

Recomendaciones para la producción de zapatas columnas pretensadas de las autopistas elevadas de Ciudad de México mediante el método de la madurez

Recommendations for the production of prestressed precast column-footings on the elevated highways Segundos Pisos in Mexico City based on concrete maturity method

Cristina VÁZQUEZ-HERRERO

Dr. Ingeniero de caminos
Universidad de La Coruña
Pofesora Titular de Universidad
cvazquezh@udc.es

Roberto MELI PIRALLA

Dr. Ingeniero Civil
Instituto de Ingeniería, UNAM
Investigador Emérito
rmep@pumas.iingen.unam.mx

Miguel Ángel DIRCIO BAUTISTA

Maestro Ingeniero Civil
Instituto de Ingeniería, UNAM
Estudiante de Maestría
mdirciob@gmail.com

Carlos Javier MENDOZA ESCOBEDO

Maestro Ingeniero Civil
Instituto de Ingeniería, UNAM
Investigador Titular
cjm@pumas.iingen.unam.mx

Carlos AIRE UNTIVEROS

Dr. Ingeniero Civil
Instituto de Ingeniería, UNAM
Académico Instituto de Ingeniería
aire@pumas.iingen.unam.mx

Félix SÁNCHEZ-TEMBLEQUE

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

RESUMEN

Los Segundos Pisos de Ciudad de México son autopistas elevadas, constituidas por puentes totalmente prefabricados, a excepción de las pilas (pilotes) de cimentación. El elemento estructural crítico son las denominadas zapatas-columnas, que comprenden las columnas pretensadas y el encepado de las pilas (pilotes) de cimentación. Por otra parte, su elevado peso y compleja forma dificultan la fabricación, transporte y montaje de estos prefabricados.

El objetivo de la investigación es optimizar la producción de las zapatas columnas prefabricadas pretensadas de las autopistas elevadas Segundos Pisos de Ciudad de México, aplicando el método de la madurez. Para ello se estudia el efecto combinado del tiempo y de la temperatura en la evolución temporal de las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante de alta resistencia de las zapatas-columnas. El análisis de los resultados obtenidos ha permitido revisar el método de curado, y establecer la edad de transferencia mínima, de forma que se minimizan los costes y plazos de producción.

ABSTRACT

Segundos Pisos of Mexico City are elevated highways, consisting of precast concrete bridges, whose structural members are totally precast, but for the foundation piles. The critical structural element is the so-called column-footing, which comprises the precast pre-tensioned concrete column that supports the bridge deck, and the foundation footing where the piles are fixed. On the

other hand, the huge weight and complex shape of the column-footings is a challenge to produce, transport and erect these precast prestressed concrete members.

This research is aimed at optimizing the production of the column-footings of the elevated highways called Segundos Pisos de Ciudad de México, in Mexico City, based on concrete maturity method. To this end, the effect of the combined effect of time and temperature on the mechanical properties of the self-compacting concrete is studied. The analysis of the results enabled the revision of the curing procedure, as well as the design of the minimum age at which the prestressing strands should be transferred, so that both production deadline and cost were minimized.

PALABRAS CLAVE: método de la madurez, efecto cross-over, hormigón autocompactante, hormigón pretensado

KEYWORDS: concrete maturity method, cross over effect, self-compacting concrete, prestressed concrete

1. Introducción

La construcción de las autopistas elevadas en Ciudad de México está condicionada por:

- El escaso espacio de maniobra y acopios disponible: la autopista existente, lo que dificulta las operaciones de construcción y montaje.
- La restricción de horarios durante los cuales se puede cerrar la vialidad para acometer las operaciones de construcción, de 23:00 a 06:00.

Por ello se recurre a viaductos completamente prefabricados, cuyos elementos son producidos en plantas de prefabricación con estándares de calidad industriales (véase la Figura 1). Estos elementos se transportan a obra, se montan, y se conectan a la estructura preexistente.



Figura 1. Segundos Pisos de Ciudad de Mexico

El elemento principal de soporte de la superestructura de estos viaductos es la denominada zapata-columna. Se trata de un elemento prefabricado monolítico, que incluye el capitel sobre el que descansan las vigas, la columna pretensada, y el encepado que empotra la columna a los

pilotes de cimentación. Este elemento se fabrica en posición horizontal en plantas de prefabricados, se transporta a obra, se iza, y se conecta a los pilotes de cimentación.

Las zapatas-columnas se fabrican mediante hormigón autocompactante, consistiendo su refuerzo en una combinación de barras de acero de refuerzo, y cordones de pretensado, constituyendo el empleo de pretensado la principal novedad de este tipo de piezas. La resistencia de proyecto es de 60 MPa, y se procede a la transferencia de pretensado una vez transcurrido un día desde el hormigonado.

En la Figura 2 se puede observar el prototipo de zapata-columna pretensada objeto de este artículo, durante su fabricación en la planta de prefabricados. Se trata de una estructura pretensada de 18 metros de altura desde la base del encepado, denominada ZC-049, situada en la Autopista Urbana Norte [1].



Figura 2. Instrumentación de la zapata-columna ZC049

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 [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*) [2]. 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].

Según el método de la madurez, se define edad equivalente, según la ecuación 1 (Freiesleben, Hansen and Pedersen) [2]:

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

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.

El objetivo de este artículo es optimizar la producción de las zapatas columnas de las autopistas elevadas Segundos Pisos de Ciudad de México, aplicando el método de la madurez, con el fin de diseñar el procedimiento de curado para minimizar la edad de transferencia.

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

A continuación se detallan los pasos del procedimiento armature.es, desarrollado en la Escuela Técnica Superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de La Coruña, 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 [4].
- 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 ensayos no destructivos (en adelante, ENDS) con el ensayo de probetas [2], 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) [4]. 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) [2].
- 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) [2].
- 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 sin 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 [4].

3. Aplicación del procedimiento armature.es a la zapata-columna ZC049

A continuación se aplica el procedimiento armature.es al estudio de la influencia combinada del tiempo y la temperatura en la zapata-columna ZC-049.

3.1. Diseño de la dosificación

La dosificación de hormigón autocompactante se detalla en la Tabla 1. El mortero equivalente se dosificó de acuerdo con la ASTM C1074-11.

Componente	Cuantía
Cemento CPC 40-RS (kg/m ³)	640
Arena andesítica (%)	43
Grava caliza 1/2" (%)	47
A/C	0.34
Aditivo ADVA CAST 575 (cc/kg cemento)	9
Aditivo WRDA 64 (cc/kg cemento)	2

Tabla 1. Dosificación del hormigón autocompactante ZC049

3.2. Determinación de parámetros de madurez

En la tabla 3 se consignan las cotas superior e inferior de la energía de activación [3], obtenidas aplicando el procedimiento de la ASTM C1074-11 a los resultados obtenidos mediante el mortero equivalente, que se resumen en la Tabla 4.

$E_{a,min}$	$E_{a,max}$
24000 (J/mol)	32000 (J/mol)

Tabla 2. Energía de activación

3.3. Determinación de propiedades mecánicas vs. madurez

En la Tabla 3 se recogen las resistencias obtenidas a cada edad, para las diferentes temperaturas de curado, comprendida entre $T_{min}=4.5^{\circ}C$ y $T_{max}=87.7^{\circ}C$. Estas temperaturas se corresponden con la temperatura máxima interna registrada en la zapata columna ZC-049, y la temperatura interna mínima prevista en condiciones invernales.

Edad (días)	Resistencia media a compresión (MPa)					
	4.5°C	16.3°C	25°C	42.5°C	60°C	87.7°C
0.5	5	5	29	41	46	
1.0	9	24	37	45	47	40
2.0	35	41	54	54	55	41
3.0	41	46	55	59	58	44
4.0	43	49	56	59	63	46
6.9	69	51	61	69	69	46
14.0	78	63	66	77	71	49
28.2	82	70	74	81	72	61

Tabla 3. Resistencia media a compresión del mortero equivalente vs. edad y T^a

En la tabla 4 se recogen los resultados experimentales de las propiedades mecánicas del hormigón, curado a la temperatura de $23^{\circ}C$, siendo f_c la resistencia a compresión a la edad de transferencia, f_t la resistencia a tracción indirecta, dens. el peso específico del hormigón, y f'_c la resistencia proyectada.

Edad (días)	1	2	3	4	7	14	28
E_c (kg/cm ³)	230871	235714	237495	240671	242140	251929	268966
f_c (kg/cm ²)	477	511	525	537	565	615	628
f_t (kg/cm ²)	34	38	35	38	39	40	53
Dens. (t/m ³)	2.28	2.27	2.24	2.22	2.21	2.25	2.39
f_c/f'_c	0.76	0.81	0.84	0.85	0.90	0.98	1.00

Tabla 4. Propiedades mecánicas medias del hormigón, en condiciones estándar

3.4. Diseño de la instrumentación

Durante la fabricación de la zapata columna, se dispusieron seis sensores de temperatura en diferentes zonas de la zapata-columna, con el fin de instrumentar las zonas más frías y las zonas sometidas a temperaturas más elevadas.

Asimismo, se instrumentaron dos probetas de control de la zapata-columna, tal como establece la normativa ASTM C1074-11 [3].

Al cabo de 28 días se extrajeron testigos de la zapata-columna, y se ensayaron en el laboratorio de estructuras del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

3.5. Control efectuado in situ

En la figura 3 se representa la evolución de las temperaturas internas de la ZC en la zona instrumentada por el sensor 5, junto con la temperatura exterior registradas en la superficie de la ZC-049. Se puede observar que tras 0.8 días se produjo un aumento de la temperatura ambiente debido al curado al vapor aplicado, alcanzando la temperatura del aire 65°C durante un breve período. La temperatura interna de la estructura alcanzó los 90°C, valor superior a los límites de temperatura de varias normativas y recomendaciones [4,5], lo que suscitó la duda de si el curado al vapor sería contraproducente.

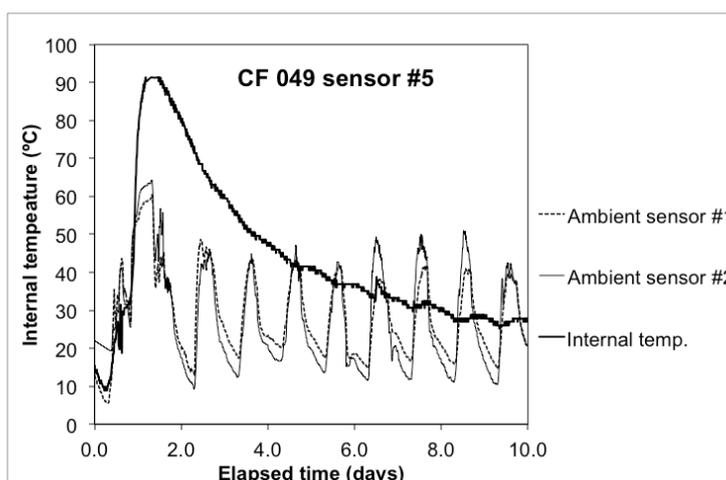


Figura 3. Temperatura interna vs tiempo, sensor #5, CF 049

En la figura 4 se presenta la curva de temperatura interna vs. tiempo de uno de los cilindros del control de calidad. Comparando las figuras 3 y 4 se aprecia la gran diferencia en la temperatura pico alcanzada en cada una, por lo que los cilindros de control no son representativos de la zapata-columna. Según la tabla 4, la resistencia relativa a largo plazo de la CF-049 sería de apenas el 59% de la resistencia de proyecto (aplicando la curva de $T^a=88^\circ\text{C}$), mientras la resistencia relativa a largo plazo de los cilindros de control sería del 90% (aplicando la curva de $T^a=60^\circ\text{C}$).

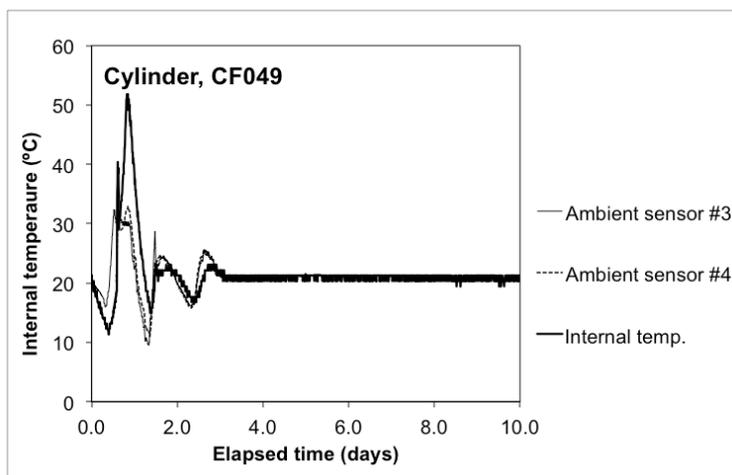


Figura 4. Temperatura interna vs tiempo, cilindro de control, CF 049

3.6. Análisis de datos y resistencia estimada in situ

En la tabla 6 se presentan los valores de temperatura inicial del hormigón (T_0), temperatura máxima registrada respecto al tiempo transcurrido desde el hormigonado (entre paréntesis), así como el gradiente de temperatura máximo registrado por cada sensor.

Sensor	T_0 (°C)	T_{max} (°C)	Grad. T^a (°C/h)
Caja 1	30	90(8h)	19
Caja 2	31	-	12
Caja 4	28	82(12h)	13
Caja 5	30	90(24h)	14
Caja 6	30	87(17h)	8
Caja 7	28	87(10h)	18
A1 cil	29	55(5h)	9
A2 cil	30	52(5h)	6

Tabla 5. Resultados obtenidos mediante sensores de la ZC049

En la Figura 5 se representan las curvas resistencia vs. edad equivalente de la fórmula de hormigón, y el resultado del ensayo de los testigos a compresión, respecto a la edad equivalente a una temperatura de referencia de 25°C. Como se puede observar, la resistencia de los testigos es igual a la resistencia de proyecto, 60 MPa, y este valor está acotado superiormente por la curvas de 25°C y 42°C, e inferiormente por la curva de 60°C. La causa de que la elevada temperatura alcanzada no haya afectado a la resistencia a largo plazo es, a juicio de los autores, que la temperatura máxima se alcanzó habiendo transcurrido un tiempo suficientemente largo desde el final del fraguado, por lo que se produjo un período inicial de descanso, con temperaturas internas moderadas, que evitó la pérdida de resistencia del hormigón a largo plazo.

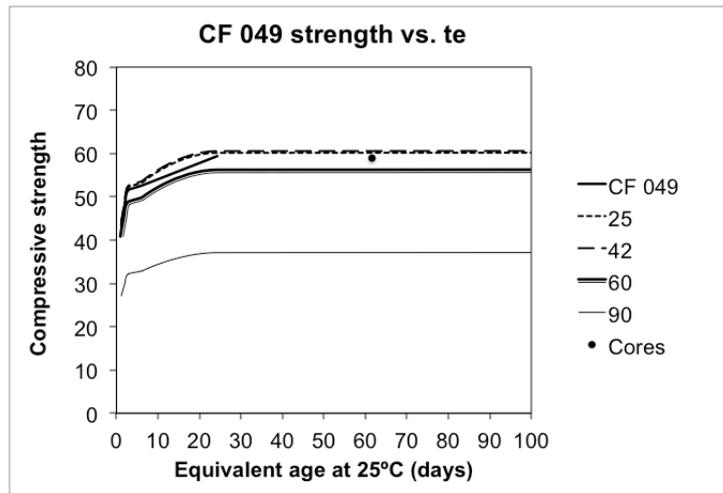


Figura 5. Resistencia del hormigón vs. edad equivalente

3.7. Toma de decisiones

Se concluye que el curado al vapor no es necesario, e incluso puede ser contraproducente, ya que aumenta la temperatura interna de la zapata-columna por encima de los valores límite de las recomendaciones internacionales [5], lo que puede reducir la resistencia a largo plazo de la estructura. Por ello se aconseja prescindir del curado al vapor, lo que reduce la energía consumida y, en consecuencia, tanto el coste de producción como el impacto ambiental del proceso.

Se recomienda sustituir el curado al vapor por un curado mediante riego con agua templada, con objeto de evitar la desecación de la superficie de la zapata-columna durante el fraguado y endurecimiento.

A partir de la Tabla 4 y de la Figura 5, el plazo para el que se alcanza el 80% de la resistencia de proyecto, que es la resistencia exigida en el proyecto para poder transferir el pretensado, es de 2 días de acuerdo con la curva de 42°C, y de poco más de 1 día de acuerdo con la curva de 60°C. La curva de 90°C no supera el 59% de la resistencia de proyecto a largo plazo. Por ello se recomienda intentar reducir la temperatura interna del hormigón de la zapata-columna a 60°C, a fin de evitar mermas de resistencia largo plazo. En este caso, la edad de transferencia se podría mantener en un día.

4. Conclusiones y recomendaciones

- I. Se ha aplicado el método de la madurez a una zapata columna de las autopistas elevadas de México DF. A pesar de las elevadas temperaturas alcanzadas en la zapata-columna instrumentada, de hasta 92°C a las ocho horas del hormigonado, los testigos extraídos y ensayados a 28 días han proporcionado una resistencia similar a la de las probetas de control, por lo que se concluye que la temperatura interna no ha afectado a la resistencia a compresión a largo plazo de la zapata-columna instrumentada.
- II. Se concluye que el curado al vapor no es necesario, e incluso podría ser contraproducente, ya que aumenta la temperatura interna máxima del hormigón a corta edad, pudiendo perjudicar esto a la resistencia a largo plazo de la estructura. Por ello se

aconseja prescindir del curado al vapor, lo que reduciría la energía consumida y, en consecuencia, tanto el coste de producción como el impacto ambiental del proceso.

- III. Se recomienda sustituir el curado al vapor por un curado mediante riego con agua templada, con objeto de evitar la desecación de la superficie de la zapata-columna durante el fraguado y endurecimiento.
- IV. El plazo para el que se alcanza el 80% de la resistencia de proyecto, que es la resistencia exigida en el proyecto para poder transferir el pretensado, es de 2 días de acuerdo con la curva de 42°C, y de poco más de 1 día de acuerdo con la curva de 60°C. La curva de 90°C no supera el 59% de la resistencia de proyecto a largo plazo. Por ello se recomienda intentar reducir la temperatura interna del hormigón de la zapata-columna a 60°C, a fin de evitar mermas de resistencia largo plazo. En este caso, la edad de transferencia se podría mantener en un día.

Agradecimientos

La investigación desarrollada fue posible gracias a la financiación del Fondo de Colaboración Internacional del Instituto de Ingeniería de la UNAM, Proyectos de Colaboración Internacional, Convocatoria 2012, a la Universidad de La Coruña y al proyecto INCITE10TMT049E de la Xunta de Galicia, España, concedido a la empresa CIMARQ y a la Universidad de La Coruña. Los autores desean expresar su agradecimiento a los ingenieros D. José María Riobóo, D. Gregorio Aguilar, D. Gerardo Báez, Da. Irene Gancedo y D. Javier Rodríguez Fernández, por su apoyo a la investigación. Este proyecto no se podría haber desarrollado sin el desarrollo de los dispositivos de medida de la temperatura interna por parte del Dr. Félix Sánchez-Tembleque. Por último, se reconoce el apoyo del servicio de documentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM, y de la UDC.

Referencias

- [1] Proyecto de la Autopista Urbana Norte. Gobierno del Distrito Federal. México. 2011.
- [2] V.M. Malhotra, N.J. Carino, Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC Press, 2004. ISBN 0-8493-1485-2.
- [3] ASTM C 1074-04 - Standard Practice for estimating concrete strength by the maturity method. ASTM International, 2004.
- [4] C. Vazquez-Herrero, I. Martinez-Lage, F.Sanchez-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.
- [5] Bickley JA, Mitchell D. A state-of-the-art review of high-performance concrete structures built in Canada: 1990-2000. Portland Cement Association; 2001.