

# EFECTO DE LAS CONDICIONES DE CURADO EN LA EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

Oña Vera, Andrea Carolina

Asistente de investigación en el Departamento de Ingeniería Estructural y Materiales de Construcción (Department of Structural Engineering and Building Materials) de la Universidad de Gante, Technologiepark 60, 9058 Zwijnaarde, Bélgica.  
e-mail: [ona vera.andreacarolina@ugent.be](mailto:ona vera.andreacarolina@ugent.be)

Recibido:      Aceptado:      Publicado:

## RESUMEN

Para diseñar estructuras de hormigón seguras y sostenibles, es crucial conocer el comportamiento a largo plazo del material. En general, la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón depende de la composición de la mezcla, especialmente del tipo de cemento utilizado, y de la edad y las condiciones de curado del hormigón. Por ejemplo, el hormigón curado a temperaturas más altas muestra un desarrollo más rápido de la resistencia, pero una resistencia final menor en comparación con el hormigón curado a temperaturas más bajas. Sin embargo, las estructuras de hormigón expuestas al medio ambiente muestran gradientes de humedad y temperatura que dan lugar a gradientes de las propiedades del material dentro de la estructura. Esto podría ser problemático si se tienen en cuenta, por ejemplo, los ensayos de homologación, en los que la resistencia del material se caracteriza probando una probeta cúbica que tiene una geometría diferente a la del miembro estructural real. Además, las propiedades mecánicas del hormigón suelen derivarse de su resistencia a la compresión. Un ejemplo típico de esto es la caracterización del comportamiento mecánico en anclajes, en la que la capacidad cónica del hormigón se predice a partir de su resistencia a compresión cúbica, despreciando la evolución de las propiedades de fractura. Sin embargo, recientemente se ha encontrado que esta predicción diverge significativamente de los resultados experimentales para edades crecientes.

La presente investigación pretende estudiar el efecto de la edad y la temperatura de curado en las propiedades mecánicas del hormigón, prestando especial atención a las propiedades de fractura.

Para ello, se llevan a cabo investigaciones experimentales sobre probetas de hormigón y elementos estructurales curados a diferentes temperaturas y ensayados a diferentes edades. Las probetas se almacenan en las mismas condiciones de curado que el elemento estructural. A continuación, se compara la evolución de la energía de fractura con la capacidad cónica del hormigón para comprobar posibles tendencias que podrían conducir a un mejor modelo de predicción.

**Palabras clave:** envejecimiento del hormigón, propiedades mecánicas, curado.

## ABSTRACT

In order to design safe and sustainable concrete structures, knowledge about the long-term behavior of the material is crucial. Generally, the evolution of concrete mechanical properties depends on

the mix composition, especially on the cement type used and the age and curing conditions of the concrete. For instance, concrete cured at higher temperatures shows a faster development of strength, but a lower final strength compared to concrete cured at lower temperatures.

However, concrete structures exposed to the environment show gradients of humidity and temperature which result in gradients of the material properties within the structure. This could be problematic considering for example approval tests, where the material's strength is characterized by testing a cubic specimen having a different geometry than the actual structural member. Furthermore, concrete mechanical properties are usually derived from its compressive strength. A typical example of this is the characterization of mechanical behavior in anchors, in which the concrete cone capacity is predicted from its cube compressive strength, neglecting the evolution of fracture properties. Nevertheless, it has recently been found that this prediction diverges significantly from the experimental results for increasing ages.

The present research aims at studying the effect of age and curing temperature on concrete's mechanical properties, giving particular attention to fracture properties.

This is achieved by carrying out experimental investigations on concrete specimens and structural members cured at different temperatures and tested at different ages. The specimens are stored at the same curing conditions as the structural member. The evolution of the fracture energy is then compared with the concrete cone capacity to check potential trends that could lead to a better prediction model.

**Key words:** concrete ageing, mechanical properties, curing

## INTRODUCCIÓN

Las estructuras de hormigón suelen estar constantemente expuestas a las fluctuaciones de temperatura y humedad relativa del ambiente, desde el momento del vaciado y por el resto de su vida útil. La constante exposición de las estructuras al ambiente lleva a la formación de gradientes de temperatura y humedad en el hormigón. Distintos estudios han demostrado que la temperatura y el contenido de humedad en el hormigón tiene un efecto significativo en su energía de rotura (Bažant et al. 1988, Rossi 1991), la cual aumenta con el aumento de temperatura, y lo cual al mismo tiempo se hace más pronunciado con el aumento de contenido de humedad en la matriz del hormigón.

La reducción de la energía de rotura y los gradientes de temperatura y contenido de humedad en el hormigón pueden ser perjudiciales para la estructura, dando lugar a una propagación más rápida de las fisuras y

además desgastando a la estructura y dando lugar a grandes deformaciones a largo plazo (fluencia/creep).

En esta investigación se estudió el efecto de la temperatura de curado y la humedad relativa del ambiente en las propiedades del hormigón. Se dio especial atención a la energía de rotura y además se investigó el efecto de las condiciones de curado del hormigón en la capacidad cónica de anclajes instalados en el hormigón. Además se investigó la evolución de las propiedades con la edad del hormigón.

Para ello, se realizaron una serie de pruebas experimentales en especímenes curados a temperaturas y humedades relativas específicas. Se presta particular atención a la energía de rotura del hormigón y a la capacidad cónica, porque entender estas dos propiedades permite ampliar el conocimiento del comportamiento del hormigón en tensión. Esto es particularmente importante porque la falla a compresión es simplemente una falla a tensión indirecta.

Además, resulta crucial entender estas dos propiedades cuando se diseñan estructuras en el Estado Limite Ultimo, donde el comportamiento no lineal del hormigón, es el factor crucial de diseño.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para lograr los objetivos del estudio, se llevó a cabo una campaña experimental dividida en tres fases caracterizadas por la edad del hormigón al momento del ensayo. Para investigar el efecto de la edad en el hormigón, cada fase representa una edad del hormigón: 7, 28 y 90 días respectivamente. **Los efectos del curado sobre las propiedades del hormigón se estudiaron** almacenando los especímenes en tres condiciones diferentes tres días después del vaciado en cámaras especiales cuya temperatura y humedad relativa están **rígidamente** controladas. Además, un grupo de especímenes se almacenó en condiciones húmedas, típicamente requeridas para la caracterización del hormigón a los 28 días.

En este capítulo se describe detalladamente el protocolo de vaciado, curado y ensayo de los especímenes.

La selección de la clase de hormigón, la instalación y el ensayo de los anclajes se realizaron de acuerdo a la normativa del Eurocódigo 2-parte 4 (2009). Los anclajes se instalaron en losas de hormigón de dimensiones 125x110x30 cm. El diseño de la mezcla de hormigón se diseñó para alcanzar una clase de hormigón C20/25.

Las losas de hormigón se hormigonaron a una temperatura controlada de aproximadamente 18°C. La mezcla de hormigón, tenía una relación agua-cemento de  $a/c = 0,64$ . El cemento utilizado en la composición es CEM I 52.5 N, comúnmente utilizado en Europa.

Una vez hormigonadas todas las losas, se cubrieron con una funda de plástico y se mantuvieron en el lugar de colado durante tres días. A continuación, se desmoldaron y se almacenaron en las cámaras respectivas. En la

Tabla 1 se presentan las características de las cámaras de temperatura correspondientes al estudio.

**Tabla 1. Temperatura y humedad relativa estudiadas**

Set	Temp. (°C)	Humedad relativa
A	20	95%
B	20	65%
C	5	80%
D	35	35%

Los ensayos llevados a cabo consisten en ensayos de compresión, para determinar la capacidad del hormigón a compresión en cubos, y el ensayo de flexión en tres puntos (Figura 2), para determinar la energía de rotura del hormigón. Además se hizo uso de técnicas de procesamiento de imágenes para determinar la energía de rotura.

Los anclajes consistieron en barras lisas instaladas antes del vaciado del hormigón. La profundidad de los anclajes (longitud adherida) fue de 75 mm y los ensayos se llevaron a cabo en una configuración “no confinada” de manera que se induzca la falla por fractura del hormigón y así determinar la capacidad cónica del hormigón.

Los ensayos se llevaron induciendo la carga por medio de un sistema hidráulico. El ensayo se realizó controlando las deformaciones, las cuales se midieron utilizando LVDTs.

**La Figura 1 muestra la instalación de los anclajes antes del vaciado.**



Figura 1. Encofrado de las losas de hormigón y anclajes

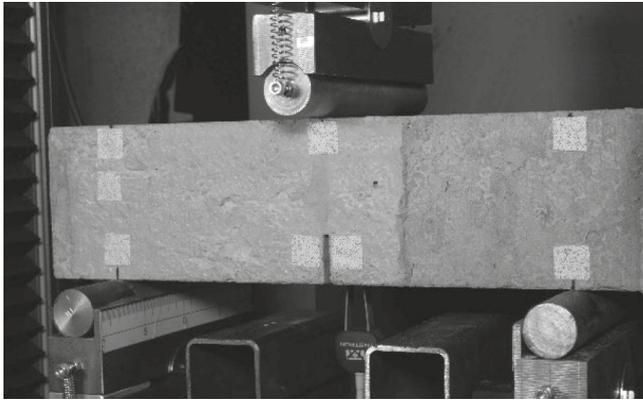


Figura 2. Ensayo de flexión a tres puntos

## RESULTADOS

Los resultados de los cubos sometidos a compresión (Figura 3), muestran la evolución de la capacidad del hormigón. Se puede observar que a menor temperatura, menor la capacidad del hormigón a temprana edad (7 días).

Los resultados de especímenes curados a 20°C, sin importar la humedad relativa, muestran la misma capacidad de compresión a los 7 días de edad (32.4 MPa) y similar a los 90 días de edad, 40.1 MPa a una humedad relativa del 65% y 37.9 MPa a una humedad relativa del 95%.

Los resultados del curado a 35°C muestran que, efectivamente, la capacidad a compresión del hormigón a 90 días resulta ser menor que en el resto de los casos. Esto se debe a que a mayores temperaturas, el agua dentro de la matriz tiende a evaporarse más rápido, resultando en poros mas grandes y en una menor capacidad final.

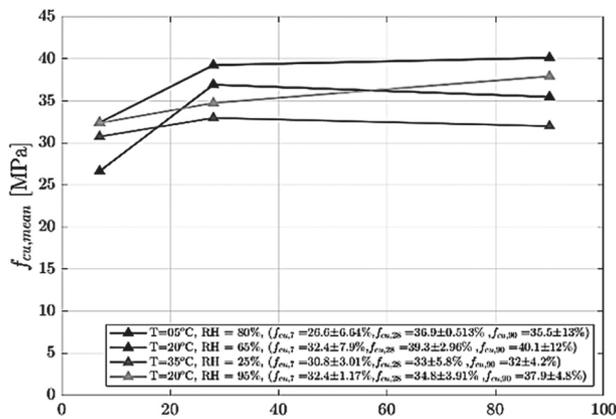


Figura 3. Evolución de la capacidad de compresión del hormigón en estudio.

Los resultados de los ensayos de la energía de rotura, se presentan en la Figura 4, donde se observa que, a pesar de las distintas temperaturas y humedades relativas, la energía de rotura final resulta similar, aproximadamente 0.1 N/mm. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que en algunos casos la dispersión de datos resulta relativamente alta, como es el caso de el curado a 20°C y 95% HR.

Además se observa que en este último caso, la energía de fractura inicial es la más baja en comparación al resto de las condiciones de curado (0.08 N/mm).

La energía de rotura del hormigón determina la energía necesaria para que una fisura se pueda propagar en el material, y por eso, esta ligada a la capacidad cónica del hormigón y su estudio resulta importante para entender la capacidad del hormigón a tensión.

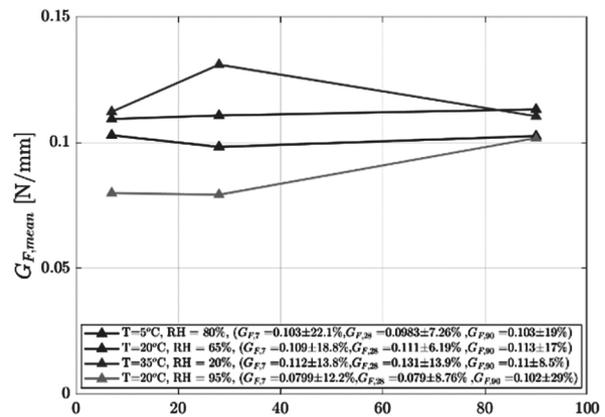


Figura 4. Evolución de la energía de rotura.

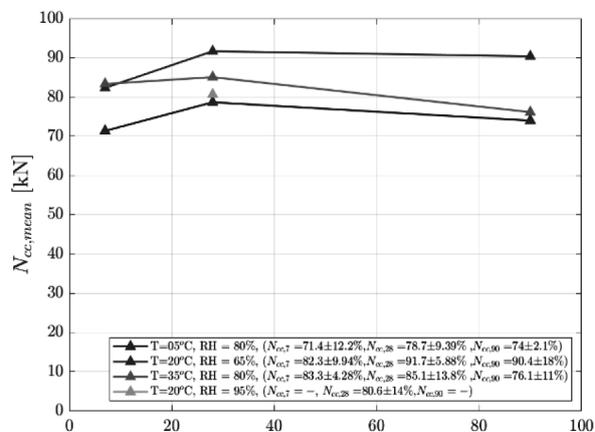


Figura 5. Evolución de capacidad cónica del hormigón.

Finalmente, los resultados de la evolución de la capacidad cónica del hormigón se presentan en la Figura 5, donde se puede observar que la capacidad aumenta significativamente para el hormigón curado a 5°C. Esto concuerda con las pruebas resultantes de los ensayos de flexión en tres puntos.

Nótese que la capacidad cónica del hormigón está ligada a la energía de fractura del hormigón (Eligehausen et al. 1989).

Igualmente, una concordancia entre el resto de las temperaturas de curado se puede observar entre la capacidad cónica y la energía de fractura del hormigón, lo cual confirma que la falla cónica es una falla a tracción y depende de la energía de rotura.

## CONCLUSIONES

En esta investigación se determinó el efecto de las condiciones de curado (temperatura y humedad relativa) en la evolución de las propiedades del hormigón. Para ello se llevaron a cabo una serie de pruebas experimentales, a distintas edades, en especímenes de hormigón curados bajo distintas condiciones de temperatura y humedad.

Como resultado de las distintas podemos concluir que:

La evolución de las propiedades del hormigón resulta más lenta cuando la temperatura y la humedad relativa de curado son más lentas. Sin embargo, tanto la capacidad a compresión como la cónica y la energía de rotura, resultan mayores a una mayor edad en comparación con temperaturas más altas.

A mayor temperatura de curado, la capacidad de compresión resulta mayor a los 7 días de edad, sin embargo, el incremento de capacidad es menor que en el resto de las temperaturas.

La capacidad cónica del hormigón y la energía de rotura concuerdan, ya que ambas son fallas a tracción del hormigón.

Finalmente, se puede decir que los códigos actuales (por ejemplo el EC2) toman en cuenta la evolución de la capacidad a compresión del hormigón, así también las deformaciones de fluencia. Sin embargo, no existen descripciones particulares de la evolución de las propiedades del hormigón a tracción y del efecto de fluencia en las deformaciones de la capacidad cónica (Oña Vera et al. 2023).

Entender la evolución de estas propiedades y su efecto en el comportamiento a largo plazo resulta sumamente para determinar la vida útil de las estructuras.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bažant, Z., Prat, P (1988). "Effect of temperature and humidity on fracture energy". *ACI Materials Journal*, 85-M32(1).

Rossi, P (1991). Corestein, G., Cea, L., Lara, Á., Dolz, J., Puertas, J., & Balairón Pérez, L., (2009), "Influence of cracking in the presence of free water on the mechanical behaviour of concrete". *Magazine of Concrete Research* 43(154):53-57.

EN-1992-4:2009 (2009) Eurocode 2-Design of concrete structures-Part 4: Design of fastenings for use in concrete. European committee for standardization Brussels.

Eligehausen, R. and Sawade G. (1989), "A fracture mechanics based description of the pull-out behavior of headed studs embedded in concrete", *RILEM report - fracture mechanics of concrete structures: from theory to applications*. Chapman and Hall, London.

Oña Vera, A.C. and Boumakis I. and Ninčević, K. and Sinn, L.M. and De Corte, W. and Di Luzio, G. and Wan-Wendner R. "Experimental investigation of the loading rate effect and the sustained load effect in the concrete cone capacity of cast-in anchors". *Materials and Structures* 56(153).