

Resistencia a compresión del hormigón endurecido: resistencia media, resistencia característica y resistencia de cálculo.

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 presenta el concepto de **“resistencia a compresión del hormigón”**, uno de los parámetros más relevantes a la hora de evaluar la calidad de este material de construcción. Para su definición, es necesario conocer también los términos de **resistencia media, resistencia característica y resistencia de cálculo**. Se trata de parámetros que son imprescindibles para definir las características del material y abordar futuros cálculos como los relacionados con la validación de lotes o todo lo referente a dimensionamiento estructural.

Asimismo, se presentará el procedimiento para, en función de una serie de datos obtenidos mediante ensayos de rotura de probetas, obtener cada uno de estos parámetros. Por último, se revisará la comprensión de todos estos conceptos a través de un caso práctico que incluye datos de una obra real.

2 Objetivos

Una vez leído con detenimiento este documento, será posible **definir los términos resistencia media, resistencia característica y resistencia de cálculo del hormigón**. Además, **a partir de una serie de datos obtenidos en ensayos de roturas de probetas fabricadas con un mismo hormigón, será posible calcular cada uno de estos parámetros con la finalidad de determinar las características del material**.

3 Introducción

La resistencia del hormigón es uno de los parámetros más relevantes a la hora de evaluar la calidad de este material de construcción. Se trata de un indicador clave de la capacidad del material para soportar cargas y desempeñarse de manera segura a lo largo de su vida útil. Este parámetro es esencial para diseñar estructuras eficientes y garantizar su durabilidad y seguridad.

La resistencia a compresión del hormigón es un valor convencional que va a depender del tipo de ensayo realizado, pero que de manera generalizada puede definirse como la tensión a la que se alcanza el agotamiento del material. En España, para la determinación de este parámetro se lleva a cabo el ensayo de rotura a compresión definido en la norma UNE-EN 12390-3:2020. El ensayo se realiza sobre probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura a la edad de 28 días tras curado en cámara (temperatura de 20°C y una humedad relativa del 95%). Previo al ensayo, las caras planas de las probetas deben haber sido pulidas o refrentadas para asegurar que son totalmente paralelas y la aplicación de carga se realiza sobre la probeta correctamente. Además, y de acuerdo con la normativa (UNE-EN 12390-3:2020), el ensayo se debe realizar bajo unas determinadas condiciones, en este caso, a una velocidad de carga de $0,6 \pm 0,2$ MPa/s ($\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$). Además de esta norma de ensayo, existen documentos complementarios donde se recogen datos específicos como las características específicas geométricas de las probetas y los moldes, el procedimiento de curado que se debe llevar a cabo o las características que debe tener la máquina de ensayo (UNE-EN 12390-1:2022, UNE-EN 12390-2:2020 y UNE-EN 12390-4:2020, respectivamente).

Tal y como se muestra en la Imagen 1, la utilización de probetas cilíndricas con una relación altura-superficie de 2:1 (como las citadas anteriormente, de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura) permite obtener resultados confiables y representativos del comportamiento real del material. La razón fundamental para utilizar estas dimensiones es asegurar que la rotura en la zona central se produzca por fallo a compresión simple, minimizando los efectos de fricción y otros esfuerzos secundarios (Imagen 1).

Cuando una probeta de hormigón se somete a una carga de compresión axial en una prensa hidráulica, los esfuerzos internos en su estructura deben ser lo más uniformes posible en la zona central. La relación altura/diámetro de 2:1 favorece que en la parte media de la probeta los esfuerzos sean predominantemente de compresión pura, evitando que los efectos de confinamiento en los extremos influyan en la resistencia medida.

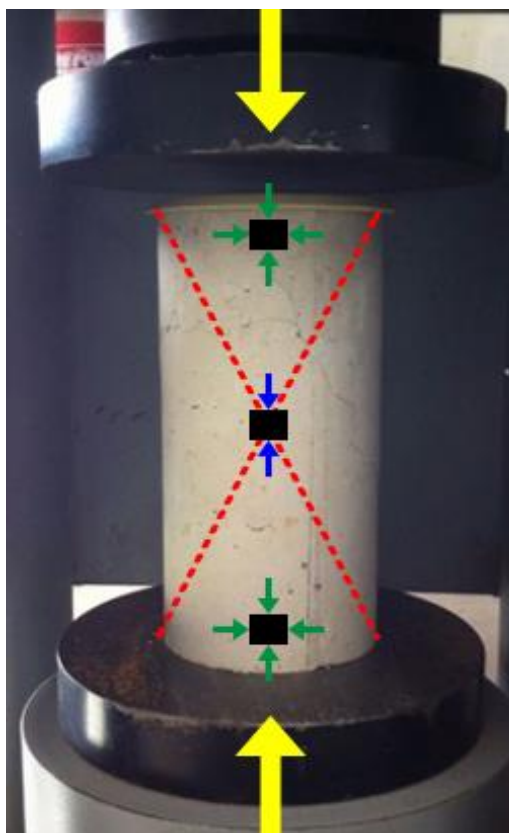


Imagen 1. Esfuerzos en probeta sometida a ensayo de compresión (probeta cilíndrica $\varnothing 15$ cm y altura 30 cm). Elaboración propia.

Durante el ensayo, la probeta se apoya en los platos de carga rígidos de la máquina de compresión. En los puntos de contacto con la prensa, existe fricción entre la superficie de la probeta y las placas de carga, lo que puede generar tensiones laterales (triaxialidad de esfuerzos) y modificar el comportamiento del material (Imagen 1, verde). Al utilizar una altura de 30 cm, se garantiza que estos efectos de fricción se disipen antes de llegar a la parte media de la probeta, donde se registra la resistencia efectiva del material (Imagen 1, azul).

Este procedimiento asegura que los valores obtenidos sean comparables a nivel global y permitan establecer la resistencia característica del hormigón de manera confiable. Sin embargo, ¿qué sucede si la probeta tiene otra relación altura:base?

Si la altura es mayor (relación >2:1):

- la probeta puede experimentar pandeo o fallos inestables, afectando la precisión del ensayo. En la práctica, es poco frecuente que se utilice una relación mayor a 2:1.

Si la altura es menor (relación <2:1):

- aumentan los efectos de fricción en los extremos, lo que sobrestima la resistencia porque el confinamiento lateral genera un estado triaxial de esfuerzos que es posible que no se disipen antes de llegar a la parte media de la probeta (Imagen 2). En la práctica, es muy frecuente que se empleen probetas cúbicas (15 cm de lado) en las que la relación altura:base es 1:1. Estas probetas permiten evitar el acondicionamiento de las superficies de ensayo, ya que se pueden utilizar las caras de acabado del molde. El Código Estructural contempla su utilización, pero señala que los resultados obtenidos con estas geometrías deben corregirse por un factor de conversión (λ_{cub}) (artículo 57.3.2 del Código Estructural) (Tabla 1):

$$f_c = \lambda_{cub} \cdot f_{cúbica}$$

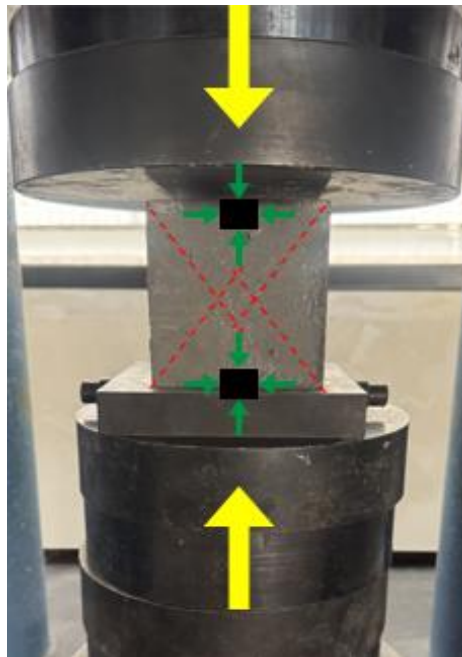


Imagen 2. Esfuerzos en probeta sometida a ensayo de compresión (probeta cúbica 15 cm de lado).
 Elaboración propia.

Resistencia en probeta cúbica, $f_{cúbica}$ (MPa)	λ_{cub}
$f_c < 60$	0,90
$60 \leq f_c < 80$	0,95
$f_c \geq 80$	1,00

Tabla 1. Coeficientes de conversión para determinar la resistencia a compresión en probetas cúbicas.

Estos ensayos permiten determinar la resistencia a compresión de una probeta de hormigón, sin embargo, esta no permite definir con seguridad la resistencia a compresión del hormigón. Para su estimación y certificación, se deben distinguir tres conceptos. Estos son: **la resistencia media, la resistencia característica y la resistencia de cálculo**. A continuación, se explica cada uno de ellos en detalle.

3.1 Resistencia media

La resistencia media del hormigón es el valor promedio obtenido a partir de una serie de ensayos normalizados de la resistencia a compresión de varias probetas. Este parámetro es fundamental para evaluar la calidad del hormigón utilizado en una obra y se determina mediante pruebas realizadas en laboratorio.

Para calcular la resistencia media, se ensayan una serie de probetas cilíndricas o prismáticas según las normas establecidas en cada país. Estos ensayos se realizan generalmente a los 7, 14 y 28 días, aunque el valor a los 28 días es el más utilizado en diseño estructural. La resistencia media proporciona una idea general de la calidad del hormigón, pero no se utiliza directamente en los diseños estructurales, ya que los resultados obtenidos son más o menos dispersos, según el cuidado y rigor con que se confeccione el hormigón y se realicen los ensayos, debiendo, en consecuencia, tener en cuenta esta circunstancia al tratar de definir un hormigón por su resistencia.

Por tanto, si dadas n probetas ensayadas a compresión, se adopta como valor representativo de los ensayos la media aritmética, se obtiene lo que se denomina **“resistencia media del hormigón” (f_{cm})**. No obstante, este valor no refleja la verdadera calidad del hormigón en obra al no tener en cuenta la dispersión de los resultados.

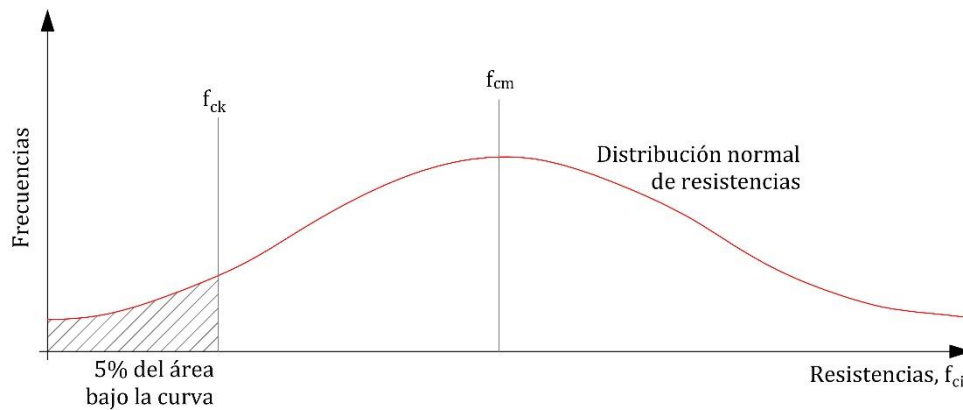


Imagen 3. Distribución de resistencias. Elaboración propia.

Esto significa que, si se define un hormigón por su resistencia media, existe la posibilidad de que el 50% de las veces que se analice, se obtengan resultados por debajo de dicho valor. Por tanto, ¿cómo es posible señalar un valor de resistencia a compresión del hormigón que no arroje tanta incertidumbre como la resistencia media? Si se tienen dos hormigones con la misma resistencia media, no cabe duda de que es más fiable aquel que presenta menor dispersión. Por consiguiente, el coeficiente de seguridad que se adopte en el cálculo debe de ser mayor para el hormigón más disperso. La conclusión que se extrae es que el adoptar la resistencia media como base de los cálculos conduce a coeficientes de seguridad variables según la calidad de ejecución. ¿La respuesta? La resistencia característica.

3.2 Resistencia característica

Para eliminar la incertidumbre que puede implicar referirse a una amasada con el término de resistencia media, y conseguir que se trabaje con un coeficiente de seguridad único, homogéneo en todos los casos, se ha adoptado el concepto de **“resistencia característica del hormigón” o f_{ck}** . Se trata de una medida estadística que tiene en cuenta no sólo el valor de la media aritmética (f_{cm}) de las roturas de las diversas probetas, sino también la desviación típica relativa (σ) o el coeficiente de variación (δ) de la serie de valores. Se trata de parámetros estadísticos que proporcionan una medida de la dispersión, es decir, sirven para medir el grado de alejamiento (dispersión) de los datos y, por lo tanto, es mayor cuanto más alejados de la media estén.

La normativa vigente define la resistencia característica como el valor por debajo del cual solo un pequeño porcentaje de las muestras (generalmente el 5%) puede presentar una resistencia inferior. En otras palabras, es el valor de resistencia que se espera alcanzar en el 95% de los casos (a diferencia del 50% obtenido cuando se trabaja con resistencia media).

Este parámetro es crucial porque permite incorporar un factor de seguridad en el diseño de estructuras. Dado que siempre existe variabilidad en la producción y colocación del hormigón, la resistencia característica permite asegurar que la mayoría de los elementos estructurales cumplen con los requisitos mínimos de resistencia.

Para determinar la resistencia característica, se toman distintas probetas y se realizan ensayos de resistencia a la compresión. Con los resultados obtenidos, y a partir de la resistencia media, se calcula la desviación estándar y se determina el valor característico según modelos estadísticos. En este caso, y de manera simplificada:

$$f_{ck} = f_{cm} \cdot (1 - 1,64 \cdot \delta) = f_{cm} - (1,64 \cdot \sigma)$$

donde:

$$f_{cm} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n f_{ci}$$
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} - f_{cm})^2}{n - 1}} =$$
$$\delta = \frac{\sigma}{f_{cm}} = \frac{1}{f_{cm}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} - f_{cm})^2}{n - 1}} =$$

No debe confundirse la expresión dada para f_{ck} con los estimadores de la resistencia característica que se emplean para aceptar o rechazar un hormigón determinado en obra, a partir de un número relativamente pequeño de determinaciones.

Otro de los rasgos más importantes de la resistencia característica del hormigón es que se trata del parámetro empleado para la tipificación del material. La Instrucción Española (vigente Código Estructural) tipifica los hormigones con arreglo a su resistencia característica expresada en N/mm² (MPa), según la serie:

20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90

añadiendo que el empleo de la resistencia 20 se limita a hormigones en masa y que la resistencia mínima para hormigón armado es de 25 MPa. Con esta limitación se pretende asegurar una mayor durabilidad de las estructuras de hormigón armado.

En general, los valores habituales de “ f_{ck} ” para estructuras de edificación son 25 y 30 MPa, reservándose los restantes valores de la serie para obras civiles, obras de hormigón pretensado y prefabricación.

3.3 Resistencia de cálculo

La **resistencia de cálculo** (f_{cd}) es el valor utilizado en los diseños estructurales y se obtiene dividiendo la resistencia característica entre un coeficiente parcial de seguridad (γ_c) que permite considerar una reducción en la resistencia teórica del material para compensar incertidumbres en la ejecución y variaciones en los materiales empleados. Esta resistencia se utiliza en los cálculos para garantizar que la estructura pueda soportar las cargas aplicadas durante su vida útil sin fallos. El valor obtenido se corrige por un factor que tiene en cuenta la fatiga o cansancio del material.

Matemáticamente, se expresa como:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

donde:

- f_{ck} corresponde a la resistencia característica del hormigón;
- γ_c hace referencia al coeficiente de minoración de la resistencia del hormigón y que para condiciones de Estados Límite Últimos toma el valor de 1,50 o 1,30 dependiendo de si se trata de situaciones de proyecto persistentes o accidentales, respectivamente, y para Estados Límite de Servicio toma un valor de 1,00;
- y α_{cc} es el factor que tiene en cuenta el cansancio del hormigón debido a cargas de larga duración y que oscila entre 0,85 y 1,00. En edificación es habitual considerar $\alpha_{cc} = 1,00$ siempre y cuando la carga permanente no represente prácticamente la totalidad de la carga total¹, es decir cuando la carga permanente no sea superior al 80% de la carga total.

4 Desarrollo

Cada una de estas resistencias tiene un papel específico en la evaluación y diseño del hormigón. La resistencia media permite evaluar la calidad del material suministrado en la obra, la resistencia característica define un valor de referencia que garantiza la seguridad estructural, y la resistencia de cálculo introduce un factor de seguridad para que las estructuras sean confiables.

En la práctica, y de manera lógica, estos valores se relacionan de la siguiente manera:

- la resistencia media debe ser mayor que la resistencia característica para garantizar que el 95% de las muestras cumplan con los requisitos;

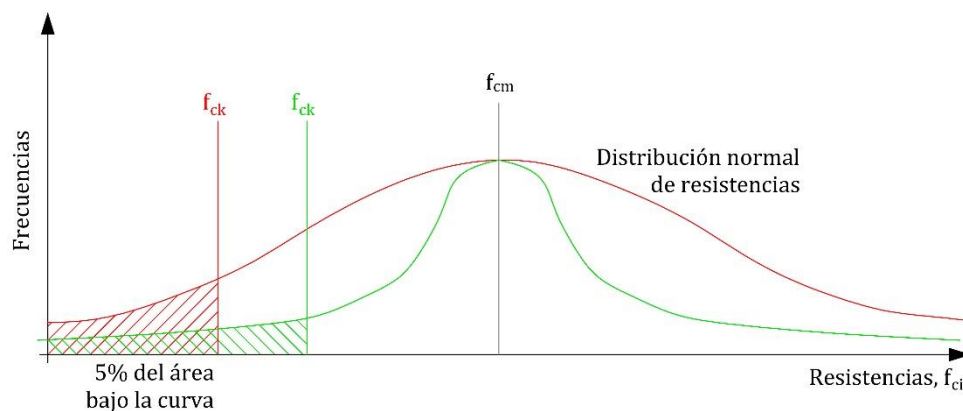
¹ En el caso de hormigones fabricados con árido ligero y en elementos de hormigón en masa es recomendable adoptar un coeficiente α_{cc} igual a 0,85.

- la resistencia de cálculo es menor que la resistencia característica debido a la aplicación del coeficiente parcial de seguridad.

Otras afirmaciones que pueden extraerse de toda la descripción teórica son:

- para dos hormigones con la misma resistencia media, aquel con una menor dispersión será también el que mayor resistencia característica obtenga;
- dos hormigones con la misma resistencia característica pueden tener la misma resistencia media solo si presentan la misma dispersión. Sin embargo, lo más habitual será que aquel con mayor dispersión sea el que mayor resistencia media alcance.

Gráficamente en la Imagen 4 se puede ver el razonamiento de estas afirmaciones.



5 Caso práctico

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

Durante el proceso de ejecución de la cimentación de un edificio comercial se han tomado muestras de todas las amasadas utilizadas para su ejecución. Los resultados obtenidos en los ensayos de compresión de cada muestra han sido los siguientes:

- en 6 amasadas la resistencia obtenida ha sido $f_c=23$ MPa;
- en 4 amasadas la resistencia obtenida ha sido $f_c=26$ MPa;
- en 8 amasadas la resistencia obtenida ha sido $f_c=25$ MPa;
- en 12 amasadas la resistencia obtenida ha sido $f_c=24$ MPa;
- en 5 amasadas la resistencia obtenida ha sido $f_c=27$ MPa;
- en 9 amasadas la resistencia obtenida ha sido $f_c=22$ MPa;
- en 3 amasadas la resistencia obtenida ha sido $f_c=21$ MPa;

Se pide determinar la resistencia característica a compresión f_{ck} del hormigón de la cimentación. Además, sabiendo que se ha utilizado una resistencia de cálculo de 18 MPa para el dimensionamiento frente a ELU, se pide comprobar si el coeficiente de minoración de la resistencia del hormigón empleado ha sido adecuado.

5.1 Resistencia media

La resistencia media (f_{cm}) corresponde a la media aritmética de los resultados obtenidos. Por tanto:

$$f_{cm} = \frac{6 \cdot 23 + 4 \cdot 26 + 8 \cdot 25 + 12 \cdot 24 + 5 \cdot 27 + 9 \cdot 22 + 3 \cdot 21}{47} = \frac{1126}{47} = 23,96 \text{ MPa}$$

5.2 Resistencia característica

En primer lugar, se debe estimar el coeficiente de variación:

$$\delta = \frac{1}{f_{cm}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} - f_{cm})^2}{n - 1}} =$$
$$= \frac{1}{23,96} \cdot \sqrt{\frac{6(23 - 23,96)^2 + 4(26 - 23,96)^2 + 8(25 - 23,96)^2 + 12(24 - 23,96)^2 + 5(27 - 23,96)^2 + 9(22 - 23,96)^2 + 3(21 - 23,96)^2}{47 - 1}} =$$
$$\delta = \frac{1}{23,96} \cdot \sqrt{\frac{137,9152}{47 - 1}} \rightarrow \delta = 0,072$$

Una vez obtenida el coeficiente de variación, la resistencia característica puede ser calculada empleando la fórmula presentada anteriormente:

$$f_{ck} = f_{cm} \cdot (1 - 1,64 \cdot \delta) = 23,96 \cdot (1 - 1,64 \cdot 0,072) \rightarrow f_{ck} = 21,13 \text{ MPa}$$

5.3 Resistencia de cálculo

Conocida la resistencia característica del material, la resistencia de cálculo puede ser obtenida dividiendo dicho valor por el coeficiente de minoración de la resistencia del hormigón, que en este caso se considerará 1,50 suponiendo que los cálculos se realizan para una situación persistente en Estados Límite Últimos. Por otro lado, y considerando el caso más habitual en edificación, se considerará que el coeficiente de cansancio del hormigón es $\alpha_{cc}=1,00$. Por tanto.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1,00 \cdot \frac{21,13}{1,50} \rightarrow f_{cd} = 14,09 \text{ MPa}$$

En el enunciado se indica que la resistencia de cálculo considerada ha sido de 18 MPa, superior a la obtenida por cálculo, lo que indica que no se ha empleado un coeficiente de minoración de la resistencia del hormigón adecuado y, por tanto, el dimensionamiento estructural se ha realizado considerando un hormigón de mayor resistencia de la que verdaderamente tiene.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \rightarrow 18 = 1,00 \cdot \frac{21,13}{\gamma_c} \rightarrow \gamma_c = 1,17$$

Por cálculos, se puede demostrar que el Coeficiente de minoración de la resistencia del hormigón empleado ha sido de 1,17, por debajo de los valores que se deben considerar para el dimensionamiento frente a Estados Límite Últimos, independientemente de que la situación de cálculo haya sido permanente o accidental.

6 Cierre

La resistencia del hormigón es un factor determinante en la calidad y desempeño del material. Comprender la diferencia entre resistencia media, resistencia característica y resistencia de cálculo es fundamental para diseñar estructuras seguras y eficientes.

En este objeto de aprendizaje se ha podido ver de manera teórica cada uno de estos conceptos y, a partir de un caso práctico real, se ha demostrado el procedimiento para la estimación de cada uno de ellos.

Todo este objeto de aprendizaje aglutina conceptos fundamentales para conocer las características del material y abordar futuros cálculos como los relacionados con la validación de lotes o de dimensionamiento y cálculo estructural.

7 Bibliografía

7.1 Libros:

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:

AENOR, Asociación Española de Normalización. UNE-EN 12390-1:2022. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1. Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes. 2022.

AENOR, Asociación Española de Normalización. UNE-EN 12390-2:2020. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2. Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. 2020.

AENOR, Asociación Española de Normalización. UNE-EN 12390-3:2020. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3. Determinación de la resistencia a compresión de probetas. 2020.

AENOR, Asociación Española de Normalización. UNE-EN 12390-4:2020. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4. Resistencia a compresión. Características de la máquina de ensayo. 2020.

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