

## Influencia de diferentes parámetros tecnológico-ambientales en la evolución de la resistencia del hormigón, producido en la provincia de Valencia

### *Influence of different technological-environmental parameters on the evolution of resistance of concrete, produced in the province of Valencia*

J. Cánoves<sup>(\*)</sup>, V. Calvet<sup>(\*)</sup>, J. Benlloch<sup>(\*)</sup>, R. Díez<sup>(\*\*)</sup>

Recepción / *Received*: 10-IV-12  
Aceptación / *Accepted*: 20-VII-12  
Publicado online / *Online publishing*: 29-X-12

#### RESUMEN

En este artículo partiendo del análisis de la influencia de diferentes parámetros tecnológico-ambientales, como son el tipo de cemento, relación agua/cemento, temperatura inicial de curado, tiempo de conservación en obra, contenido de cemento, adiciones, aditivos y consistencia en la evolución de la resistencia a compresión del hormigón, se obtienen unas ecuaciones de cálculo y unas gráficas que estiman la evolución de la resistencia de los hormigones HA-25/B/20/IIa y HA-30/B/20/IIa de 3 a 28 días para cada intervalo de temperatura inicial de curado especificado y para toda la muestra de hormigón. Para ello se parte de 67.782 datos de resistencia a compresión de diferentes hormigones preparados de obra en la Provincia de Valencia durante los años 1996 a 2011, que ha permitido contrastar las ecuaciones obtenidas de la regresión con una base de datos significativa.

**Palabras clave:** hormigón; temperatura; influencia; resistencia.

#### ABSTRACT

*In this article on the basis of analysis of the influence of different technological-environmental parameters, such as the type of cement, water/cement ratio, initial curing temperature, time of conservation work, content of cement, additions, additives and consistency in the evolution of the concrete compressive strength, obtained a calculation equations and some graphs to estimate the resistance evolution of the concrete HA-25/B/20/IIa and HA-30/B/20/IIa from 3 to 28 days for each initial temperature curing interval specified and for the sample of concrete. So are based on 67782 data of different compressive strength of prepared concrete in the province of Valencia during the years 1996 to 2011, that has allowed to compare the equations obtained from regression with a significant database.*

**Keywords:** concrete; temperature; influence; strength.

---

<sup>(\*)</sup> Universidad Politécnica de Valencia (Valencia, España).

<sup>(\*\*)</sup> INIA. Ministerio de Economía y Competitividad (Madrid, España).

## 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los últimos años, en la Comunidad Valenciana y en España, el consumo de hormigón ha sido el más elevado de la historia (1). Al mismo tiempo, ha coincidido con el desarrollo de nuevas instrucciones que regulan el control del hormigón (2) y la evolución en las prestaciones del mismo.

En el año 1996 J. Benloch (3) demostró que los hormigones fabricados en condiciones normalizadas presentaban una evolución de la resistencia más rápida que los fabricados en años anteriores (4, 5). Es por ello que en la actualidad, debido al desarrollo de nuevos cementos y aditivos, la evolución de la resistencia del hormigón también ha sufrido una modificación sustancial.

La mayoría de investigaciones realizadas hasta la fecha sobre la evolución de la resistencia del hormigón se han llevado cabo en condiciones de laboratorio normalizadas o simulando las condiciones ambientales de la obra a lo largo del día y en las diferentes estaciones del año (6-9). Sin embargo, han sido escasas las investigaciones realizadas sobre el hormigón preparado de obra (10, 11). Por lo tanto, es necesario ampliar el conocimiento de la evolución de la resistencia del hormigón preparado de obra, puesto que las condiciones ambientales de la obra junto con las tecnológicas del hormigón son las que definen en mayor medida dicha evolución.

Los principales parámetros ambientales que definen las condiciones de obra son la temperatura, humedad relativa, radiación solar y la velocidad del viento. De todos ellos, la temperatura es el parámetro que presenta una mayor influencia en la evolución de la resistencia del hormigón, puesto que la microestructura del mismo se desarrolla de forma diferente a elevada que a baja temperatura. Las altas temperaturas producen una aceleración de la cinética de hidratación del hormigón a edades tempranas ya que aumenta la solubilidad del agua (Ley de Arrhenius) que da lugar a una mayor precipitación de los componentes del hormigón y al desarrollo más rápido de la microestructura; esta es más densa alrededor de los granos de cemento y más porosa y débil entre ellos, produciendo un retardo en el posterior proceso de hidratación. Sin embargo, a edades posteriores esta rápida hidratación produce una estructura más porosa en la matriz y un debilitamiento de la interfaz árido-pasta debido a la formación de cristales de etringita "Aft" paralelos o perpendiculares a la interfaz que dan lugar a una zona más débil y porosa donde las microfisuras pueden desarrollarse (12, 13). A bajas temperaturas la hidratación del hormigón es uniforme lo que produce una microestructura menos porosa y más homogénea. Por lo tanto, a edades tempranas la resistencia del hormigón será mayor a elevada temperatura, y por el contrario, a edades posteriores la resistencia a mayor temperatura será menor que a baja temperatura.

## 1. INTRODUCTION

*In recent years, concrete consumption in the Valencian Community and the rest of Spain has been at its highest in all its history (1). At the same time, it has coincided with the development of new instructions regulating the control of concrete (2) and how its features evolve.*

*In 1996, J. Benloch (3) demonstrated that concretes manufactured under normalised conditions presented quicker strength evolution than those produced earlier (4, 5). Nowadays, therefore, concrete strength has also considerably altered due to the development of new concretes and additives.*

*Most research works conducted to date on concrete strength evolution have been carried out under normalised laboratory conditions or by simulating environmental construction conditions during the day and in different seasons of the year (6 - 9). However, very few research works on prepared working site concrete are available (10, 11). Hence, it is necessary to extend knowledge about the strength evolution of working site concrete because environmental worksite conditions, along with concrete technologies, define this evolution to a greater extent.*

*The main environmental parameters defining construction conditions are temperature, relative humidity, solar radiation and wind speed. Of all these parameters, temperature has the greatest influence on concrete strength evolution as its microstructure is developed differently at high temperatures than at low ones. High temperatures accelerate young concrete hydration kinetics as they increase water solubility (Law of Arrhenius), leading to greater precipitation of concrete components and to quicker microstructure development; this microstructure is denser around cement grains, and is more porous and weaker among these grains, thus delaying the subsequent hydration process. Nevertheless at older concrete ages, rapid hydration produces a more porous structure in the matrix and a weakened aggregate-paste interface owing to the formation of "Aft" etringite crystals, either in parallel with or perpendicular to the interface, and which give way to a weaker, more porous zone where microfissures may form (12, 13). At low temperatures, concrete hydration is uniform, leading to a less porous and more homogeneous microstructure. Therefore at early concrete ages, concrete strength is greater the higher the temperature and, conversely, at older concrete ages concrete strength at higher temperatures will be lesser than at low temperatures.*

Las principales condiciones tecnológicas que definen la evolución de la resistencia del hormigón son el tipo de cemento, áridos, relación agua/cemento, contenido de cemento, adiciones y aditivos. Las propiedades de cada una de ellas y la combinación entre estas definen la resistencia del hormigón para una condición ambiental concreta. Por ejemplo, una elevada temperatura produce una mayor demanda de agua, lo que produce una reducción de la trabajabilidad si no se incrementa la relación agua/cemento o se añade un aditivo.

Con base en todo lo anterior, el objetivo de este trabajo es el cálculo de la evolución de la resistencia a compresión de los principales hormigones empleados durante los últimos años en la zona de Levante (Provincia de Valencia), a partir de los datos suministrados por diferentes empresas de control de calidad de resistencia a compresión de hormigón preparado de obra.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La base de datos de la investigación se compone de 67.782 datos de resistencia a compresión de hormigón preparado de obra, fabricado por diversas empresas en la Provincia de Valencia, obtenidos durante el periodo de tiempo de 1996 a 2011 en probetas cilíndricas de dimensiones de 15 x 30 cm agrupadas en 12.892 lotes en los que se registran resistencias a edades comprendidas entre los 3, 7, 28 y 60 días.

De todos ellos se seleccionan los dos hormigones más empleados a lo largo de los últimos años, y con estos se realiza un estudio estadístico sobre la influencia de los parámetros tecnológico-ambientales en la evolución de la resistencia a compresión del hormigón preparado de obra. También se calculan los valores característicos de la resistencia a compresión, a partir del estudio estadístico y las ecuaciones de la Instrucción de Hormigón Estructural de 2008 "EHE-08". Finalmente, se obtienen las ecuaciones y gráficas de cálculo de la evolución de la resistencia característica a compresión a diferentes intervalos de temperatura.

El estudio realizado muestra que el hormigón más empleado durante el periodo de tiempo de 2000 a 2011 es el tipificado por la Instrucción de Hormigón Estructural Española EHE-98 y EHE-08 art. 39.2 como HA-25/B/20/IIa (puesto que con anterioridad la normativa española no especificaba una tipificación), y seguidamente el más empleado durante el periodo de tiempo de 2006 a 2011 es el HA-30/B/20/IIa (p. ej. en la tipificación HA-25/B/20/IIa, las siglas HA es un indicativo del tipo de hormigón, en este caso HA es indicativo de un hormigón estructural en estructuras de hormigón armado; el número 25 indica la resistencia característica de proyecto a compresión en MPa, en este caso 25 MPa; la sigla B indica el tipo de consistencia (EHE-08

*The main technological conditions defining concrete strength evolution are cement type, aggregates, water/cement ratio, cement content, additions and additives. All their properties and their combinations define concrete strength for a specific environmental condition. For example, high temperatures mean greater water demand which, in turn, means reduced workability if the water/cement ratio does not increase or if an additive is added.*

*Based on all these facts, this work aims to calculate the compressive strength evolution of the main concretes employed in recent years in the Levante region (the province of Valencia, E. Spain) using the data supplied by various quality control firms monitoring the compressive strength of working site concretes.*

## 2. EXPERIMENTAL METHODOLOGY

*The research database used comprises 67782 data of the compressive strength of working site concretes produced by several firms in the province of Valencia. These data were obtained during the 1996-2011 period in cylinders (size 15 x 30 cm), which were grouped into 12892 lots in which strengths were recorded at concrete ages of 3, 7, 28 and 60 days.*

*Of them all, the two most widely used concretes in recent years were selected, and they were used to perform a statistical study on the influence of technological-environmental parameters on the strength evolution of working site concrete. Characteristic compressive strength values were also calculated using a statistical study and the equations in Spanish Structural Concrete Code "EHE-08" of 2008. Finally, equations and graphs to calculate characteristic compressive strength evolution at various temperature intervals were obtained.*

*The study performed reveals that the most widely employed concrete during the 2000-2011 period is that classified in Spanish Structural Concrete Codes EHE-98 and EHE-08, Art. 39.2, such as HA-25/B/20/IIa (previously, Spanish codes did not specify class), followed by the most widely used concrete during the 2006-2011 period such as HA-30/B/20/IIa. When classifying HA-25/B/20/IIa, HA indicates the concrete type which, in this case, is structural concrete in reinforced concrete structures; 25 indicates the characteristic projected compressive strength in MPa which, in this case, is 25 MPa; the letter B suggests consistency type (EHE-08, Art. 31.5), in this case, soft; 20 depicts maximum aggregate size in mm (EHE-08,*

art. 31.5), en este caso blanda; el número 20 indica el tamaño máximo del árido en mm (EHE-08 art. 28.3), en este caso 20 mm; y las siglas IIa designa el tipo de ambiente al que está expuesto el hormigón (EHE-08 art. 8.2.1, en este caso IIa indica un ambiente normal con humedad alta). De ambas tipologías de hormigones se obtienen 5.505 y 1.317 lotes, respectivamente.

Los ensayos de caracterización de las probetas empleadas en la muestra estadística para cada tipología de hormigón, se han realizado en el caso del proceso de fabricación y curado según las normativas UNE 83300:84, UNE 83301:91, UNE 83303:84 y UNE-EN 12390-2; y en el caso de ensayo a compresión según UNE 83304:84 y UNE-EN 1239-3, vigentes en cada periodo de tiempo del estudio.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 3.1. Significación de parámetros tecnológico-ambientales

Los parámetros tecnológico-ambientales contemplados en el estudio estadístico son los propios obtenidos de cada fabricante y laboratorio de control de calidad; estos son: tipo de cemento (Cem I y Cem II tipificados según Instrucción de Recepción de Cementos de 1997, 2003 y 2008), relación agua/cemento, temperatura media durante el periodo de conservación en obra, periodo de conservación en obra, contenido de cemento, adiciones (adiciones del cemento), aditivos y consistencia (referida al asentamiento, medido mediante el cono de Abrams, de acuerdo a UNE 83313:90 y UNE-EN 12350-2, vigentes en cada periodo de tiempo). No se ha incluido el tipo de árido como parámetro tecnológico-ambiental en el estudio estadístico, debido a que no se dispone de información alguna en las hojas de suministro del hormigón preparado de obra.

El análisis de cada variable de la muestra de hormigón preparado de obra, tanto de HA-25/B/20/IIa como de HA-30/B/20/IIa, se realiza mediante el método de Análisis de Varianza "ANOVA" con un nivel de confianza del 95%. Por lo tanto, una vez comprobado que las variables de cada muestra y sus niveles presentan varianzas similares y que se distribuyen normalmente, se realiza el ANOVA de cada variable en ambas muestras. El criterio seguido para la división en niveles de cada variable de ambas muestras está basado en la Instrucción de Hormigón Estructural de 2008 "EHE-08" (Tabla 1). Los resultados de la prueba de significación mediante el ANOVA realizado en ambas muestras son los siguientes (Tabla 2):

- La temperatura inicial de curado es el parámetro más influyente en la resistencia a compresión durante todas las edades. A los 3 días se muestra un comportamiento ascendente de la resistencia a compresión desde bajas

*Art. 28.3) which, in this case, is 20 mm; and IIa depicts the environmental type to which concrete is exposed (EHE-08, Art. 8.2.1) which, in this case, indicates a normal environment with high humidity. From both concrete types, 5505 and 1317 lots were respectively obtained.*

*The characterisation assays of the cylinders employed in the statistical sample for each concrete type were done for the manufacturing and curing process according to standards UNE 83300:84, UNE 83301:91, UNE 83303:84 and UNE-EN 12390-2; and according to standards UNE 83304:84 and UNE-EN 1239-3, in force during each study period, for the compression assay.*

### 3. EXPERIMENTAL RESULTS

#### 3.1. Significance of the technological-environmental parameters

*The technological-environmental parameters considered in the statistical study are those typically obtained in each manufacturer and quality control laboratory: cement type (Cem I and Cem II, classified according to the Spanish Structural Concrete Codes of 1997, 2003 y 2008), water/cement ratio, mean temperature during the conservation period during construction, cement content, additions (cement additions), additives and consistency (referring to settlement, measured by the Abrams cone test, according to UNE 83313:90 and UNE-EN 12350-2, in force during each study period). Aggregate type was not included as a technological-environmental parameter in the statistical study because no information was available in the supply forms for working site concretes.*

*The analysis done of each variable relating to the working site concrete sample of both HA-25/B/20/IIa and HA-30/B/20/IIa was done following the "ANOVA" analysis of variance method at a 95% confidence level. Therefore, having checked that the variables of each sample and their levels presented similar variances and showed normal distribution, an ANOVA was done of each variable in both samples. The criterion followed to divide each variable of both samples into levels was based on "EHE-08" of 2008 (Table 1). The results of the significance test done by ANOVA on both samples are as follows (Table 2):*

- *Initial curing temperature is the most influential parameter on compressive strength at all concrete ages. By day 3, an ascending performance of compressive strength is noted from low temperatures, reaching a*



temperaturas hasta alcanzar su máximo en el intervalo de  $30\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $35\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 39\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para el HA-25 y HA-30, respectivamente. A los 7 días la mayor resistencia en el HA-25 se produce a temperaturas medias como es el intervalo de 15 a 25  $^{\circ}\text{C}$ , mostrando una pendiente descendiente de la resistencia desde 15 a menos de 5  $^{\circ}\text{C}$  y de 25 a más de 39  $^{\circ}\text{C}$ , sin embargo, en el HA-30 las mayores resistencias se alcanzan en el rango de 30 a 39  $^{\circ}\text{C}$ , mientras que a menor temperatura la resistencia muestra valores menores pero similares en todos los intervalos. En cuanto a los 28 días de edad la resistencia a compresión muestra valores similares en el rango de temperaturas de 5 a 20  $^{\circ}\text{C}$ , descendiendo considerablemente a temperaturas superiores. Por último, a los 60 días la resistencia a compresión es mayor a bajas temperaturas menores a 15  $^{\circ}\text{C}$ , mostrando un comportamiento descendiente hasta alcanzar el mínimo a temperaturas de 35 a 39  $^{\circ}\text{C}$ .

- Los aditivos son un parámetro que influye en menor grado que la temperatura en la resistencia del hormigón. En el estudio realizado se muestra que los Superplastificantes producen una mayor resistencia en el hormigón que los plastificantes normales a cualquier edad. Sin embargo, en condiciones de altas temperaturas como es la estación de verano el empleo de la gran mayoría de aditivos comerciales no tienen capacidad para corregir las alteraciones evolutivas mecánico-resistentes que sufren los hormigones por efecto del curado a temperaturas superiores a la estándar.
- La consistencia también es un parámetro significativo en gran medida en la resistencia del hormigón. A cualquier edad del hormigón la consistencia de 6 a 7 cm es la que produce una mayor resistencia, en este tipo de hormigones con consistencia blanda. A medida que aumenta la consistencia se produce una disminución de la resistencia.
- El tipo de cemento tan solo influye a partir de los 28 días de edad, mostrando un comportamiento diferente en los dos tipos de hormigones, en el HA-25 el tipo II desarrolla mayores resistencias mientras que en el HA-30 se produce el fenómeno contrario. Este fenómeno puede deberse al mayor contenido de cemento de los HA-30.
- Las adiciones, al contrario que el tipo de cemento son significativas a edades tempranas, produciendo una mayor resistencia la adición de caliza frente a las cenizas volantes.
- La relación agua/cemento y el contenido de cemento son significativos en el HA-25 desde los 3 a 28 días y en el HA-30 desde los 7 a los 60 días. Esto puede ser debido a la mayor cantidad mínima de cemento en el hormigón HA-30 que produce una menor variabilidad en la muestra de dicha variable. La resistencia a compresión a cualquier edad es máxima cuando se emplea una relación agua/cemento menor a 0,40-0,50, y a medida que esta se incrementa la resistencia disminuye

*peak within the  $30\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $35\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 39\text{ }^{\circ}\text{C}$  interval for HA-25 and HA-30, respectively. By day 7, the greatest strength recorded in HA-25 is observed at mean temperatures such as the 15-25  $^{\circ}\text{C}$  interval, with a descending slope of strength from 15  $^{\circ}\text{C}$  to less than 5  $^{\circ}\text{C}$ , and from 25  $^{\circ}\text{C}$  to more than 39  $^{\circ}\text{C}$ ; nevertheless for HA-30, the greatest strengths fall in the 30-39  $^{\circ}\text{C}$  range, while at lower temperatures, strength presents smaller, although similar, values in all the intervals. At 28 days concrete age, compressive strength presents similar values in the 5-20  $^{\circ}\text{C}$  temperature range, and substantially lowers with higher temperatures. Finally at an age of 60 days, compressive strength is greater at temperatures under 15  $^{\circ}\text{C}$ , offering a descending trend reaching a minimum at 35-39  $^{\circ}\text{C}$ .*

- *Additives are a parameter that influences concrete strength to a lesser extent than temperature. In the present study, it is seen how Superplasticisers bring about greater concrete strength than normal plasticisers at any concrete age. Yet at high temperatures, as in summer, the vast majority of commercial additives are not capable of correcting mechanical-resistant evolutionary alterations which concretes undergo given the curing effect at higher than usual temperatures.*
- *Consistency is another significant parameter as regards concrete strength to a large extent. At any concrete age, a consistency of 6-7 cm produces greater strength in this concrete type with a soft consistency. The greater the consistency, the lesser the strength.*
- *Cement type only influences from a concrete age of 28 days, and reveals a different performance in both concrete types by type II HA-25 developing greater strengths, while HA-30 presents the opposite phenomenon. This phenomenon may be due to the higher cement content of the HA-30 types.*
- *Additions, unlike cement type, prove significant at early concrete ages, and the addition of limestone produces greater strength as opposed to fly ash.*
- *The water/cement ratio and cement content are significant for HA-25 as from 3 to 28 days and for HA-30 as of 7-60 days. This may be due to a greater minimum quantity of cement in concrete HA-30 which leads to lower variability in the sample of this variable. Compressive strength at any age peaks when a water/cement ratio below 0.40/0.50 is employed, and as this increases, strength drops substantially. As regards cement content, for HA-25, we can see that maximum*

considerablemente. En cuanto al contenido de cemento se muestra en el caso del HA-25 que la resistencia a compresión máxima se alcanza mediante en el intervalo de contenido de cemento de 330 a 395 kg/m<sup>3</sup>. Por el contrario, si este disminuye la resistencia también disminuye. En el HA-30 el intervalo de contenido de cemento de 360 a 425 kg/m<sup>3</sup> es el que produce una mayor resistencia.

- El tiempo de conservación de las probetas de hormigón en obra es significativo hasta los 28 días. La conservación en obra mayor a 24 horas produce una disminución de la resistencia del hormigón a todas las edades. En el caso del HA-30 los resultados son contradictorios al caso del HA-25, esto puede ser debido a la falta de representatividad de los datos de resistencias a 48 horas del HA-30.

*compressive strength is reached by the 330-395 kg/m<sup>3</sup> cement content interval. Conversely if this lowers, strength also drops. For HA-30, the 360-425 kg/m<sup>3</sup> cement content interval produces greater strength.*

- *The conservation time of the cylinders with working site concrete is significant up to 28 days. A conservation time over 24 h reduces concrete strength at all the concrete ages. For HA-30, the results are contradictory to those for HA-25, which may be due to lack of the representativeness of the strength data taken at 48 h for HA-30.*

Tabla 1 / Table 1  
Niveles de cada variable de las muestras de hormigón HA-25/B/20/IIa y HA-30/B20/IIa.  
*Levels of each variable of the HA-25/B/20/IIa and HA-30/B20/IIa concrete samples.*

Nivel / Level	Tipo Cem / Type Cem.	A/C / W/C	Temperatura / Temperature	Tiempo Cons. / Preser. Time	Cont. Cem / Cem. Cont.	Adición / Addition	Aditivo / Admixture	Asentamiento / Slump
1	I	<0.45	<5° C	24 h.	250-280 kg	Caliza / Limestone	Plastificante / Plastizicer	5 cm
2	II	0.45-0.50	5-10 °C	48 h.	280-300 kg	Ceniza Vol. / Fly ash	Superplastificante / Superplasticizer	6 cm
3		0.50-0.55	10-15 °C		300-330 kg			7 cm
4		0.55-0.60	15-20 °C		330-360 kg			8 cm
5		0.60-0.65	20-25 °C		360-395 kg			9 cm
6			25-30 °C		395-425 kg			10 cm
7			30-35 °C					11 cm
8			35-39 °C					12 cm
9								13 cm
10								14 cm

Tabla 2 / Table 2  
Significación de los diferentes parámetros en la evolución de la resistencia a compresión del hormigón (sombreado es igual a significativo).  
*Significance of the various parameters on concrete compressive strength evolution (shaded areas equal significant).*

Parámetros / Parameters	HA-25				HA-30			
	3 días / days	7 días / days	28 días / days	60 días / days	3 días / days	7 días / days	28 días / days	60 días / days
Tipo cemento / Type cement								
Agua/Cemento / Water/Cement								
Temperatura inicial / Initial temperature								
Tiempo de conservación / Preserv. time								
Contenido de cemento / Cement content								
Adiciones / Addition								
Aditivos / Admixture								
Asentamiento / Slump								

### 3.2. Cálculo de la resistencia característica

A la edad de 7 y 28 días se puede estimar que todos los parámetros anteriormente analizados son significativos; sin embargo, puesto que la temperatura inicial de curado es el único parámetro significativo a la edad de 3, 7, 28 y 60 días, se puede afirmar estadísticamente con un nivel de confianza del 95% que la temperatura inicial de curado es el parámetro más significativo en la evolución de la resistencia del hormigón HA-25/B/20/IIa y HA-30/B/20/IIa. Por lo tanto, el cálculo de la evolución de la resistencia característica a compresión de ambos hormigones se realiza para cada intervalo de temperatura (Tabla 1) y para todo el conjunto de cada muestra de hormigón.

Para la obtención de la evolución de la resistencia característica a partir de la resistencia media a compresión se han analizado dos métodos diferentes:

- El primer método se basa en escoger solo los lotes que se encuentren formados por probetas con datos de resistencia a 3, 7 y 28 días y regresar estos datos. Este método reduce en gran medida los datos que componen cada muestra de hormigón, pasando en el caso de todo el conjunto de la muestra de HA-25 de 5.505 a 972 lotes y en el HA-30 de 1.317 a 329 lotes, reduciendo también la representatividad de cada muestra de hormigón.
- El segundo método se basa en la obtención de la resistencia media a cada edad del hormigón (3, 7 y 28 días) y posteriormente regresar los tres datos. Con este método se consigue mantener la representatividad de la muestra y no discriminar ningún dato.

La comprobación de la fiabilidad de predicción de los dos métodos se realiza mediante la comparación entre el valor obtenido por la regresión y el valor real de la muestra de cada método (Tabla 3).

### 3.2. Calculating characteristic strength

*At concrete age 7-28 days, it can be estimated that all the previously analysed parameters are significant; nevertheless, as the initial curing temperature is the only significant parameter at the ages of 3, 7, 28 and 60 days, it can be statistically confirmed with a 95% confidence level that the initial curing temperature is the most significant parameter in the strength evolution of concretes HA-25/B/20/IIa and HA-30/B/20/IIa. Therefore, both concretes' characteristic compressive strength evolutions are calculated for each temperature interval (Table 1) and for each concrete sample series.*

*In order to achieve the evolution of characteristic strength from the mean compressive strength, two different methods can be followed:*

- *The first method is based on selecting only those lots formed by cylinders with strength data on days 3, 7 and 28 and on regressing these data. This method greatly reduces the data making up each concrete sample: thus, the whole series of sample HA-25 went from 5505 to 972 lots, and from 1317 to 329 lots for sample HA-30, and the representativeness of each concrete sample also diminished.*
- *The second method is based on obtaining the mean strength at each concrete age (3, 7 and 28 days) and on subsequently regressing the three data. This method helps maintain sample representativeness and does not discriminate any datum.*

*The prediction validity of both these methods is verified by comparing the value obtained by regressing and each method's real sample value (Table 3).*

Tabla 3 / Table 3  
 Comparación de base de datos para el cálculo de la resistencia característica (en MPa).  
*Comparison of the database to calculate characteristic strength (in MPa).*

Método / Method	f <sub>cm</sub>	HA-25/B/20/IIa			HA-30/B/20/IIa		
		Regresión / Regression (1)	Real muestra / Sample Real (2)	(1) / (2)	Regresión / Regression (1)	Real muestra / Sample Real (2)	(1) / (2)
1	3 días / days	23.65	23.34	1.01	29.35	29.35	0.94
	7 días / days	27.07	27.58	0.98	33.40	33.40	0.98
	28 días / days	32.67	32.48	1.005	37.57	37.57	1.006
2	3 días / days	23.25	23.26	0.99	29.29	29.24	1.00
	7 días / days	26.99	26.92	1.00	32.93	33.03	0.99
	28 días / days	32.98	32.98	1.00	38.89	38.859	1.00

Al comparar las columnas (1)/(2) de ambos métodos, por ejemplo; la resistencia media a compresión "f<sub>cm</sub>" del HA-30 mediante el primer método resulta con un ajuste de 0,94, 0,98 y 1,006 frente al segundo método que ajusta 1,0, 0,99 y 1,00, se observa que el segundo método predice con mayor fiabilidad que el primero. Por lo tanto, el cálculo de la evolución de la resistencia característica a compresión "f<sub>ck</sub>" de ambos hormigones de 3 a 28 días se realiza mediante el segundo método.

Una vez seleccionado el método o procedimiento mediante el cual se van a realizar las regresiones que calculan la evolución de la resistencia a compresión del hormigón de 3 a 28 días; se calcula, a partir de los datos de resistencia media a compresión "f<sub>cm</sub>" a cada edad y temperatura (Tabla 4) y mediante la ecuación 1 definida por la EHE-08 Art. 86.7.3.1, la resistencia característica de la misma "f<sub>ck</sub>" (Tabla 5).

En este paso y puesto que en algunos intervalos de temperatura la varianza es muy grande debido a la escasez de datos se ha procedido a homogeneizar estos intervalos con las desviaciones típicas de toda la muestra de hormigón. Estos intervalos son: en el HA-25 el intervalo de temperatura de 30-35 °C, el cual disponía de una desviación típica "σ" de 4,91, 4,53 y 4,62 a 3, 7 y 28 días, respectivamente. Esta se ha substituido por la de toda la muestra de HA-25

When comparing the columns (1)/(2) of both methods, for instance, for the mean "f<sub>cm</sub>" compressive strength of HA-30, by following the first method results in adjustments of 0.94, 0.98 and 1.006 as opposed to the second method, which offers adjustments of 1.0, 0.99 and 1.00. Moreover, the second method predicts more reliably than the first method. Thus, calculating the characteristic compressive "f<sub>ck</sub>" strength evolution of both concrete types from 3 to 28 days is done by using the second method.

Having selected the method or procedure by which the regressions to calculate evolution to concrete compressive strength are to be carried out from days 3 to 28, calculations can be done using the following data: the mean "f<sub>cm</sub>" compressive strength at each age and temperature (Table 4) and, by using Equation 1 defined by EHE-08, Art. 86.7.3.1, the characteristic "f<sub>ck</sub>" strength (Table 5).

In this step, and since variance is very large in some temperature intervals due to lack of data, these intervals are homogenised with the standard deviations of the whole concrete sample. These intervals are: for HA-25, the 30-35 °C temperature interval, which presents a "σ" standard deviation of 4.91, 4.53 and 4.62 at 3, 7 and 28 days, respectively. This is substituted for that of the whole HA-25 sample with 4.23, 4.33 and 4.84, thus obtaining

Tabla 4 / Table 4

Resistencia media a compresión (en MPa) de toda la muestra y cada intervalo de temperatura inicial de curado del HA-25 y HA-30.  
Mean compressive strength (in MPa) of the whole sample and each initial curing temperature interval of HA-25 and HA-30.

Tipo hormigón / Concrete Type	Edad (días) / Age (days)	Toda la muestra / All Sample	Intervalos de temperatura inicial de curado en °C / Intervals of initial temperature of curing in °C						
			5<T≤10	10<T≤15	15<T≤20	20<T≤25	25<T≤30	30<T≤35	35<T≤39
HA-25	3	23.26	22.61	22.17	22.92	23.79	23.41	24.38	
	7	26.92	25.71	26.33	26.91	26.87	26.37	25.65	
	28	32.98	33.13	32.79	33.22	32.17	30.99	30.87	
HA-30	3	29.24		26.86	28.52	29.43	29.74	30.07	33.70
	7	33.03		33.23	32.91	33.02	32.39	34.49	34.94
	28	38.859		40.98	39.95	38.43	36.68	36.40	37.41

Tabla 5 / Table 5

Resistencia característica a compresión (en MPa) de toda la muestra y cada intervalo de temperatura del hormigón HA-25 y HA-30.  
Characteristic compressive strength (in MPa) of the whole sample and each temperature interval of concretes HA-25 and HA-30.

Tipo hormigón / Concrete Type	Edad (días) / Age (days)	Toda la muestra / All Sample	Intervalos de temperatura inicial de curado en °C. / Intervals of initial temperature of curing in °C.						
			5<T≤10	10<T≤15	15<T≤20	20<T≤25	25<T≤30	30<T≤35	35<T≤39
HA-25	3	16.30	15.74	16.22	16.38	16.35	16.52	17.42	
	7	19.79	18.26	19.57	20.37	19.96	19.61	18.52	
	28	25.01	25.38	25.06	25.73	25.02	24.67	22.90	
HA-30	3	21.78		19.41	21.25	21.60	22.86	22.63	26.25
	7	25.31		25.52	25.24	25.70	25.13	26.77	27.23
	28	29.52		31.65	30.62	30.60	28.78	27.66	28.08



de 4,23, 4,33 y 4,84, obteniéndose así unos valores representativos de esa variable de la muestra. En la muestra de HA-30 se han homogeneizado los intervalos 10-15 °C y 35-39 °C, cuyas desviaciones típicas eran de 3,44, 5,03 y 6,41 para el intervalo 10-15 °C, y de 15,69, 9,02 y 7,77 para el intervalo 35-39 °C. Estos se han substituido por 4,53, 4,68 y 5,67 para 3, 7 y 28 días [1].

*representative values of this sample variable. For the HA-30 sample, the 10-15 °C and 35-39 °C intervals are homogenised, whose standard deviations are 3.44, 5.03 and 6.41 for the 10-15 °C interval, and 15.69, 9.02 and 7.77 for the 35-39 °C interval. These are replaced with 4.53, 4.68 and 5.67 for days 3, 7 and 28, respectively [1].*

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,645 \cdot \sigma \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad [1]$$

### 3.3. Evolución de la resistencia característica a compresión

Con los valores de la Tabla 5 se obtiene el porcentaje de resistencia característica a compresión a 3, 7 y 28 días para toda la muestra y cada intervalo de temperatura respecto de la resistencia especificada de 25,0 y 30,0 MPa para el hormigón HA-25/B/20/IIa y HA-30/B/20/IIa, respectivamente (Tabla 6).

### 3.3. Characteristic compressive strength evolution

*With the values in Table 5, the percentage of characteristic compressive strength can be obtained on days 3, 7 and 28 for the whole sample and for each temperature interval in relation to the strength specified at 25.0 and 30.0 MPa for concretes HA-25/B/20/IIa and HA-30/B/20/IIa, respectively (Table 6).*

Tabla 6 / Table 6  
 Evolución de la resistencia característica a compresión (en %) de toda la muestra y cada intervalo de temperatura del hormigón HA-25 y HA-30.  
*Characteristic compressive strength evolution (as a %) of the whole sample and for each temperature interval of concrete types HA-25 and HA-30.*

Tipo hormigón / Concrete Type	Edad (días) / Age (days)	Toda la muestra / All Sample	Intervalos de temperatura inicial de curado en °C Intervals of initial temperature of curing in °C						
			5<T≤10	10<T≤15	15<T≤20	20<T≤25	25<T≤30	30<T≤35	35<T≤39
HA-25	3	65.0	62.9	64.9	65.5	65.4	66.1	69.7	
	7	79.0	73.0	78.0	81.0	80.0	78.0	74.0	
	28	100.0	101.0	100.0	103.0	100.0	99.0	92.0	
HA-30	3	74.0		66.0	72.0	73.0	77.0	77.0	89.0
	7	86.0		86.0	86.0	87.0	85.0	91.0	92.0
	28	100.0		107.0	104.0	104.0	97.0	94.0	95.0

En ambos hormigones se observa que el intervalo de temperatura entre 20-25 °C es el límite a partir del cual mayores temperaturas producen resistencias menores a la especificada a la edad de 28 días.

*In both concretes, we can see that the 20-25 °C temperature interval is the limit from which higher temperatures produce lower strengths to that specified at the age of 28 days.*

La resistencia característica de toda la muestra de hormigón HA-30 a 28 días de valor 29,52 MPa es inferior a la especificada; sin embargo, el cálculo del porcentaje de evolución de toda la muestra y de cada intervalo se ha realizado respecto a la resistencia especificada de cada hormigón, puesto que la desviación típica de esta variable de valor 5,67 es mayor a la fijada por la EHE-08 (Anejo N° 19 5.1) de valor 4,2. Por lo tanto, nos encontramos del lado de la seguridad, ya que si se calcula la resistencia característica con la desviación típica la EHE-08 obtenemos una  $f_{ck}$  de 31,95 MPa, valor un 8% mayor al empleado en la presente investigación.

*The characteristic strength of the whole HA-30 concrete sample on day 28 with a value of 29.52 MPa is lower than that specified; nevertheless, calculating the percentage of evolution of the whole sample and of each interval is done for the strength specified for each concrete type as the standard deviation of this variable is 5.67, which is higher than that fixed by EHE-08 (Annexe No. 19 5.1), valued at 4.2. Therefore, we are on the safety side because if we calculate characteristic strength with the EHE-08 standard deviation value, we obtain a  $f_{ck}$  of 31.95 MPa, a value that is 8% higher than that employed in this research work.*

Con los resultados del porcentaje de evolución de resistencia característica obtenidos en la Tabla 6 para toda la

*With the characteristic strength evolution percentage results obtained in Table 6 for the whole concrete*

muestra de hormigón y cada intervalo de temperatura se realiza el cálculo de la evolución de la resistencia característica a compresión mediante el método de la regresión, siendo en todos los casos la regresión logarítmica la que produce un mayor ajuste menos en el caso del HA-30 en el intervalo de temperatura de 30 a 35 °C, donde la regresión Inversa de X (% de  $f_{ck}$  a 28 días =  $0,974054 - (0,59027/ \text{días})$ ) es la que produce un ajuste de 92,31% superior al 54,70% de la regresión logarítmica. En la Tabla 7 se recogen las ecuaciones de cálculo de la evolución de la resistencia característica a compresión de 3 a 28 días del hormigón HA-25 para toda la muestra de hormigón y para cada intervalo de temperatura, derivadas de las regresiones que presentan un mayor ajuste. Del mismo modo, y para una mayor facilidad de uso de estos resultados en las Figuras 1 y 2 se muestran las gráficas de evolución de resistencia característica a compresión de 3 a 28 días para el HA-25.

sample and for each temperature interval, characteristic compressive strength evolution calculations can be done following the regression method. In all cases, the logarithmic regression leads to a greater adjustment, except for HA-30 with the 30-35 °C temperature interval, where the inverse regression of X (% of  $f_{ck}$  at 28 days =  $0.974054 - (0.59027/ \text{days})$ ) permits a 92.31% adjustment, which is higher than 54.70% in the logarithmic regression. Table 7 offers the equations to calculate characteristic compressive strength evolution from 3 to 28 days of concrete type HA-25 for the whole concrete sample and for each temperature interval derived from the regressions offering the best adjustment. Likewise, and to facilitate the use of these results, Figures 1 and 2 depict the graphs showing characteristic compressive strength evolution from days 3 to 28 for HA-25.

Tabla 7 / Table 7

Ecuaciones de cálculo de la evolución de la resistencia característica a compresión del HA-25 para toda la muestra de hormigón y para cada intervalo de temperatura (t días ≥ 3 días).

Equations to calculate characteristic compressive strength evolution of HA-25 for the whole concrete sample and for each temperature interval (t days ≥ 3 days).

Datos a regresar / Regression data	R <sup>2</sup>	Ecuación de cálculo / Calculation equation
Toda la muestra / All sample	99.94	% de $f_{ck}$ a 28 días / % to $f_{ck}$ at 28 days = $0.481345 + 0.156187 \cdot \ln(\text{días})$
Intervalo / Interval 5<T≤10°C	96.81	% de $f_{ck}$ a 28 días / % to $f_{ck}$ at 28 days = $0.420555 + 0.173653 \cdot \ln(\text{días})$
Intervalo / Interval 10<T≤15 °C	99.99	% de $f_{ck}$ a 28 días / % to $f_{ck}$ at 28 days = $0.475318 + 0.157298 \cdot \ln(\text{días})$
Intervalo / Interval 15<T≤20 °C	99.70	% de $f_{ck}$ a 28 días / % to $f_{ck}$ at 28 days = $0.476716 + 0.16699 \cdot \ln(\text{días})$
Intervalo / Interval 20<T≤25 °C	99.52	% de $f_{ck}$ a 28 días / % to $f_{ck}$ at 28 days = $0.490947 + 0.153865 \cdot \ln(\text{días})$
Intervalo / Interval 25<T≤30 °C	99.92	% de $f_{ck}$ a 28 días / % to $f_{ck}$ at 28 days = $0.496372 + 0.147706 \cdot \ln(\text{días})$
Intervalo / Interval 30<T≤35 °C	91.91	% de $f_{ck}$ a 28 días / % to $f_{ck}$ at 28 days = $0.567204 + 0.102778 \cdot \ln(\text{días})$

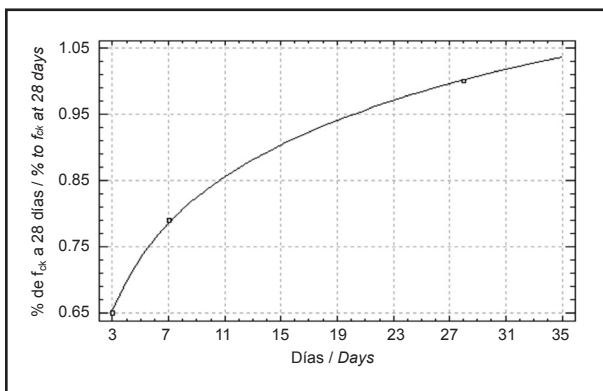


Figura 1. Evolución de la resistencia característica a compresión del hormigón HA-25.  
Figure 1. Characteristic compressive strength evolution of concrete type HA-25.

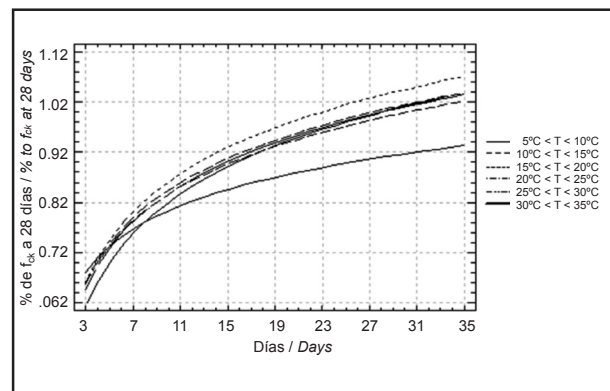


Figura 2. Evolución de la resistencia característica a compresión para cada intervalo de temperatura de curado inicial del hormigón HA-25.  
Figure 2. Characteristic compressive strength evolution for each initial curing temperature interval of concrete type HA-25.

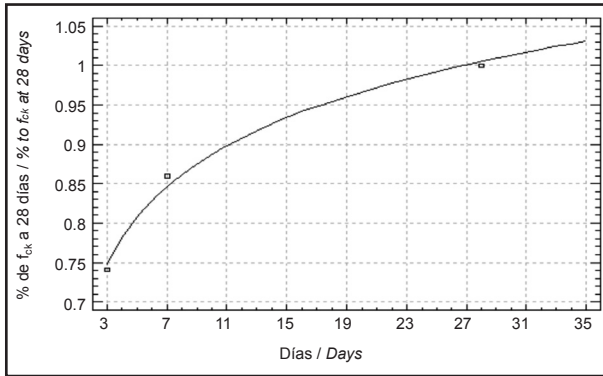


Figura 3. Evolución de la resistencia característica a compresión del hormigón HA-30.  
*Figure 3. Characteristic compressive strength evolution of concrete type HA-30.*

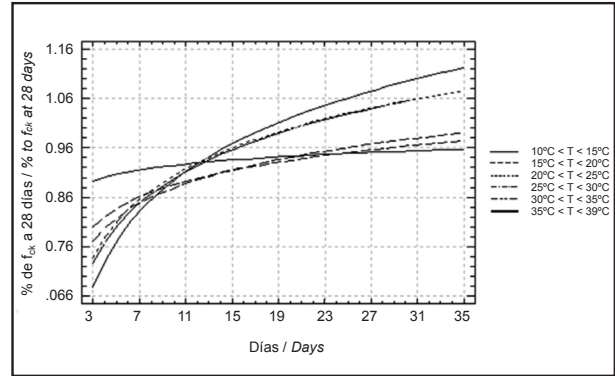


Figura 4. Evolución de la resistencia característica a compresión para cada intervalo de temperatura de curado inicial del hormigón HA-30.  
*Figure 4. Characteristic compressive strength evolution for each initial curing temperature interval of concrete type HA-30.*

En la Tabla 8 se recogen las ecuaciones de cálculo de la evolución de la resistencia característica a compresión de 3 a 28 días del hormigón HA-30 para toda la muestra de hormigón y para cada intervalo de temperatura. Las Figuras 3 y 4 muestran de un modo gráfico los valores de las ecuaciones de la Tabla 8.

*Table 8 provides the equations to calculate characteristic compressive strength evolution from days 3 to 28 of concrete type HA-30 for the whole sample and for each temperature interval. Figures 3 and 4 graphically illustrate the values of the equations presented in Table 8.*

Tabla 8 / Table 8

Ecuaciones de cálculo de la evolución de la resistencia característica a compresión del HA-30 para toda la muestra de hormigón y para cada intervalo de temperatura ( $t$  días  $\geq 3$  días).  
*Equations to calculate characteristic compressive strength evolution of HA-30 for the whole concrete sample and for each temperature interval ( $t$  days  $\geq 3$  days).*

Datos a regresar / Regression data	R2	Ecuación de cálculo / Calculation equation
Toda la muestra / All sample	98.23	% de $f_{ck}$ a 28 días / % to $f_{ck}$ at 28 days $= 0.62245 + 0.114894 \cdot \ln(\text{días})$
Intervalo/ Interval 10<T≤15 °C	96.92	% de $f_{ck}$ a 28 días / % to $f_{ck}$ at 28 days $= 0.479839 + 0.180419 \cdot \ln(\text{días})$
Intervalo/ Interval 15<T≤20 °C	99.12	% de $f_{ck}$ a 28 días / % to $f_{ck}$ at 28 days $= 0.571603 + 0.141952 \cdot \ln(\text{días})$
Intervalo/ Interval 20<T≤25 °C	98.63	% de $f_{ck}$ a 28 días / % to $f_{ck}$ at 28 days $= 0.588356 + 0.137207 \cdot \ln(\text{días})$
Intervalo/ Interval 25<T≤30 °C	99.89	% de $f_{ck}$ a 28 días / % to $f_{ck}$ at 28 days $= 0.673626 + 0.08925 \cdot \ln(\text{días})$
Intervalo/ Interval 30<T≤35 °C	54.70	% de $f_{ck}$ a 28 días / % to $f_{ck}$ at 28 days $= 0.722895 + 0.0707754 \cdot \ln(\text{días})$
Intervalo/ Interval 35<T≤39 °C	96.19	% de $f_{ck}$ a 28 días / % to $f_{ck}$ at 28 days $= 0.863989 + 0.0263511 \cdot \ln(\text{días})$

### 3.4. Comparación con otras investigaciones

Si se comparan los resultados obtenidos en esta investigación con los de otras investigaciones realizadas antes del año 2000 (año inicial de la base de datos del estudio), se observa que los hormigones empleados en la actualidad desarrollan una mayor resistencia a compresión y una evolución de la resistencia más rápida. En la Tabla 9 se muestran los valores obtenidos en laboratorio, por (4)

### 3.4. Comparisons made with other research works

*When comparing the results obtained in the present work with those reported in research works conducted before the year 2000 (the initial year in the database used in our study), we can observe that the concrete types employed nowadays develop greater compressive strength and quicker strength evolution. Table 9 shows the values obtained in the laboratory by (4) for the concrete manufactured*

para el hormigón fabricado con tipo de cemento P-450 ARI, por (3) para el caso de los hormigones HA-25 y HA-30, y los resultados obtenidos en el apart. 3.2 de la presente investigación. La resistencia media a 28 días obtenida en este trabajo, para el caso del HA-25 y HA-30, es un 9% y 4% mayor a la obtenida por (3), respectivamente. La evolución de la resistencia media a compresión a cada temperatura es más rápida en los hormigones actuales que en (4).

En la Tabla 10 se comparan los resultados obtenidos en este trabajo con las investigaciones (6, 10), que emplean hormigones actuales. Al comparar con (6) se observa que la resistencia media a compresión en las diferentes condiciones ambientales es menor a la obtenida en este trabajo, sin embargo, la evolución de la resistencia media a compresión es similar. En (10) estudia la resistencia a compresión del hormigón preparado de obra HA-25/B/20/IIa en la Comunidad de Madrid, este presenta una resistencia menor y una evolución de la resistencia a compresión más lenta que en la Zona de Levante.

with cement type P-450 ARI, by (3) for concrete types HA-25 and HA-30, and the results obtained in Section 3.2 of the present research work. The mean strength for HA-25 and HA-30 at 28 days obtained in our work is 9% and 4% higher than that obtained by (3), respectively. Mean compressive strength evolution at each temperature is quicker in today's concretes than in (4).

Table 10 compares the results obtained in this work with research works (6, 10), which employed present-day concretes. When compared with (6), we can see that the mean compressive strength under different environmental conditions is lower to that obtained in the present study, although mean compressive strength evolution is similar. In (10), the authors studied the compressive strength of a prepared worksite concrete HA-25/B/20/IIa produced in the Community of Madrid (central Spain), which presents lower strength and slower compressive strength evolution than that produced in the Levante region.

Tabla 9 / Table 9

Resultados de la resistencia media y evolución de la resistencia a compresión (MPa) obtenidos por (4, 3) y en la investigación actual (%).

Results of mean strength and compressive strength evolution (MPa) obtained by (4, 3) and the present research work (%).

Edad / Age	(4) %.				(3) MPa.		Investigación actual / Current research			
	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	HA-25	HA-30	5-10 °C	10-15 °C	15-20 °C	20-25 °C
3	51.0	53.0	55.0	60.0			70.0	69.0	71.0	74.0
7	63.0	70.0	75.0	80.0			80.0	82.0	84.0	84.0
28	86.0	92.0	98.0	100.0	30.25	38.44	103.0	102.0	103.0	100.0

Tabla 10 / Table 10

Resultados de la resistencia media a compresión (MPa) obtenidos por (6) y (10).

Results of mean compressive strength obtained (MPa) by (6) and (10).

Edad / Age	Serie 1 (6)			Serie 4 (6)						Serie 5 (6)			HA-25 (10)
	4 °C (P)	20 °C (P)	36 °C (P)	4 °C (P)	20 °C (P)	36 °C (P)	4 °C (V)	20 °C (V)	36 °C (V)	20 °C (P)	36 °C (P)	36 °C (V)	
3	17.1	19.3	19.3							22.0	19.4	23.2	
7	24.4	24.5	21.5	24.6	24.7	21.7	28.0	24.5	23.4	25.1	20.3	24.0	21.8
28	30.4	28.7	24.1	30.6	29.0	23.9	31.3	30.8	25.8	29.2	24.5	26.6	28.95

(P): Probetas compactadas mediante picado con barra. (V): Probetas compactadas mediante vibrador / (P) Compacted samples through tamping rod. (V) Compacted samples through vibrator.

#### 4. CONCLUSIONES

El presente estudio sobre la evolución de la resistencia a compresión del hormigón HA-25/B/20/IIa y HA-30/B/20/IIa prueba estadísticamente, con un nivel de confianza del 95%, las siguientes conclusiones:

- I. La temperatura inicial de curado del hormigón es el parámetro más significativo en la adquisición y evolución de la resistencia.

#### 4. CONCLUSIONS

The present study into compressive strength evolution of concrete types HA-25/B/20/IIa and HA-30/B/20/IIa statistically proves, with a 95% confidence level, the following conclusions:

- I. The initial curing temperature of concrete is the most significant to acquire strength and for its evolution.



- II. En ambos hormigones, se observa a la edad de 3 días que la resistencia se incrementa considerablemente a medida que aumenta la temperatura inicial de curado, de modo que en el HA-25 se produce un incremento de 6,8% del intervalo 5-10 °C al intervalo 30-35 °C, y en el HA-30 de 23% de 10-15 °C a 35-39 °C. A edades intermedias de 7 días el intervalo de temperatura de 15-25 °C es el que desarrolla mayores resistencias. Sin embargo, a 28 días la temperatura que desarrolla una mayor resistencia es el intervalo de 10-20 °C.
  - III. El HA-30/B/20/IIa desarrolla una evolución de la resistencia a compresión más rápida que el HA-25/B/20/IIa.
  - IV. La temperatura de curado superior a 25 °C produce una resistencia a compresión a 28 días menor a la especificada en proyecto.
  - V. Las ecuaciones y gráficas desarrolladas en esta investigación predicen correctamente la evolución de 3 a 28 días de la resistencia a compresión del hormigón HA-25/B/20/IIa y HA-30/B/20/IIa para cada intervalo de temperatura y para toda la muestra, con un nivel de confianza del 95%.
  - VI. Los hormigones actuales poseen una mayor resistencia a compresión y una evolución de dicha resistencia más rápida que los hormigones más viejos (anteriores al año 2000).
  - VII. Los hormigones empleados en la Zona de Levante poseen una resistencia a compresión mayor que los fabricados en la Comunidad de Madrid. Esto puede ser debido al tipo de cemento empleado, ya que en (6) y (10) se dosifica el hormigón con cemento a base de adición de cenizas volantes (CEM II/A-V), mientras que los datos mayoritarios de este estudio han sido dosificados con cemento a base de adición caliza (CEM II/A-L). Puesto que como se ha probado estadísticamente con un nivel de confianza del 95%, en el apart. 3.1 del presente estudio los cementos con adición caliza desarrollan mayor resistencia y evolucionan más rápidamente que los cementos a base de adición de cenizas volantes.
- II. *In both concrete samples, strength substantially increases at a concrete age of 3 days the higher the initial curing temperature becomes, and to such an extent that a 6.8% increase in HA-25 takes place from the 5-10 °C interval to the 30-35 °C interval, and a 23% increase occurs in HA-30 from 10-15 °C to 35-39 °C. Greater strengths develop at the intermediate concrete age of 7 days with the 15-25 °C temperature interval. Nevertheless at 28 days, greater strength develops at a temperature in the 10-20 °C interval.*
  - III. *HHA-30/B/20/IIa develops compressive strength evolution more quickly than HA-25/B/20/IIa.*
  - IV. *A curing temperature over 25 °C produces lower compressive strength at 28 days than that specified in the project.*
  - V. *The equations and graphs developed in this research work correctly predict the compressive strength evolution of concrete types HA-25/B/20/IIa and HA-30/B/20/IIa from 3 to 28 days for each temperature interval and for the whole sample with a 95% confidence level.*
  - VI. *Present-day concretes offer greater compressive strength and a quicker evolution of this strength than older concrete types (prior to the year 2000).*
  - VII. *The concretes employed in the Levante region offer greater compressive strength than those manufactured in the Community of Madrid. This may be due to the concrete type utilized as (6) and (10) dosed concrete with cement by adding fly ash (CEM II/A-V), while the majority data of this study indicate limestone addition (CEM II/A-L). Therefore as statistically proven with a 95% confidence level in Section 3.1 of the present study, the cements to which limestone is added develop greater strength and evolve more rapidly than those cements to which fly ash is added.*

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración del Instituto Tecnológico de la Construcción "AIDICO" y los laboratorios de control de calidad INCIVSA S.L y HORMIUNIÓN S.L.

## ACKNOWLEDGEMENTS

*We are grateful to the "AIDICO" Construction Technology Institute, and also to quality control laboratories INCIVSA S.L and HORMIUNIÓN S.L.*

## BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Agrupación de Fabricantes de Cemento de España "OFICEMEN" (2011). <[http://www.oficemen.com/1stDocumentos.asp?id\\_cat=148](http://www.oficemen.com/1stDocumentos.asp?id_cat=148)> (abril 2012).
- (2) Ministerio de Fomento. *EHE-08. Instrucción Hormigón Estructural*. Ministerio de Fomento ed., Madrid, Spain (2008).
- (3) Benlloch Marco, J.: *Sistemas de Cimbrado: Acciones Plazos y Problemas Constructivos*. Trabajo de investigación para Cátedra de Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Construcciones Arquitectónicas (1996).

- (4) Fernández Gómez, J.; Calavera Ruiz, J: "Estudio experimental de la evolución de las características mecánicas del hormigón curado en diversas condiciones y su aplicación al cálculo de los procesos de descimbrado". *Hormigón y Acero*, nº 169 (1988), pp. 9-20.
- (5) Chen W.F, Mosallam K.: "Concrete buildings: Analysis for safe construction", *Boca Raton*. Florida, USA. ISBN: 0-8493-85573-70-X (1991).
- (6) Ortega Barrionuevo, F.; Fernández Cánovas, M.: "Análisis de las causas que motivan la disminución de resistencias a compresión, por efecto de temperaturas elevadas, en probetas de hormigón conservadas en obras durante el control de recepción", *Cemento-Hormigón*, nº 934 (2009), pp. 14-25.
- (7) Ortiz Lozano J. A.; Aguado de Cea A.; Agulló Fité L.; Garcia Vicente T.; Zemeño de León M. E.: "Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado. Bases teóricas", *Mater. Construcc.*, vol. 58, 291 (2008), pp. 7-22.
- (8) Gómez, María Soledad L.; Vidal Sergio A.: "Influencia en la resistencia a compresión de hormigones por efecto de la temperatura ambiente", *Revista de Construcción*, vol. 5, nº 1 (2006), pp. 56-61.
- (9) Ortiz Lozano J. A.; Aguado de Cea A.; Agulló Fité L.; Garcia Vicente T.: "Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: Simulation of hot and cold weather conditions", *Cem. Concr. Res.*, vol. 35 (2005), pp. 1970-1979. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.01.004>
- (10) Ortega Barrionuevo, F.: *Influencia de la compactación y conservación de probetas durante su permanencia en obra, así como su posterior refrentado en la resistencia a compresión del hormigón (Periodo 1997-2007)*. Tesis Doctoral defendida en la Universidad Politécnica de Madrid el año 2010.
- (11) Comella, J.; Pico, S.; Taure, E.: "Las Pérdidas de Resistencia del Hormigón durante el Verano", *Anales de Construcciones y Materiales Avanzados*, vol. 1 (2002) pp. 4958, Ed. UPC, Barcelona.
- (12) Elkhadiri I.; Puertas F.: "The effect of curing temperature on sulphate-resistant cement hydration and strength", *Constr. and Build. Mater.*, vol. 22 (2007), pp. 1331-1341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.014>
- (13) Mouret A.; Bascoul A.; Escadeillas G.: "Microstructural features of concrete in relation to initial temperature-SEM and ESEM characterization", *Cem. Concr. Res.*, vol. 29 (1999), pp. 369-375. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00160-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00160-4)