

Evolución de la resistencia a compresión del hormigón con la edad y la temperatura.

Apellidos, nombre	Lliso Ferrando, Josep Ramon ¹ (jollife2@arq.upv.es) Valcuende Payá, Manuel ¹ (mvalcuen@csa.upv.es)
Departamento	¹ Departamento de Construcciones Arquitectónicas
Centro	Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universitat Politècnica de València

1 Resumen de las ideas clave

En este objeto de aprendizaje se analiza la **influencia de la edad y la temperatura en el desarrollo de la resistencia del hormigón**, centrándose específicamente en su **resistencia a compresión**, que constituye el **parámetro de referencia** tanto para la designación y tipificación del hormigón, como para realizar el control de calidad durante la puesta en obra del hormigón. Además, la resistencia a compresión se emplea frecuentemente como **indicador indirecto de la calidad global del material**.

Igualmente, se expondrá el **procedimiento para cuantificar la evolución de la resistencia a compresión en función del tiempo**, considerando la influencia de la temperatura y las propiedades intrínsecas del hormigón que se estudie.

Finalmente, se realizará una revisión de todos estos contenidos a través de un ejemplo práctico basado en un caso real centrado en una estructura de hormigón, con el fin de ilustrar el comportamiento del material en condiciones reales.

2 Objetivos

Una vez leído con detenimiento este documento, será posible **determinar de manera aproximada el valor de la resistencia a compresión en función del tiempo del hormigón puesto en obra a partir de sus características intrínsecas y el historial de temperaturas medias diarias registradas cada día desde su puesta en obra**.

3 Introducción

El incremento de resistencia del hormigón es más pronunciado en las primeras edades, disminuyendo progresivamente su ritmo de desarrollo hasta alcanzar una fase de estabilización. Por convención, se adopta como referencia la resistencia a los 28 días, ya que en ese momento se ha alcanzado una proporción significativa de la resistencia final del hormigón.

Los principales factores que influyen en la velocidad de endurecimiento y en el desarrollo de la resistencia son los siguientes:

- las características del cemento, ya que un contenido alto de silicato tricálcico (C_3S) o de aluminato tricálcico (C_3A) puede aumentar la velocidad de hidratación, igual que cuando lo hace la finura de molido;
- las condiciones de curado, como la presencia de humedad, que favorece la hidratación del cemento, aunque la falta de esta puede interrumpir definitivamente el proceso y la adquisición de resistencia;
- las temperaturas durante el proceso de hidratación, ya que un aumento de estas puede acelerar la velocidad de desarrollo de las reacciones de hidratación, pero pudiendo conducir a una resistencia menor a edades más avanzadas;
- los aditivos y adiciones, que pueden modificar el proceso de fraguado y endurecimiento.

4 Desarrollo

Dada la gran cantidad de factores que intervienen en el proceso de endurecimiento del hormigón, es muy difícil predecir su resistencia a una edad a partir de los resultados obtenidos a edades más tempranas, o viceversa. Sin embargo, cabe preguntarse: ¿es posible llegar a establecer la evolución de la resistencia a compresión del hormigón con el tiempo de forma aproximada?, ¿sería posible predecir este parámetro a una edad cualquiera?, ¿qué influencia tendría la temperatura en dicha evolución?

En este sentido, el Código Estructural, en el Anejo 19, Proyecto de estructuras de hormigón. Reglas generales y reglas para edificación, Artículo 3.1.2., Punto 6, señala que la resistencia a compresión a una determinada edad “ t ” depende del tipo de cemento, la temperatura y las condiciones de curado. Para una temperatura media de 20°C y un curado adecuado, la resistencia a compresión a una edad cualquiera ($f_c(t)$) se puede estimar según:

$$f_c(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{c,28}$$

donde $f_{c,28}$ corresponde a la edad a 28 días y $\beta_{cc}(t)$ es un coeficiente de valor:

$$\beta_{cc}(t) = e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right]}$$

siendo “ t ” la edad del hormigón en días y “ s ” un coeficiente que depende del tipo de cemento utilizado y que adopta los valores¹:

- 0,20 para cementos de clases resistentes CEM 42,5 R, CEM 52,5 N y CEM 52,5 R (Clase R o endurecimiento rápido);
- 0,25 para cementos de clases resistentes CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (Clase N o endurecimiento normal);
- 0,38 para cementos de clase resistente CEM 32,5 N (Clase S o endurecimiento lento).

La evolución de la resistencia a compresión del hormigón depende también de la temperatura de conservación, evolucionando más rápidamente cuanto mayor es la temperatura, ya que esta actúa como catalizador de las reacciones de hidratación del cemento.

Para poder relacionar la evolución de la resistencia a compresión del hormigón con la temperatura se debe emplear el concepto de “**madurez**”. Este parámetro “ m ” corresponde al producto de la temperatura por el tiempo de actuación de esta de acuerdo con la siguiente expresión:

$$m = \sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]$$

¹ A pesar de la clasificación descrita, el Código Estructural, en su artículo 33.3 también apunta que se consideran hormigones de endurecimiento rápido aquellos fabricados con cemento 42,5R, 52,5 o 52,5R pero siempre que su relación a/c sea menor o igual que 0,60, los fabricados con cemento 32,5R o 42,5 siempre que su relación a/c sea menor o igual que 0,50 o bien aquellos en los que se utilice acelerante de fraguado. El resto de los casos, se consideran hormigones de endurecimiento normal.

donde “ T ” se corresponde a la temperatura diaria, mientras que “ t ” hace referencia al tiempo. En el caso particular de hormigones sometidos durante “ j ” días a una temperatura constante de 20°C, la expresión anterior sería:

$$m = 30 \cdot j$$

Igualando las dos expresiones anteriores y despejando “ j ”, se tiene:

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30}$$

Esta edad “ j ” se denomina edad teórica o equivalente de un hormigón, y es el tiempo que debe de permanecer dicho hormigón a la temperatura de referencia de 20°C para alcanzar la misma madurez (y, por lo tanto, la misma resistencia a compresión) que si hubiese estado durante “ t_i ” días reales a una temperatura de “ T_i ”.

5 Caso práctico

A continuación, se verá la aplicación práctica de todos estos conceptos con un ejemplo real, derivado del proceso de ejecución de una estructura de hormigón armado.

Durante el proceso de ejecución de un edificio residencial que fue proyectado con un hormigón de resistencia característica $f_{ck}=30$ MPa se ha utilizado un hormigón de resistencia característica $f_{ck}=35$ MPa con el fin de acelerar el proceso de ejecución. El hormigón utilizado para la ejecución de este forjado fue fabricado empleando un cemento de clase resistente 52,5 N.



Imagen 1. Forjado tras ejecución, todavía con puntales. Elaboración propia.

Suponiendo que, tras el hormigonado de un forjado, únicamente es posible quitar los puntales cuando se alcance la resistencia de proyecto ($f_{ck}=30$ MPa), se pide establecer el número de días que deben transcurrir para retirar puntales según tres supuestos.

- Supuesto A: durante todos los días la temperatura es de 20°C;
- Supuesto B: durante todos los días la temperatura es de 15°C;
- Supuesto C: la temperatura varía diariamente según los datos de la tabla adjunta.

Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Tª (°C)	4	6	7	9	8	5	9	11	10	8	7	9	12	10	11	10	12

Tabla 1. Supuesto C. Evolución de temperaturas.

5.1 Supuesto A

Ya que la temperatura se mantiene constante durante todos los días a 20°C, es posible aplicar directamente las fórmulas de evolución de la resistencia a compresión recogidas en el Código Estructural. De esta forma, conociendo la resistencia a 28 días ($f_{ck}=35$ MPa, de acuerdo con el enunciado), y sabiendo que la edad a la que se podrían retirar puntales sería cuando se alcanzara la resistencia objetivo (30 MPa), es posible calcular el coeficiente $\beta_{cc}(t)$ según:

$$f_c(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{c,28} \rightarrow 30 = \beta_{cc}(t) \cdot 35 \rightarrow \beta_{cc}(t) = 0,857$$

Una vez conocido el valor del coeficiente $\beta_{cc}(t)$, es posible determinar la edad teórica a la que el hormigón alcanzaría la resistencia objetivo (30 MPa). Para ello, se debe tener en cuenta que en el enunciado se indica que el hormigón ha sido fabricado con un cemento de clase 52,5 N, lo que se corresponde con un cemento de endurecimiento rápido de acuerdo con la clasificación definida en el Código Estructural ($s=0,20$). Por tanto:

$$\beta_{cc}(t) = e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right]} \rightarrow 0,857 = e^{\left[0,20 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right]}$$

Despejando:

$$0,857 = e^{\left[0,20 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right]} \rightarrow t = 8,93 \text{ días}$$

Así pues, a los 9 días aproximadamente sería posible retirar puntales de acuerdo con las condiciones recogidas en el enunciado del Supuesto A.

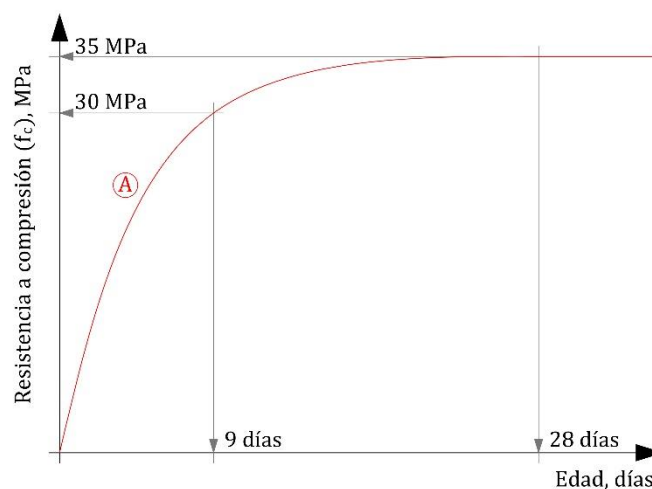


Imagen 2. Supuesto A. Evolución de la resistencia. Elaboración propia.

5.2 Supuesto B

A diferencia del caso práctico anterior, en esta ocasión la temperatura ya no es constante a la temperatura de referencia (20°C) de las ecuaciones presentadas en el Código Estructural, sino que es más baja, a 15°C, lo que ralentiza la evolución de la resistencia. Esto obliga a tener en cuenta el concepto de **madurez** del hormigón. De acuerdo con las descripciones presentadas anteriormente, es posible estimar la edad teórica a la que se corresponde cada día real a la temperatura indicada (15°C) según:

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(15 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,833 \text{ días teóricos}$$

Un día real equivale a 0,833 días teóricos. Sabiendo que la edad teórica que se debe alcanzar de acuerdo con lo obtenido en el Supuesto A, es posible estimar a cuantos días reales equivaldría si la temperatura es de 15°C según:

$$j = \frac{8,93}{0,833} \rightarrow j = 10,72 \text{ días}$$

De esta forma y de acuerdo con los datos obtenidos, si la temperatura fuera constante a 15°C, la retirada de puntales se podría realizar a los 11 días aproximadamente, cuando la resistencia alcanzada sería superior a los 30 MPa.

En este caso, y considerando que la temperatura se mantiene constante durante los siguientes días, también sería posible estimar la edad a la que se alcanzaría la resistencia de 35 MPa, resistencia característica del hormigón empleado:

$$j = \frac{28}{0,833} \rightarrow j = 33,61 \text{ días}$$

Estos datos evidencian la influencia de un descenso de las temperaturas en una evolución más lenta de la adquisición de resistencia del hormigón.

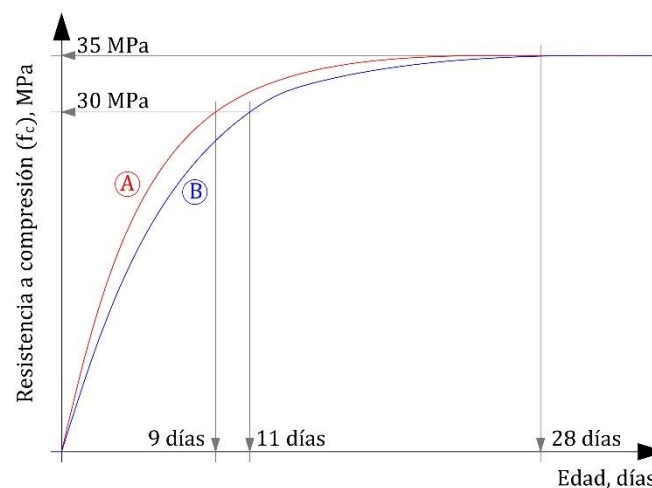


Imagen 3. Supuesto B. Evolución de la resistencia. Elaboración propia.

5.3 Supuesto C

El tercer supuesto práctico representa un caso más próximo a la realidad, en la que cada día se observa una temperatura media distinta, lo que obliga a analizar a cuantos días teóricos equivale cada día real que pasa, de manera iterativa hasta alcanzar la edad teórica necesaria

(8,93 días). Por tanto, y teniendo esto en cuenta, se procederá igual que en el supuesto B, pero realizando los cálculos por días.

- Día 1, temperatura 4°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(4 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,467 \text{ días teóricos}$$
$$8,930 - 0,467 \rightarrow 8,463 \text{ días teóricos restantes}$$

- Día 2, temperatura 6°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(6 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,533 \text{ días teóricos}$$
$$8,463 - 0,533 \rightarrow 7,930 \text{ días teóricos restantes}$$

- Día 3, temperatura 7°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(7 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,567 \text{ días teóricos}$$
$$7,930 - 0,567 \rightarrow 7,363 \text{ días teóricos restantes}$$

- Día 4, temperatura 9°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(9 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,633 \text{ días teóricos}$$
$$7,363 - 0,633 \rightarrow 6,730 \text{ días teóricos restantes}$$

- Día 5, temperatura 8°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(8 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,600 \text{ días teóricos}$$
$$6,730 - 0,600 \rightarrow 6,130 \text{ días teóricos restantes}$$

- Día 6, temperatura 5°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(5 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,500 \text{ días teóricos}$$
$$6,130 - 0,500 \rightarrow 5,630 \text{ días teóricos restantes}$$

- Día 7, temperatura 9°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(9 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,633 \text{ días teóricos}$$
$$5,630 - 0,633 \rightarrow 4,997 \text{ días teóricos restantes}$$

- Día 8, temperatura 11°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(11 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,700 \text{ días teóricos}$$
$$4,997 - 0,700 \rightarrow 4,297 \text{ días teóricos restantes}$$

- Día 9, temperatura 10°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(10 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,667 \text{ días teóricos}$$
$$4,297 - 0,667 \rightarrow 3,630 \text{ días teóricos restantes}$$

- Día 10, temperatura 8°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(8 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,600 \text{ días teóricos}$$

3,630 – 0,600 → 3,030 días teóricos restantes

- Día 11, temperatura 7°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(7 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,567 \text{ días teóricos}$$

3,030 – 0,567 → 2,463 días teóricos restantes

- Día 12, temperatura 9°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(9 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,633 \text{ días teóricos}$$

2,463 – 0,633 → 1,830 días teóricos restantes

- Día 13, temperatura 12°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(12 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,733 \text{ días teóricos}$$

1,830 – 0,733 → 1,097 días teóricos restantes

- Día 14, temperatura 10°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(10 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,667 \text{ días teóricos}$$

1,097 – 0,667 → 0,430 días teóricos restantes

- Día 15, temperatura 11°C;

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) \cdot t_i]}{30} \rightarrow j = \frac{[(11 + 10) \cdot 1]}{30} \rightarrow j = 0,700 \text{ días teóricos}$$

0,430 – 0,700 → Se superan los días teóricos necesarios

Teniendo esto en cuenta, y de acuerdo con la evolución de temperaturas descritas en el enunciado del trabajo, sería posible retirar los puntales a partir del día 16, ya que la resistencia alcanzada superaría la resistencia fijada en proyecto (25 MPa).

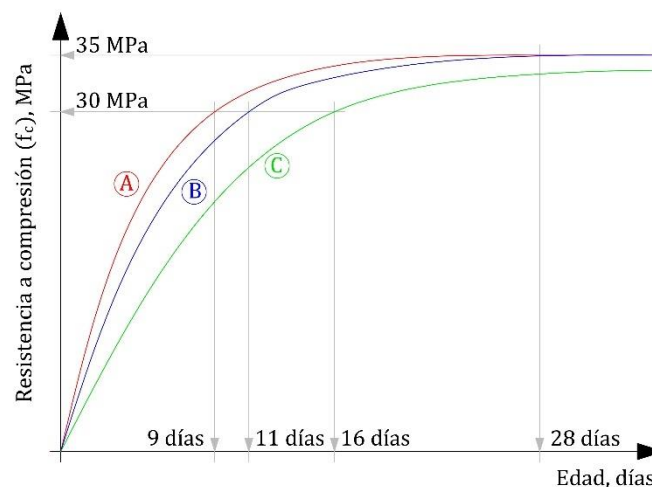


Imagen 4. Supuesto C. Evolución de la resistencia. Elaboración propia.

6 Cierre

En este objeto de aprendizaje se ha abordado, desde un enfoque tanto teórico como práctico, el procedimiento para estimar la resistencia a compresión del hormigón a una edad determinada considerando el historial de temperaturas desde su fabricación. Asimismo, se ha analizado un caso práctico basado en una situación real, en el que, con el objetivo de acelerar el proceso constructivo, se recurre al uso de hormigones de mayor resistencia.

Todo ello reúne una serie de conceptos de gran utilidad práctica, especialmente relevantes en obra, ya que permiten tomar decisiones fundamentadas durante la ejecución de una estructura en aspectos como el ritmo de ejecución, el apuntalamiento y retirada de puntales, o la puesta en carga. Se trata de decisiones que, si bien están asociadas a un elevado nivel de responsabilidad e incertidumbre, pueden ser adoptadas con un alto grado de precisión y fiabilidad cuando se dispone del conocimiento técnico adecuado.

7 Bibliografía

7.1 Libros:

Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., Polder, R. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis and Repair. Editorial VCH. 2013.

Fernández Cánovas, M. Hormigón. Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Colección Escuelas. 6ª edición. Madrid. 2003.

García Meseguer, A., Morán Cabré, F., Arroyo Portero, JC., Jiménez Montoya. Hormigón Armado. 15ª edición. Ed. Gustavo Gili. Barcelona. 2009.

7.2 Normativa:

Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. Código Estructural. 2021.