

Retracci3n y expansi3n del hormig3n en masa.

Apellidos, nombre	Lliso Ferrando, Josep Ramon ¹ (jollife2@arq.upv.es) Valcuende Pay3, Manuel ¹ (mvalcuen@csa.upv.es)
Departamento	¹ Departamento de Construcciones Arquitect3nicas
Centro	Escuela T3cnica Superior de Arquitectura Universitat Polit3cnica de València

1 Resumen de las ideas clave

En el presente artículo se van a definir los **fenómenos de retracción y entumecimiento que experimenta la pasta de cemento durante su proceso de fraguado y endurecimiento**. Ambos procesos hacen referencia a la variación de volumen que experimenta el hormigón en masa tras su colocación (disminución o expansión, respectivamente) en función del tiempo y de las condiciones de exposición, geometría de la pieza o características del material. Es fundamental determinar correctamente este cambio dimensional, ya que puede servir para prevenir la aparición de problemas a temprana edad en el hormigón, como, por ejemplo, las fisuras por retracción.

A lo largo de este artículo se presentará el procedimiento para determinar esta variación de volumen en piezas de hormigón en masa en función de diferentes variables. Por último, se realizará una aplicación práctica sobre un caso real de un elemento de hormigón en masa.

2 Objetivos

Una vez leído con detenimiento este documento, será posible **determinar la retracción o entumecimiento en elementos de hormigón en masa** en función del tiempo a partir de las condiciones de exposición, la geometría de la pieza y las propiedades del material y los componentes utilizados para su fabricación.

3 Introducción

La pasta de cemento, durante el proceso de fraguado y endurecimiento, puede experimentar variaciones de volumen. Si el endurecimiento se produce al aire (condiciones atmosféricas, humedad relativa inferior al 100%), la variación dimensional se denomina “**retracción**” y consiste en una disminución de volumen que se inicia poco después del hormigonado y se desarrolla a lo largo del tiempo. Por el contrario, si el endurecimiento se produce debajo del agua (humedad relativa del 100%), la pasta de cemento sufre una ligera expansión, denominada “**entumecimiento**”. En ambos casos se trata de un fenómeno complejo en el que intervienen dos procesos:

- la pérdida de agua por evaporación y autoconsumo a causa de las reacciones químicas;
- las transformaciones químicas, ya que al hidratarse el cemento se generan productos que ocupan un volumen menor que los componentes iniciales.

Los procesos de retracción y entumecimiento se desarrollan a lo largo de un gran espacio de tiempo, aunque se producen principalmente durante las primeras edades y disminuyen con el tiempo.

Los factores que influyen en los procesos de retracción y endurecimiento se pueden dividir en dos grupos: factores externos y que influyen en la pérdida de agua, como la temperatura, la humedad relativa, el viento o el grado de exposición, y los factores internos, relacionados con aspectos que afectan a la estructura de la pasta de cemento, como el tipo y contenido de cemento, la dosificación empleada y la relación agua/cemento o parámetros relacionados, como el grado de hidratación o la porosidad del material.

La importancia de determinar esta variación dimensional en piezas de hormigón en masa radica en que se trata de una deformación impuesta que puede provocar tensiones de tracción importantes. Si se encuentra impedido el libre acortamiento o expansión, se pueden generar fisuras, en algunos casos apreciables a simple vista, aunque también puede desarrollarse a nivel interno, sin cambio volumétrico aparente, pero con una considerable disminución de la resistencia del hormigón. Todo esto repercute en una merma importante tanto de la capacidad mecánica de una pieza, como en otros aspectos como la durabilidad o la funcionalidad.

Por tanto, es fundamental conocer y determinar la retracción o entumecimiento que pueden experimentar los elementos de hormigón con la finalidad de prevenir graves problemas o detectar daños en elementos existentes.

4 Desarrollo

Como se ha visto, existen una gran cantidad de factores que pueden condicionar la deformación de una pieza de hormigón, lo que convierte en todo un reto determinar la retracción o entumecimiento a lo largo del tiempo. Ahora bien, ¿es posible estimar esta deformación con precisión y para cualquier instante?

El Código Estructural, en el Anejo 19, Proyecto de estructuras de hormigón. Reglas generales y reglas para edificación, Artículo 3.1.4., Punto 6, propone un método de cálculo de la deformación total por retracción (ε_{cs}) reducido a la suma de dos componentes, la deformación de retracción por secado (ε_{cd}) y la deformación de retracción autógena¹ (ε_{ca}), según:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

El desarrollo en el tiempo de la retracción por secado tiene la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{cd} = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$$

donde " k_h " es un coeficiente que depende del espesor medio (h_0) de la sección del elemento analizado (Tabla 1 (correspondiente a la Tabla A19.3.3. del Código Estructural)), siendo este igual:

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u}$$

donde " A_c " hace referencia al área de sección de hormigón y u al perímetro de la sección de hormigón expuesto al secado. El Código Estructural únicamente indica 4 valores de " h_0 " y " k_h ", por lo que para valores intermedios se debe interpolar. El coeficiente " $\beta_{ds}(t, t_s)$ " se puede determinar de acuerdo con:

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{(t - t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}}$$

¹ A causa de la hidratación del cemento se produce una disminución de agua en los poros. Debido a la tensión superficial del agua, al disminuir la humedad en los poros capilares la fuerza de atracción entre las paredes de los poros aumenta, dando lugar a un incremento de la retracción. Esta retracción se denomina retracción autógena. Esta retracción es mayor cuanto menor es la relación a/c y, por lo tanto, en general cuanto mayor es la resistencia del hormigón.

y tiene en cuenta el paso de tiempo desde la edad del hormigón (en días) al comienzo de la retracción por secado (o expansión) (t_s) y que coincide normalmente con el final del curado, aunque se puede considerar 1 día en caso de no conocerse y del lado de la seguridad, y la edad a la que se calcula la retracción (t) en días. Por último, el valor nominal de la retracción por secado ($\varepsilon_{cd,0}$) es un parámetro que tiene en cuenta la humedad relativa (%) y la resistencia característica del hormigón a la edad de 28 días (f_{ck}). El Código Estructural facilita una tabla (Tabla 2, correspondiente a la Tabla A19.3.2. del Código Estructural) con los valores de " $\varepsilon_{cd,0}$ " en función del tipo de cemento utilizado para la fabricación del hormigón². Sin embargo, se trata de una tabla genérica, con valores concretos de resistencia característica y humedad relativa, y para el caso de un hormigón fabricado con cemento de Clase N. Por tanto, en el Apéndice B de este mismo documento se indica la fórmula para estimar el valor nominal de la retracción por secado ($\varepsilon_{cd,0}$) con precisión y para casos distintos a lo indicado anteriormente. Este parámetro se calcula según:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \beta_{HR} \cdot (220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{10}\right)} \cdot 10^{-6}$$

donde " f_{cm} " hace referencia a la resistencia media del hormigón a 28 días, y que ha falta de datos experimentales puede suponerse:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8$$

Por otro lado, β_{HR} corresponde a un coeficiente que dependiendo de las condiciones del elemento analizado adopta los siguientes valores:

-estructuras sumergidas (HR=100%): $\beta_{HR} = 0,25$

-estructuras al aire (HR<100%): $\beta_{HR} = -1,55 \cdot \left(1 - \left(\frac{HR}{100}\right)^3\right)$

Por último, los coeficientes " α_{ds1} " y " α_{ds2} " hacen referencia a la velocidad de endurecimiento del cemento y su valor se recoge en la Tabla 2.

h_0	k_h
<100	1,00
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Tabla 1. Valores para " k_h " (para valores intermedios, debe realizarse una interpolación lineal). Tabla A19.3.3. del Código Estructural.

² Por lo general, se considerarán cementos de endurecimiento lento los CEM 32,5 N (Clase S). Los cementos de endurecimiento normal (Clase N) son los CEM 32,5 R y los CEM 42,5 N. Los cementos CEM 42,5, 52,5 N y 52,5 R se consideran cementos de endurecimiento rápido (Clase R). Sin embargo, el Código Estructural, en su artículo 33.3 señala que se consideran hormigones de endurecimiento rápido aquellos fabricados con cemento 42,5R, 52,5 o 52,5R 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.

	Endurecimiento lento (clase S)	Endurecimiento normal (clase N)	Endurecimiento rápido (clase R)
α_{ds1}	3	4	6
α_{ds2}	0,13	0,12	0,11

Tabla 2. Valores de los coeficientes " α_{ds1} " y " α_{ds2} ". Adaptación, Apéndice B.2. Anejo 19, Código Estructural.

Por otro lado, para el cálculo de la deformación por retracción autógena (ε_{ca}), el Código Estructural señala que esta se puede determinar según:

$$\varepsilon_{ca} = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty)$$

siendo:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{(-0,2 \cdot t^{0,5})}$$

donde " t " está expresado en días. Por tanto:

$$\varepsilon_{ca} = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot (1 - e^{(-0,2 \cdot t^{0,5})}) \cdot 10^{-6}$$

Algo que se debe tener en cuenta a la hora de estimar la deformación de los elementos de hormigón en masa es que, para estructuras sumergidas (y donde se considera que la humedad relativa de exposición es del 100%), la deformación es de expansión (entumecimiento). Sin embargo, en aquellos elementos secados al aire (cuya humedad relativa de exposición es inferior al 100%), la deformación que experimenta la pieza analizada es de contracción (retracción).

5 Caso práctico

A continuación, se presenta un ejemplo de aplicación práctica de todos los conceptos descritos anteriormente.

En un laboratorio de fabricación de hormigón, se produjeron hace 30 años dos probetas prismáticas de hormigón de dimensiones 100x100x400 mm (Figura 1). Ambas probetas fueron fabricadas con el mismo hormigón, en cuya dosificación se utilizó un CEM I 42,5 R con una resistencia a compresión a 28 días de $f_{ck} = 30$ MPa.



Imagen 1. Probetas de estudio. Elaboración propia.

Se pide determinar la retracción de ambas probetas, suponiendo que una de ellas ha estado almacenada en una cámara con temperatura y humedad constantes (22°C y HR=60%) mientras que la segunda ha permanecido durante los 30 años sumergida.

5.1 Caso A. Probeta en cámara

Ya que la temperatura y la humedad se han mantenido constantes, es posible aplicar sistemáticamente las fórmulas recogidas en el Código Estructural. En primer lugar, se debe estimar la retracción por secado. Recuperando las ecuaciones presentadas anteriormente:

$$\varepsilon_{cd} = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$$

donde:

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} = \frac{2 \cdot 100 \cdot 100}{100 + 100 + 100 + 100} = 50 \rightarrow k_h = 1$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{(t - t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}} = \frac{10.950 - 1}{(10.950 - 1) + 0,04 \cdot \sqrt{50^3}} = 0,99871$$

En este caso, se ha considerado que $t_s = 1$, suponiendo que la retracción comienza al primer día de edad. Por último, para estimar el valor nominal de la retracción por secado:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \beta_{HR} \cdot (220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{10})} \cdot 10^{-6}$$

En este caso, se ha considerado:

$$\beta_{HR} = -1,55 \cdot \left(1 - \left(\frac{60}{100}\right)^3\right) = -1,2152$$

$$\alpha_{ds1} = 6$$

$$\alpha_{ds2} = 0,11$$

$$f_{cm} = 30 + 8 = 38 \text{ MPa}$$

Por tanto:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot (-1,2152) \cdot (220 + 110 \cdot 6) \cdot e^{(-0,11 \frac{38}{10})} \cdot 10^{-6}$$

$$\varepsilon_{cd,0} = -598,431 \cdot 10^{-6}$$

Teniendo esto en cuenta, la retracción por secado resultante equivale a:

$$\varepsilon_{cd} = 0,99871 \cdot 1 \cdot (-598,431 \cdot 10^{-6})$$

$$\varepsilon_{cd} = -597,659 \cdot 10^{-6}$$

La segunda componente que debe tenerse en cuenta en el estudio de la reología del hormigón es la retracción autógena, estimada según:

$$\varepsilon_{ca} = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty)$$

siendo:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 2,5 \cdot (30 - 10) \cdot 10^{-6} = 50 \cdot 10^{-6}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{(-0,2 \cdot t^{0,5})} = 1 - e^{(-0,2 \cdot 10.950^{0,5})} = 0,99$$

Por tanto:

$$\varepsilon_{ca} = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 0,99 = 49,5 \cdot 10^{-6}$$

De esta forma, se puede estimar la deformación total de la probeta almacenada en cámara como la suma de la retracción por secado y la retracción autógena:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cs} &= \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} = -597,659 \cdot 10^{-6} + 49,5 \cdot 10^{-6} \\ \varepsilon_{cs} &= -548,159 \cdot 10^{-6}\end{aligned}$$

Conociendo que la deformación obtenida corresponde al cociente de la variación de longitud y la longitud inicial, es posible estimar el cambio de longitud de la pieza:

$$\varepsilon_{cs} = \frac{\Delta L}{L}$$

Sustituyendo y operando.

$$-548,159 \cdot 10^{-6} = \frac{\Delta L}{400} \rightarrow \Delta L = -0,22 \text{ mm}$$

El resultado obtenido es de signo negativo, evidenciando que se trata de un acortamiento de la pieza fruto de la retracción por exposición al aire.

5.2 Caso B. Probeta sumergida

A diferencia del caso anterior, en este supuesto se analiza la variación volumétrica de una pieza sumergida en agua. Al modificarse únicamente la humedad relativa a la que se ha mantenido la pieza, el único parámetro que cambiará será la retracción por secado a causa de un cambio en el valor del coeficiente β_{HR} . En este caso, y considerando que es un elemento sumergido, directamente se puede considerar:

$$\beta_{HR} = -0,25$$

Sustituyendo ahora esta modificación en la estimación de la retracción por secado, y teniendo en cuenta que el resto de los parámetros no varían, ya que la edad de estudio y el hormigón utilizado durante la fabricación son los mismos:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cd,0} &= 0,85 \cdot (0,25) \cdot (220 + 110 \cdot 6) \cdot e^{(-0,11 \frac{38}{10})} \cdot 10^{-6} \\ \varepsilon_{cd,0} &= 123,114 \cdot 10^{-6}\end{aligned}$$

La deformación total, obtenida como la suma de la retracción por secado y la retracción autógena:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cs} &= \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} = 123,114 \cdot 10^{-6} + 49,5 \cdot 10^{-6} \\ \varepsilon_{cs} &= 172,61 \cdot 10^{-6}\end{aligned}$$

Conociendo que la deformación obtenida corresponde al cociente de la variación de longitud y la longitud inicial, es posible estimar el cambio de longitud de la pieza:

$$\varepsilon_{cs} = \frac{\Delta L}{L}$$

Sustituyendo y operando.

$$172,61 \cdot 10^{-6} = \frac{\Delta L}{400} \rightarrow \Delta L = 0,07 \text{ mm}$$

A diferencia del Caso A, se ha obtenido un resultado positivo, evidenciando una ligera expansión. Este resultado demuestra la influencia del curado del hormigón sumergido en agua, y el fenómeno de entumecimiento.

6 Cierre

En este objeto de aprendizaje se ha podido ver de manera teórica y práctica el procedimiento para determinar la retracción o entumecimiento del hormigón en masa en función de las condiciones de exposición.

Se trata de un procedimiento de gran utilidad para prevenir la aparición de problemas como fisuras o daños estéticos, de difícil solución una vez aparecen, pero fáciles de predecir y evitar durante la fase de diseño y cálculo.

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.

Delibes Liniers, A. Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón. 2ª edición. Ed. INTEMAC. Madrid, 1993.

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.

Orchard, D.F. Concrete technology. Ed. Applied Science Publishers Ltd. Volumen 2. Londres, 1979.

Soroka, I. Portland cement past & concrete. Ed. Mc Millan Press Ltd. Londres, 1979.

7.2 Normativa:

Comité Europeo de Normalización (CEN). Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1: Reglas generales y reglas para edificación. Ed. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid. 1994.

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