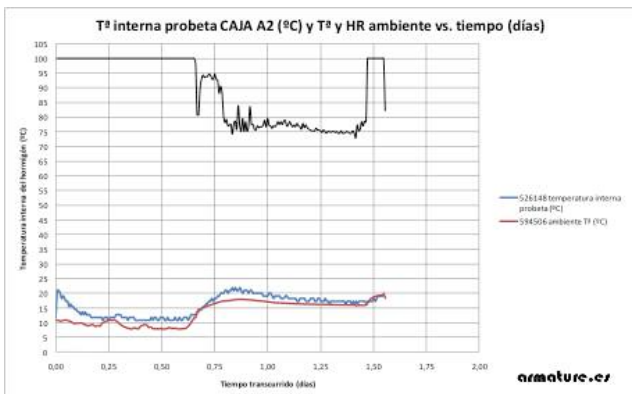


Figura 9. Temperatura interna probeta vs. tiempo

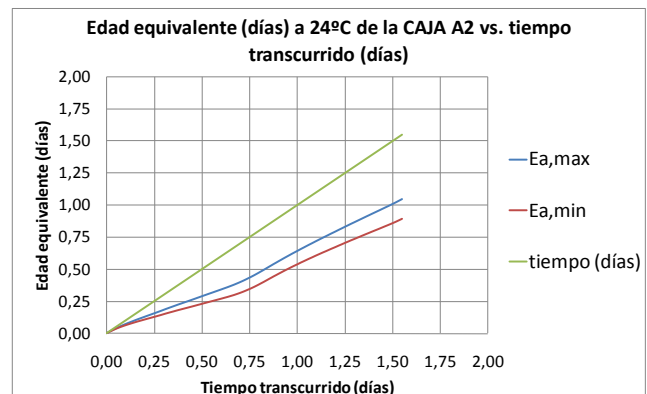


Figura 10. Edad equivalente vs. tiempo real

3.7. Toma de decisiones

Analizando los resultados de todos los sensores dispuestos en el tablero y en las probetas de control, se obtienen los resultados de la tabla 4. Se ha estimado la resistencia media del hormigón a partir de la curva límite inferior de la Figura 4, $0.9f_{c,m}$, de acuerdo con la normativa ASTM C1074-11. Como se puede observar, todos los sensores del tablero indican que se ha alcanzado al menos el 80% de la resistencia de proyecto, 32 MPa, a los 1.5 días tras el final del hormigonado. Dado que la inspección efectuada en el tablero fue satisfactoria, a la vista de los resultados se recomendó a la dirección de obra proceder al tesado de la fase 7 a los 1.5 días, lo que permitió una reducción de plazo a la mitad del plazo inicialmente previsto, de 72 horas en cada vano.

Sensor	Edad a la que $T^a=50^{\circ}\text{C}$ (días)	T^a máxima ($^{\circ}\text{C}$)	Hora de inicio de fraguado	Edad equivalente a 24°C (corr. 36h)	Resistencia media estimada (MPa)	Resistencia característica Estimada (MPa)
1	>0.25	65	13:00	6	>41	>33
2	>0.25	71	18:22	7	>41	>33
3	>0.25	55	19:14	3,5	41	33
5	>0.25	60	19:38	4	>41	>33
8	>0.25	56	11:04	6,5	>41	>33
9	>0.25	55	10:23	5	>41	>33
11	>0.25	59	19:38	4	>41	>33

Tabla 4 Resumen de la instrumentación del tablero mediante sensores

4. Conclusiones y recomendaciones.

- Se ha aplicado el método de la madurez para reducir los plazos de construcción de los viaductos de O Marco y Ulló, del Eje Atlántico de Alta Velocidad. La aplicación de la metodología desarrollada, armature.es, permitió la reducción de plazos de postesado de 72 horas a 36 horas en varias fases constructivas.
- La aplicación de la metodología desarrollada permitió detectar el deficiente funcionamiento de la cámara húmeda del laboratorio de control de calidad, lo que permitió identificar este problema, y adoptar medidas correctoras.
- Durante toda la construcción de los viaductos de O Marco y Ulló no se produjo ninguna baja de resistencias, ni problemas derivados de la falta de curado del tablero, gracias al compromiso de todos agentes intervinientes en la obra: dirección de obra, empresa constructora, oficina técnica, plantas del hormigón, laboratorio de control de calidad externo, y equipo de armature.es (investigadores de la Universidad de La Coruña e ingenieros de CIMARQ).
- Se ha constatado que existe una variación considerable de temperaturas internas entre las diferentes zonas de la sección transversal, de hasta un 30% respecto a la temperatura mínima en la fase estudiada, debido a la diferencia de espesores de hormigón y al efecto de aislante térmico del encofrado. Debido a esta falta de uniformidad de la temperatura interna se

desaconseja emplear “*match curing*”, siendo aconsejable el método de la madurez (ASTM C1074.11), y concretamente la metodología desarrollada armature.es.

- Se recomienda disponer en la estructura un número suficiente de sensores de temperatura, con el fin de monitorizar las zonas de la estructura que experimentan diferente temperatura interna.
- Se propone incluir el método de la madurez en los Eurocódigos y en la normativa española [3,4]. Se sugiere redefinir en la futura normativa el concepto de edad del hormigón, sustituyéndolo por el concepto de índice de madurez o edad equivalente, en aras de la seguridad laboral y estructural.

Agradecimientos

La presente investigación ha sido financiada mediante el proyecto de INCITE: Desarrollo experimental y aplicación en un viaducto de un nuevo método de certificación de la seguridad de estructuras de hormigón, INCITE Xunta de Galicia. Referencia: 10TMT049E. Los autores desean manifestar su agradecimiento a D. Gabriel García Garrido, D. Pedro Rodríguez Geada, D. Luis Baldó Macía, D. Isaac Martín, D. Ricardo Sánchez Bolívar, D. Juan Molina, Da. Carmen Rama, y a D. Gonzalo Roibás. Se agradece la colaboración de los técnicos del laboratorio de instrumentación del CITEEC y a los becarios de la Fundación de la Ingeniería Civil de Galicia.

Referencias

- [1] V.M. Malhotra, N.J. Carino, Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC Press, 2004. ISBN 0-8493-1485-2.
- [2] J. Fernández Gómez, G. González Isabel, F. Hostalet Alba. Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón, Intemac, Madrid, 2001.
- [3] ASTM C 1074-04 - Standard Practice for estimating concrete strength by the maturity method. ASTM International, 2004.
- [4] EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardisation, 2004.
- [5] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [6] UNE-EN 12504-1:2009 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 1: Testigos. Extracción, examen y ensayo a compresión.
- [7] UNE-EN 12504-2:2013 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: Ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote.
- [8] UNE-EN 12504-4:2006 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.
- [9] C. Vazquez-Herrero, I. Martínez-Lage, F. Sánchez-Tembleque. A new procedure to ensure structural safety based on the maturity method and limit state theory, Construction and Building Materials; 35 (October 2012) 393–398.