

Optimización del tiempo de desencofrado en piezas verticales de Hormigón Autocompactante

Sofía Teixeira¹, Adrián Santilli², Iñigo Puente³

Recibido: agosto 2016

Aprobado: setiembre 2016

Resumen.- El tiempo de desencofrado se ve condicionado por el desarrollo de resistencia de la mezcla, ya que el encofrado podrá ser retirado una vez que la pieza sea capaz de soportarse a sí misma y a los esfuerzos correspondientes a dicha tarea. El presente trabajo se ha centrado en el estudio experimental de la metodología de desencofrado descrita por Teixeira [1], y en la contribución de la optimización de los tiempos de desencofrado mediante el estudio de la resistencia mínima necesaria para desencofrar piezas verticales.

Palabras claves: Hormigón autocompactante (HAC); metodología de desencofrado; estudio experimental.

Summary.- The demoulding time is affected by the development of the concrete resistance, since the formwork will be removed once the concrete is able to support itself and the corresponding efforts of the striking. This work has focused on the experimental study of the methodology of demoulding described by Teixeira [1], and on the optimization of demoulding times through the study of the minimum resistance required for stripping vertical pieces.

Keywords: Self-Compacting Concrete; Methodology of demoulding; Experimental study.

1. Introducción.- La idea de un hormigón que se pudiera colocar sin utilizar ningún medio de compactación y que pudiera llenar los encofrados por gravedad sin sufrir ningún tipo de segregación ni otros defectos en el hormigonado, nace de la inquietud del profesor Okamura en Japón. Así, según lo descrito por Okamura y Ouchi [2], en 1983 comienza el desarrollo de esta línea de investigación, obteniendo en 1988 un prototipo de hormigón colocable en obra sin requerir medidas de compactación alguna, al cual se denomina Hormigón Autocompactante (HAC).

Tal cual lo establece el Artículo 1 del Anejo 17 de la EHE-08 [3], “*Se define como hormigón autocompactante, a aquel hormigón que, como consecuencia de una dosificación estudiada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación, no presentando segregación, bloqueo de árido grueso, sangrado, ni exudación de la lechada*”.

Debido a sus propiedades, una de las principales ventajas que presenta este tipo de hormigones, respecto a la velocidad del proceso constructivo, es la capacidad de poder aumentar la velocidad con la que es vertido dentro del encofrado. Un aumento en la velocidad de vertido se traduciría en un aumento de velocidad del ciclo constructivo, lo cual no solo genera un ahorro debido a la

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de Montevideo, Montevideo, Uruguay, steixeira1@um.edu.uy

² Facultad de Ingeniería, Universidad de Montevideo, Montevideo, Uruguay, asantilli@um.edu.uy

³ TECNUN, Universidad de Navarra, San Sebastian, España, ipuente@tecnun.es

reducción de los tiempos muertos, sino que también permite alcanzar antes el período de operación de la estructura y, por lo tanto, el retorno de la inversión.

Por otra parte, la utilización de los encofrados es uno de los costos más importantes a los que incurren las empresas constructoras a la hora de realizar estructuras de hormigón. Hanna y Senouci [4] establecen que puede ascender hasta el 60 por ciento del coste de la estructura de hormigón, dato que es reafirmado más recientemente por Kopczynski [5].

Una manera de aumentar la velocidad del ciclo constructivo es poder retirar los encofrados lo antes posible para de esta manera re-utilizarlos en el ciclo siguiente del proceso constructivo. No obstante, si el encofrado se retira antes de lo debido, la estructura puede sufrir daños perjudiciales para su estabilidad, durabilidad y/o funcionalidad. Para ello es necesario retirar los encofrados una vez que el hormigón alcanza la resistencia necesaria para soportar su propio peso y los esfuerzos producidos como consecuencia del proceso de desencofrado.

Sin embargo, retirar el encofrado más tarde de lo debido genera un aumento en el costo para las empresas constructoras, no solo por el alquiler de los mismos, sino por el tiempo muerto que existe entre el hormigonado y desencofrado.

2. Metodología de desencofrado.- La metodología desarrollada por Teixeira [1], también se presenta en el trabajo de Santilli et al. [6], y Rudeli et al. [7] la analizaron para el caso de hormigón vibrado.

Dicha metodología está basada en los coeficientes de maduración propuestos por la Norma ASTM C 1074 [8], la cual define a dichos coeficientes como una técnica para la medición del efecto combinado de temperatura y tiempo en el desarrollo de la resistencia del hormigón y propone calcular los mismos mediante la Ecuación I

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad \text{I}$$

Donde:

M: Coeficiente de maduración (°C.hrs), o también denominado por la Norma ASTM C 1074 [8] como factor de temperatura-tiempo.

T: Promedio de las temperaturas durante el intervalo de tiempo Δt (°C).

T₀: Temperatura de referencia (°C). La Norma ASTM C 1074 [8] sugiere considerar la temperatura de referencia de 0°C.

t: Tiempo transcurrido (hrs).

Δt : Intervalo de tiempo (hrs).

La metodología presentada por Teixeira [1] consiste en construir la gráfica Resistencia–Maduración a partir de los coeficientes de maduración. Posteriormente, conociendo la resistencia a la que se desea desencofrar, se determina la maduración mínima para desencofrar, tal como se puede observar en la Figura I.

Según lo establece la Norma ASTM 1074 (2004) [8], para una misma dosificación, la relación Resistencia-Maduración es única; por lo que la misma es un dato brindado por la empresa que suministra el hormigón.

Así, basta con que el director de obra seleccione la resistencia a la cual desea desencofrar la pieza, para determinar, por medio de la gráfica Resistencia-Maduración, la maduración correspondiente a la resistencia de desencofrado buscada, tal como se representa en la Figura I.

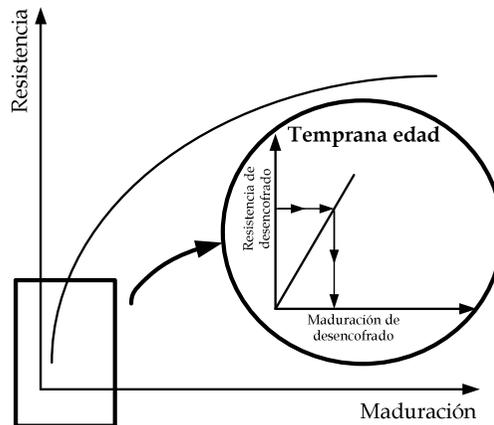


Figura I.- Esquema de la metodología de desencofrado.

La maduración se medirá continuamente in situ mediante un madurímetro (medidor de maduración), o un termopar, que permita determinar el Coeficiente de Maduración en cada instante de tiempo deseado. Finalmente, se puede retirar el encofrado una vez que el hormigón haya alcanzado la maduración de desencofrado, tal como se observa en la Figura I.

La importancia de la utilización de la gráfica Resistencia-Maduración radica en que, a pesar de que en obra se desee el desencofrado de las piezas a diferentes resistencias, la metodología sigue siendo válida. Únicamente es necesario que el director de obra determine el valor de resistencia al cual se desea desencofrar la pieza y, mediante el gráfico, conocer la maduración correspondiente a dicha resistencia.

3. Estudio experimental de la metodología de desencofrado.- El objetivo de este trabajo consistió en estudiar experimentalmente la metodología de desencofrado presentada por Teixeira [1] para hormigón autocompactante. Con este fin, se construyó una columna de HAC, de sección transversal cuadrada de 30 cm de lado y 1,2 metros de altura; y se aplicó la metodología descrita.

Para esto, en primera instancia es necesario conocer la relación Resistencia-Maduración de la dosificación con la que se construirá la columna, la cual se describe en la Tabla I.

Materiales	Cantidad
Árido grueso	700 kg/m ³
Arena	780 kg/m ³
Arena fina	325 kg/m ³
Filler	-
Cemento	385 kg/m ³
Agua	169 kg/m ³
Aditivo superplastificante	4'2 lt/ m ³
Díámetro máximo del árido grueso (mm)	12 kg/m ³

Tabla I.- Dosificación de HAC utilizada.

Si bien la idea original de la metodología es que la relación Resistencia-Maduración sea otorgada por la empresa que suministra el hormigón, ya que cada curva es una propiedad de cada mezcla; en este caso, el hormigón se construyó en laboratorio. Por ello, resultó necesario determinar en el laboratorio la relación Resistencia-Maduración para la dosificación con la cual se construiría la columna.

Para determinar la relación Resistencia-Maduración se realizó una serie de probetas cilíndricas, curadas bajo las mismas condiciones, las cuales fueron ensayadas a compresión en diferentes edades. Estas probetas estaban conectadas a un termopar con el fin de registrar su historial de temperaturas. De esta forma, al momento del ensayo, se registraban la resistencia de la probeta y su maduración. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla II. La representación gráfica de la curva Resistencia-Maduración se puede observar en la Figura II, tanto para los 28 días como para edades tempranas.

Resistencia de la curva (MPa)	Maduración (°C.hr)
0,51	206,96
1,18	240,28
2,13	267,52
3,96	321,14
4,91	347,02
5,33	363,70
6,13	387,85
7,21	420,85
37,84	7870,10
45,70	24219,35

Tabla II.- Datos de resistencia y maduración para la dosificación de HAC empleada.

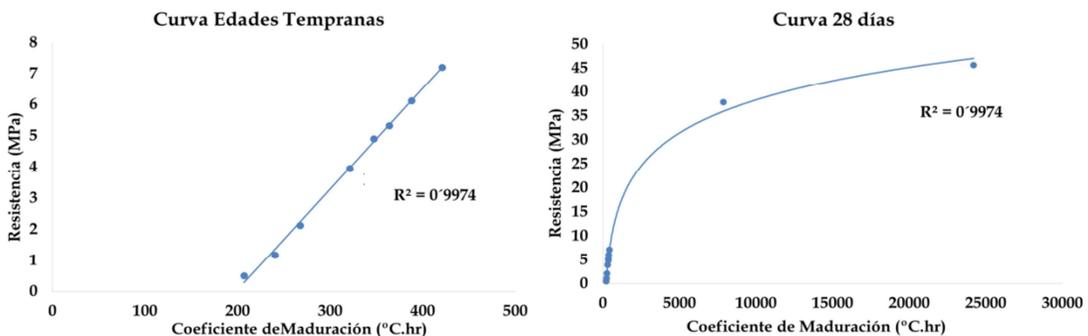


Figura II.- Relación Resistencia-Maduración.

3.1 Resistencia de desencofrado.- Esta metodología de desencofrado tiene la ventaja de que la resistencia de desencofrado la determina el director de obra, permitiendo además poder desencofrar piezas a diferentes resistencias.

Es así que se realizó una encuesta a aproximadamente 70 directores de obra en Uruguay, con el fin de estudiar qué valor ellos creían que era suficiente para desencofrar elementos verticales, resultando que aproximadamente 3 de cada 4 directores de obras consideran suficiente para desencofrar un valor de resistencia de 5 MPa.

En base a esto, se llevó a cabo la metodología de desencofrado fijando como resistencia de desencofrado un valor de 5 MPa; y mediante la relación Resistencia-Maduración, representada en la Figura II, se determinó el coeficiente de maduración correspondiente a dicha resistencia, el cual resultó de 352,5 °C.hr.

Es así que, al momento de construir la columna se introdujo un termopar Tipo T con el fin de registrar el historial de temperaturas de la misma y, de esta manera, poder conocer la maduración que iba adquiriendo. Así, una vez la pieza alcanzó un valor de maduración de 352,5 °C.hr., la misma fue desencofrada.

Luego de desencofrar la columna, se verificaron los criterios establecidos por Harrison [9], para determinar cómo apto un desencofrado, constatando que la pieza no presentara descascaramientos, fisuras ni roturas.

Además, al momento de desencofrar la columna, se ensayó a la compresión una probeta cilíndrica que fue realizada al mismo momento que la columna y curada bajo las mismas condiciones que ésta. El ensayo de la probeta resultó de 4,88 MPa. De esta manera, si estudiamos el error de la metodología como el porcentaje de desviación, tal como se detalla en la Ecuación I, podemos decir que la misma presenta un error de 2,4%.

$$Error(\%) = \frac{|R_e - R_t|}{R_t} \quad I$$

Siendo:

R_t : Valor de resistencia teórica resultante de la aplicación de un determinado modelo en el instante de tiempo t.

R_e : Resistencia medida en el ensayo a compresión en el instante de tiempo t.

3.1.1 Deformaciones.- Además de la resistencia, es necesario verificar las deformaciones que pueda presentar la pieza a causa del valor de resistencia elegido. Por ello, también se estudiaron las deformaciones causadas por el desencofrado a edades tempranas, con el fin de verificar que valores pequeños de resistencia, en el momento de desencofrar, no provoquen deformaciones excesivas en la pieza.

Tal como lo presentan Santilli et al. [6], para dicho estudio se usaron probetas cilíndricas, realizadas con la misma dosificación que la columna, las cuales fueron curadas a una temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Estas probetas iban desencofrándose a diferentes resistencias, y una vez retirado el molde de la probeta, se procedía a medir sus dimensiones, repitiendo este procedimiento 24 horas más tarde.

Las dimensiones consideradas para el estudio fueron el diámetro de la superficie superior, el diámetro de la superficie inferior, el diámetro en el centro de la probeta y la altura de la misma. Debido a que en caso de presentar deformaciones estas serían muy pequeñas, se utilizó una

máquina tridimensional de coordenadas, de gran precisión ($4,2 \mu\text{m}$ en la altura de una probeta). La máquina que se utilizó es de la empresa DEA Mistral modelo MMD, y presenta una capacidad de recorrido de ejes de: 710 mm, 660 mm y 460 mm, para los ejes X, Y, y Z, respectivamente.

Los resultados obtenidos de dicho análisis mostraron que cuando la probeta se desencofra a una resistencia igual o mayor que 5,0 MPa, los valores de las dimensiones estudiadas variaron menos de 0,05%. De esto se deduce que, a partir de dicha resistencia, no se producen deformaciones significativas en las probetas que puedan condicionar el desencofrado.

3.1.2 Presiones.- Debido a que la columna fue realizada e instrumentadas en laboratorio, se pudieron colocar sensores de presión a 10 cm de la base del encofrado, para estudiar la evolución de la presión lateral ejercida por la mezcla en estado fresco sobre las paredes del encofrado y el tiempo necesario para su cancelación o estabilización.

Según Alexandridis y Gardner [10], cuanto más resistencia adquiera el hormigón, menor será la presión lateral que este realice sobre el encofrado. Es por ello que el decaimiento de la presión, así como el tiempo necesario para que la misma se estabilice, puede entenderse como un indicador del desarrollo de la resistencia del hormigón, y consecuentemente del estudio del desencofrado de la pieza.

En la Figura III se representa la evolución de la presión lateral ejercida por el hormigón en estado fresco en los paneles del encofrado desde el momento en que comenzó el vertido hasta el momento del desencofrado, observándose así que, en ese momento, la presión ejercida por la mezcla sobre los paneles del encofrado ya se había estabilizado, es decir que el hormigón era capaz de sostenerse a sí mismo.

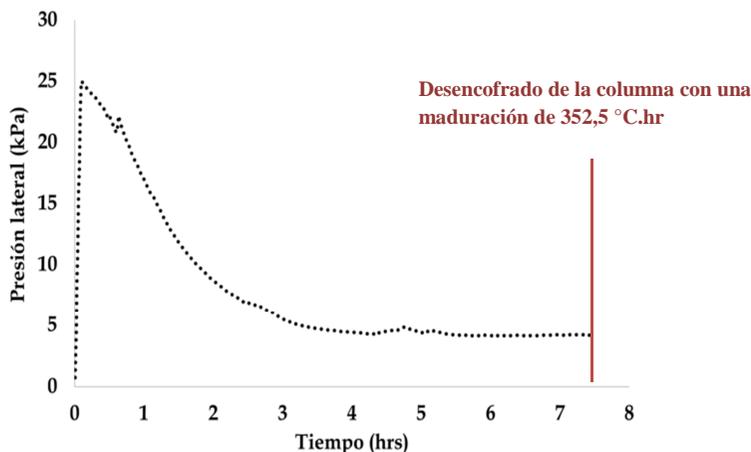


Figura III.- Evolución temporal de la presión ejercida por el HAC en estado fresco sobre los paneles del encofrado.

Además, se verificó que la columna fue capaz de soportar los esfuerzos correspondientes al desencofrado, ya que no se observaron roturas de aristas o esquinas, fisuras, descascamientos

en fragmentos de hormigón, o falta de recubrimiento en algunos sectores. En la Figura IV se puede observar una imagen de la columna durante su desencofrado.



Figura IV.- Columna desencofrada a 4,88 MPa

4. Conclusiones.- En este trabajo se estudió experimentalmente la metodología de desencofrado descrita por Teixeira [1], observándose que la misma puede ser aplicada en piezas verticales de hormigón autocompactante ya que su error resultó de 2,4%. De esta manera, se pudo constatar experimentalmente que la metodología es precisa y que una resistencia de 5 MPa es suficiente para desencofrar columnas.

Por otro lado, es necesario continuar estudiando casos donde las resistencias de desencofrado sean menores a 5 MPa para continuar optimizando los tiempos de desencofrado.

Referencias

- [1] S. Teixeira, «Optimización del tiempo de desencofrado en piezas verticales de Hormigón Autocompactante: Desarrollo de metodología y estudio experimental .», *PhD. Thesis. Univ. Navarra*, 2016.
- [2] H. Okamura y M. Ouchi, «Self-Compacting Concrete», *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 1, n.º 1, pp. 5-15, 2003.
- [3] EHE-08, «Instrucción de hormigón estructural», 2008.
- [4] A. S. Hanna y A. B. Senouci, «Material Cost Minimization Wall Forms», *Build. Environment*, vol. 32, n.º 1, pp. 57-67, 1997.
- [5] C. Koczynski, «Formwork Efficiencies», *Concr. Int.*, pp. 41-43, 2008.
- [6] A. Santilli, S. Teixeira, y I. Puente, «Influence of temperature and concrete reinforcement on vertical formwork design», *Constr. Build. Mater.*, vol. 88, pp. 188-195, jul. 2015.

- [7] N. Rudeli, A. Santilli, y F. Arrambide, «Striking of vertical concrete elements: An analysis using the maturity method», *Eng. Struct.*, vol. 95, pp. 40-48, jul. 2015.
- [8] ASTM C 1074, «Estimating Concrete Strength by the Maturity Method», 2004.
- [9] T. A. Harrison, «Mechanical damage to concrete by early removal of formwork.», *Cem. Concr. Assoc. Tech. Rep. N°42.505*, 1975.
- [10] A. Alexandridis y N. J. Gardner, «Mechanical behaviour of fresh concrete», *Cem. Concr. Res.*, vol. 11, pp. 323-339, 1981.