

Validación experimental en planta de prefabricados de un sistema automatizado de control de calidad de vigas pretensadas, mediante el método de la madurez y ENDS

Experimental validation in a precast plant of an automated system for quality control of prestressed precast girders, based on concrete maturity method and NDTs

Cristina VÁZQUEZ HERRERO

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

Gustavo VÁZQUEZ HERRERO

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

Humberto VÁZQUEZ VÁZQUEZ

Ingeniero de caminos, canales y puertos
Cimarq SL
Presidente
humberto.vazquez@cimarq.es

Federico LAPORT

Ingeniero Civil
Cimarq SL
Ingeniero
federico.laport@cimarq.es

RESUMEN

El proyecto TECNOVAL: Desarrollo de tecnologías para la valorización de RCDs en aplicaciones innovadoras, incluyó la validación experimental en planta de un sistema automatizado para proyectar, monitorizar a través del método de la madurez y otros ensayos no destructivos (ENDs), y prefabricar, elementos prefabricados con hormigones de áridos reciclados procedentes de la demolición de hormigón de los rechazos en planta. En esta ponencia se describe la metodología, así como los resultados de su aplicación durante la fabricación de vigas pretensadas de dos tipos de hormigón: hormigón convencional (HC), y hormigón con árido reciclado fino y grueso (HR).

Se ha aplicado el novedoso procedimiento *armature.es*, basado en el método de la madurez, a las vigas prefabricadas de ambos tipos de hormigón, obteniendo que la energía de activación del HR es un 28% superior a la del HC. No se tiene constancia de investigaciones previas en las que se haya aplicado el método de la madurez en hormigones reciclados. Se ha determinado la edad de transferencia de las vigas de HR mediante la metodología *armature.es*, estimando la resistencia real en un instante determinado a partir de la monitorización de la temperatura interna del hormigón de varias vigas. Dadas las bajas temperaturas ambientales imperantes en la planta de prefabricados durante la fabricación de las vigas pretensadas, típicas de invierno, es preciso esperar un tiempo real de cómo mínimo 5 días, para que se alcance la edad equivalente de 2 días a 20°C.

La metodología *armature.es* se ha implementado en una plataforma web para el control de producción de plantas de prefabricados y estructuras, mediante la monitorización remota de las estructuras, aplicando el método de la madurez y otros ensayos no destructivos.

ABSTRACT

Project Tecnoval: development of technologies to valorize construction and demolition waste, C&Ds in innovative applications, included the experimental validation in a precast concrete plant of an automated system to design, monitor with concrete maturity method and other non destructive tests, and produce precast prestressed concrete elements with recycled aggregate from the demolition of rejected elements. In this paper this methodology is described, as well the results obtained during the production of precast prestressed concrete girders with two concrete types: a conventional concrete, and a recycled one replacing part of both coarse and fine aggregate.

A new procedure, *armature.es*, based on concrete maturity method, has been applied to the precast concrete beams during their production, getting apparent activation energy 28% higher than conventional concrete's. There is no evidence of previous research dealing with the application of concrete maturity method to recycled aggregates. The time required to transfer prestress to concrete has been determined using *armature.es* procedure, estimating the beams current compressive strength through the monitoring of the internal concrete temperature at several beams. Due to the low ambient temperatures at the precast concrete plant during the production of the beams, it was necessary to delay transfer to at least five days, so as to achieve an equivalent age of two days, corresponding to a reference temperature of 20°C.

The methodology *armature.es* has been implemented in a web platform so as to control the production of precast concrete plants and structures, by means of the remote monitoring of the structures, applying concrete maturity method and other non-destructive tests.

PALABRAS CLAVE: prefabricación, hormigón con áridos reciclados, hormigón pretensado, instrumentación, método de la madurez, ensayos no destructivos, ASTM C1074-11.

KEYWORDS: prefabrication, recycled aggregate concrete, prestressed concrete, 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 esta ponencia se describe la metodología *armature.es*, y se exponen los resultados de su aplicación para la validación experimental de criterios de diseño y control de calidad de prefabricados pretensados, aplicando el método de la madurez (según ASTM C1074-11) [3], esclerómetro y ultrasonidos. Asimismo se describe la plataforma web de monitorización desarrollada por CIMARQ en el proyecto Tecnoval.

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 hormigonen 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) [7,8].
 - 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 producción de vigas prefabricadas

A continuación se aplica la metodología diseñada a la producción de vigas prefabricadas pretensadas con dos dosificaciones de hormigón: un hormigón reciclado HR, obtenido mediante reemplazo parcial de áridos por áridos reciclados gruesos y finos procedente de la demolición de hormigón; y un hormigón convencional HC, de similar resistencia a compresión.

Se fabricaron cuatro vigas pretensadas de 6.5 metros de longitud de cada material, HR y HC, tal como se observa en la Figura 1. El objeto de la campaña experimental era validar experimentalmente la metodología *armature.es* y la plataforma web de monitorización de instrumentación remota en tiempo real (desarrollado por CIMARQ) [10,11], para la optimización y automatización de la producción de vigas prefabricadas pretensadas; también se evaluó la influencia del reemplazo de árido convencional por árido reciclado, en las propiedades mecánicas del hormigón, en la edad de transferencia, en las propiedades adherentes del pretensado (longitud de transmisión y longitud de anclaje), y en la capacidad portante de las vigas a flexión (véase la Figura 2).



Figura 1. Fabricación de las vigas



Figura 2. Ensayo a flexión

3.1. Diseño de las dosificaciones

En la Tabla 1 se detallan las dosificaciones de hormigón estudiadas de hormigón convencional, HC, y hormigón con áridos reciclados, HR. Como se puede observar para mantener una trabajabilidad similar (cono de Abrams de 20-25 cm, consistencia líquida), la relación agua cemento del hormigón HR es superior a la del HC.

Hormigón	HC (kg / m ³)	HR (kg / m ³)
Grava gruesa 10/20	600	600
Arena gruesa 0/5	608	539
Arena fina 0/2	308	308
Gravilla 4/12	300	223
AR	0	145
Cemento	400	400
Agua	180	188
Aditivo superplastificante	5	5
A/C	0.45	0.47

Tabla1. Dosificaciones de hormigón.

3.2. Determinación de parámetros de madurez

La metodología *armature.es* establece que la energía de activación se determinará experimentalmente con probetas de hormigón, y no con probetas de mortero equivalente, de ser posible, para evitar ruidos [11].

De esta forma, se han determinado experimentalmente los parámetros de madurez de cada tipo de hormigón según la ASTM C1074-11 [3], cuyos resultados se recogen en la Tabla 2. La energía de activación aparente del HC concuerda con el valor recomendado por la ASTM C1074-11 [3], de 40000 J/mol. La energía de activación aparente obtenida en el hormigón con áridos reciclados es un 28% superior a la energía de activación del hormigón convencional HC. Se concluye que la influencia del árido reciclado en la energía de activación es considerable, y no puede ser despreciada. No se habían encontrado referencias bibliográficas previas al respecto.

En opinión de los autores, la mayor energía de activación del HR es debida a la mayor relación agua cemento del HR, a la mayor capacidad de absorción de los áridos reciclados y al trasvase higrométrico que se produce entre el agua contenida en los poros del árido reciclado, y la pasta que rodea al árido durante el proceso de fraguado y endurecimiento. También se ve afectada por el tipo de hormigón la temperatura dato, T_{datum} , correspondiente al factor tiempo-temperatura.

De acuerdo con la teoría de los estados límite, se considera un intervalo de variación de la energía de activación comprendida entre el 90% y el 110% del valor determinado experimentalmente para cada hormigón, con lo que se obtienen las cotas de la energía de activación $E_{a,min}=0.9E_a$ y $E_{a,max}=1.1E_a$ [9].

Parámetro	HC	HR
E_a (J/mol)	39315	50423
T_{datum} (°C)	0.15	5.27 / 3

Tabla 2. Parámetros de madurez de los hormigones estudiados

3.3. Determinación de propiedades mecánicas vs. madurez y ENDS

A continuación se abordó la determinación de las propiedades mecánicas respecto al índice de madurez y otros ENDS, obtenidas mediante la monitorización y ensayo de las probetas confeccionadas en las pruebas realizadas en la planta de hormigón, y a partir de los resultados de laboratorio obtenidos aplicando la metodología *armature.es*.

En la Figura 3 se presentan los diagramas resistencia media a compresión obtenidos con probetas cúbica de 10 cm de lado, respecto a la edad equivalente a $T_r=20^\circ\text{C}$, para ambos hormigones. En la Figura 4 se representa la misma resistencia, respecto a la velocidad de ultrasonidos en probetas curadas a 20°C en condiciones de saturación.

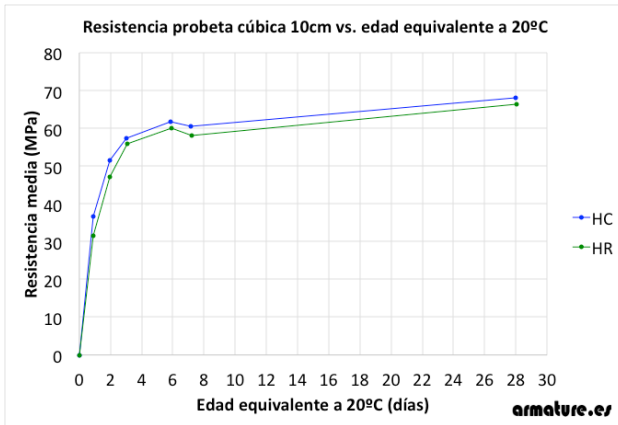


Figura 3. Resistencia vs. Edad equivalente

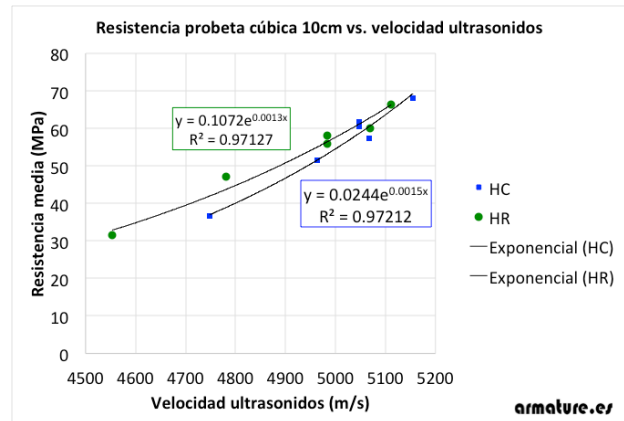


Figura 4. Resistencia vs. velocidad ultrasonidos

3.4. Diseño de la instrumentación

Se dispusieron varios sensores de temperatura en dos vigas de cada hormigón [10], B1C y B4C (HC) y B1R y B4R (HR) (véase la Figura 5), en varias probetas conservadas in situ, y en probetas de control de calidad mantenidas en cámara húmeda. Asimismo se monitorizó la temperatura ambiente y la humedad relativa del aire en la proximidad de las vigas.

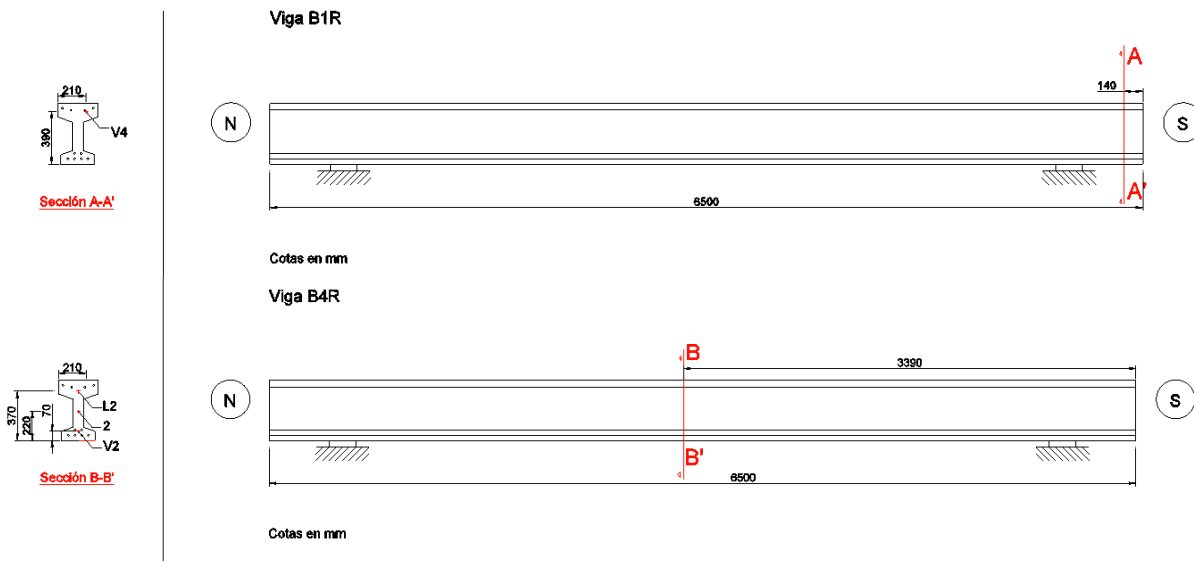


Figura 5. Esquema de colocación de sensores de temperatura

3.5. Control efectuado in situ

Se registraron las temperaturas internas del hormigón en vigas de ambos materiales. En la Figura 6 se observa la temperatura interna de la viga V4R, de hormigón reciclado, así como la temperatura ambiente. Como se puede observar, las bajas temperaturas son representativas del mes del invierno. En la Figura 7 se representa la evolución de la edad equivalente a 20°C desde el hormigonado, pudiéndose observar que esta es considerablemente inferior al tiempo cronológico (bisectriz). La curva más desfavorable, que proporciona la cota inferior de la edad equivalente es la que corresponde a la cota superior de la energía de activación, $1.1E_{a,max}$ (HR).

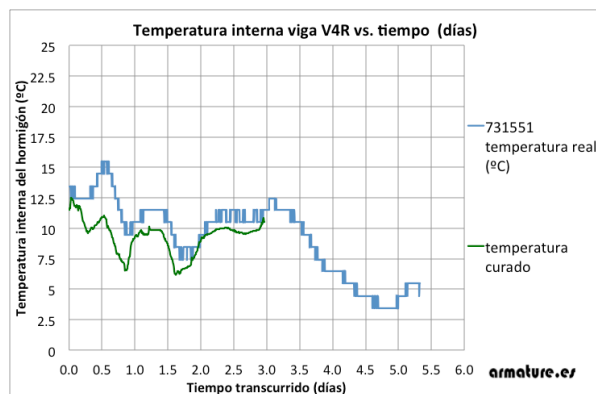


Figura 6. Temperatura interna vs. tiempo

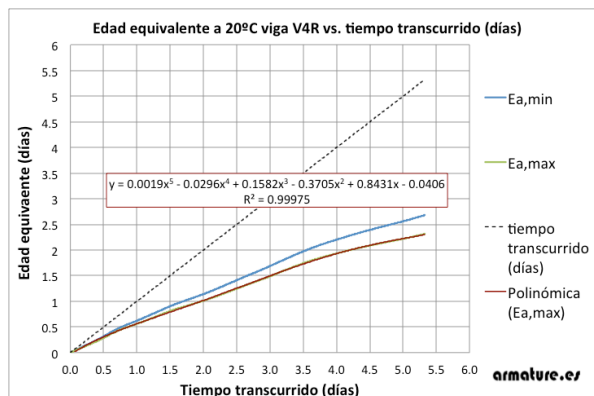


Figura 7. Edad equivalente vs. tiempo real

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

A partir de la monitorización y realización de los ensayos descritos, procedemos a estimar la edad mínima (tiempo cronológico) para transferir el pretensado a las vigas de HR.

La resistencia de proyecto del hormigón de las vigas es de 50 MPa. Se podrá proceder a la transferencia del pretensado cuando se alcance como mínimo el 80% de la resistencia de proyecto, es decir, una resistencia característica de 40 MPa. Para ello es preciso que las vigas presenten aproximadamente 48 MPa de resistencia media (EHE-08, [5]).

Según la Figura 3, para que se haya alcanzado la resistencia exigida, es precisa una edad equivalente de 2 días, y una velocidad de ultrasonidos de 4900 m/s [6]. Se recomienda realizar el ensayo de índice de rebote [7]. Dadas las bajas temperaturas ambientales en la planta de prefabricados (véase la Figura 7), es preciso esperar un tiempo real de 4.5 días, para que se alcance la edad equivalente de 2 días, según la curva correspondiente a $E_{a,max}$.

3.7. Toma de decisiones

Se recomienda realizar ENDs de comprobación, de acuerdo con las recomendaciones de la ASTM C1074-11. En nuestro caso, dada la facilidad de medir la velocidad de ultrasonidos entre ambos paramentos del alma de las vigas, se recomienda, aparte de aplicar la ASTM C1074-11, comprobar que la velocidad de ultrasonidos es de 4900 m/s, como mínimo. La realización de ENDs, como ultrasonidos y esclerómetro permiten comprobar que no se producen bajas de resistencia en aquellas zonas de la estructura en las que se aprecien heterogeneidades o problemas.

En consecuencia, del lado de la seguridad se adopta una edad de transferencia de 5 días.

4. Plataforma web de monitorización de la planta de prefabricados

La plataforma implementada para la monitorización de la planta de prefabricados permite visualizar en tiempo real las variables que se están registrando, y gestionar el histórico de información completo de cada unidad de instrumentación. La plataforma gestiona múltiples sensores en múltiples emplazamientos de proyecto, siempre y cuando la infraestructura física de instrumentación tenga acceso a internet, ya sea por cable o red móvil, o red wi-fi. Es por tanto una herramienta ideal en plantas de prefabricados donde la cobertura con una red wi-fi es muy sencilla (véase la Figura 8).

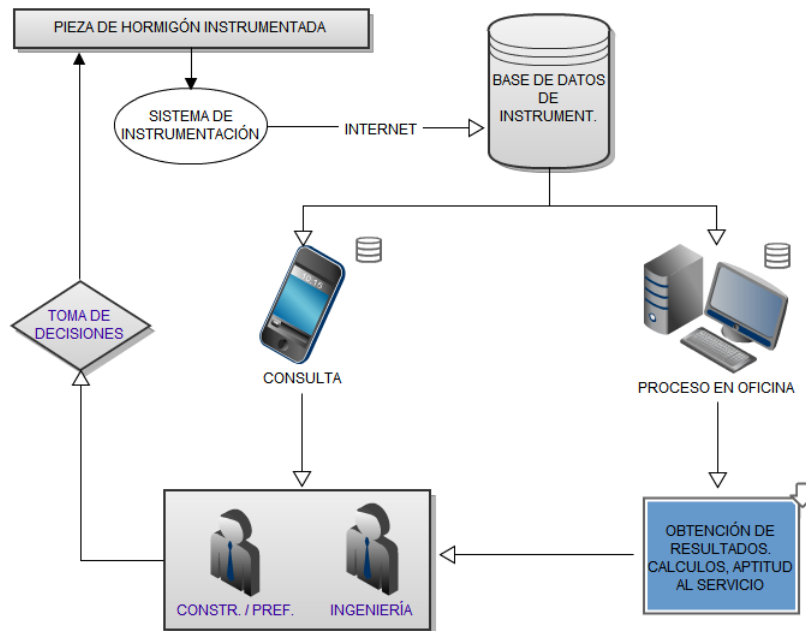


Figura 8. Diagrama de flujo básico del sistema.

La plataforma está destinada a un uso multiusuario, en la que, desde los técnicos de la instrumentación hasta los responsables de la toma de decisiones, puedan tener su cuenta de acceso con un entorno personalizado a su perfil, permitiendo que la instrumentación se convierta en una rutina más flexible y sencilla, integrada de forma sencilla en el proceso de fabricación.

La plataforma incorpora herramientas para la determinación del índice de madurez a partir de los datos obtenidos y de las variables configuradas por el usuario para cada sensor. Así, en el caso implementado ha permitido la obtención de información gráfica directa de las siguientes variables:

- Humedad relativa del aire y temperatura ambiente: gráficas actualizadas en tiempo real con los valores de humedad relativa y temperatura ambiente registrados.
- Temperatura interna del hormigón: gráficas actualizadas en tiempo real con los valores de temperatura interna registrados en las zonas de la estructura instrumentadas.
- Madurez: gráficas en tiempo real del índice de madurez, a partir de los valores registrados de temperatura interna e inicio de fraguado.

5. Conclusiones y recomendaciones.

- Se ha desarrollado una metodología para el diseño, monitorización, producción y control de calidad de vigas prefabricadas pretensadas, basado en el método de la madurez y ensayos no destructivos, denominada *armature.es*.
- Se ha validado la metodología *armature.es* en plantas de prefabricados mediante la fabricación de vigas pretensadas de dos tipos de hormigón de alta resistencia: un hormigón convencional de referencia (HC), y un hormigón con áridos reciclados, obtenido reemplazando parte del árido por árido reciclado grueso y fino (HR) [8, 9].
- Se ha aplicado el método de la madurez a las vigas prefabricadas de ambos tipos de hormigón, obteniendo que la energía de activación del HR es un 28% superior a la del HC [3]. No se tiene constancia de investigaciones previas en las que se haya aplicado el método de la madurez en hormigones reciclados [9].
- Se ha determinado la edad de transferencia de las vigas de HR mediante la metodología *armature.es*, estimando la resistencia real en un instante determinado a partir de la monitorización de la temperatura interna del hormigón de varias vigas.

- Dadas las bajas temperaturas ambientales imperantes en la planta de prefabricados durante la fabricación de las vigas pretensadas, típicas de invierno, es preciso esperar un tiempo real de 5 días, para que se alcance la edad equivalente de 2 días a 20°C.
- La metodología armature.es se ha implementado en una plataforma web para el control de producción de plantas de prefabricados y estructuras, mediante la monitorización remota de las estructuras, aplicando el método de la madurez y otros ensayos no destructivos.

Agradecimientos

La presente investigación ha sido financiada mediante el proyecto TECNOVAL, Desarrollo de Tecnologías para la valorización de RCD's en aplicaciones innovadoras, programa FEDER-INNTERCONECTA 2012, CDTI y mediante el proyecto 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 las empresas del Consorcio TECNOVAL, SACYR SAU, CASTELO SOLUCIONES ESTRUCTURALES, PREFABRICADOS FARO SL y CIMARQ SL, y a las instituciones e investigadores del proyecto TECNOVAL. Se agradece la contribución del Dr. Félix Sánchez-Tembleque en el desarrollo de sensores y asesoramiento en ensayos estructurales. Se agradece a Emetel Sistemas SL el asesoramiento y colaboración en el desarrollo de la Plataforma de Monitorización de Datos.

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 Gomez, 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 12504-4:2006 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.
- [7] UNE-EN 12504-2:2013 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: Ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote.
- [8] C. Vázquez-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.
- [9] C.Vázquez-Herrero et al. Informe final del Contrato de colaboración entre la empresa Prefabricados Faro, s.l. la Universidad de la Coruña y la Fundación Universidad de la Coruña para la realización del proyecto denominado Tecnoval. Mayo de 2015.