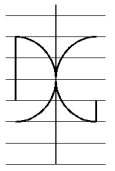




UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y de  
Proyectos de Ingeniería Civil

Influencia térmica en el curado de hormigones con y sin  
aditivos aceleradores de fraguado, analizados con el  
método de la madurez.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería del Hormigón

AUTOR/A: Gonzalez Garcia, Jorge Hernando

Tutor/a: Navarro Ferrer, Ferrán

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



DEPARTAMENTO  
DE INGENIERÍA DE  
LA CONSTRUCCIÓN  
Y DE PROYECTOS DE  
INGENIERÍA CIVIL

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN

**TRABAJO FIN DE MÁSTER  
CURSO ACADÉMICO 2022/2023**

**Influencia térmica en el curado de  
hormigones con y sin aditivos  
aceleradores de fraguado, analizados con  
el método de la madurez**

**Autor: Jorge Hernando González García**

**Tutor: Ferran Navarro Ferrer**

**Valencia, julio de 2023**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA  
CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



DEPARTAMENTO  
DE INGENIERÍA DE  
LA CONSTRUCCIÓN  
Y DE PROYECTOS DE  
INGENIERÍA CIVIL





### **Agradecimientos.**

Quiero agradecer a mi tutor de trabajo final, Ferran Navarro Ferrer por su gran disposición y entrega durante todo el proceso de planteamiento y desarrollo, poniendo a mi disposición las instalaciones de su empresa, con el fin de realizar allí las campañas experimentales, estando presto a solucionar cualquier duda e imprevisto, además del personal del Grupo Hormifer, quienes estuvieron atentos y ayudándome en las tareas realizadas durante el desarrollo de las campañas experimentales.

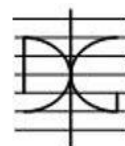
A la empresa Cosmos engineering, Ruben, Rafa, Wladi y Dani, quienes me facilitaron sus instalaciones, software y equipos con el fin de realizar la toma y análisis de datos, en las campañas experimentales, además de estar prestos ante cualquier inquietud o solicitud que se me pudiera presentar durante el proceso, motivándome y ayudándome a realizar las campañas experimentales y el análisis de los datos obtenidos.

Al Master Universitario en Ingeniería del Hormigón, y su plantilla de docentes quienes están prestos a responder dudas en cualquier momento y con la mejor disposición.



## Índice

Tablas .....	5
Figuras .....	7
Introducción .....	9
Resumen.....	10
Abstract .....	11
Objetivos .....	12
Objetivo principal:.....	12
Objetivos específicos:.....	12
Estado del arte .....	13
Normativas:.....	13
ACI .....	13
ASTM .....	17
Normativa por países .....	19
UNE-EN-13670.....	19
Madurez: .....	20
Campaña experimental: .....	23
Hormigón monitorizado:.....	23
Albaranes:.....	24
Aditivo .....	25
Resultados:.....	26
Cálculo de resistencia:.....	27
HA-35 (SIN aditivo acelerador de fraguado) INVIERNO: .....	29
HA-35 (CON aditivo acelerador de fraguado) INVIERNO: .....	35
HA-35 (SIN aditivo acelerador de fraguado) VERANO: .....	42
Comparativa .....	49
Análisis de resultados.....	51
Conclusiones .....	53
Futuras líneas de investigación .....	54
Referencias.....	55

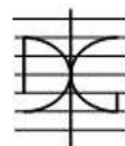


## Tablas

Tabla 01:	Normativas de aplicación/especificativas Método de la madurez. ....	19
Tabla 02:	Ensayo de rotura de probetas a compresión. ....	26
Tabla 03:	Cálculo de resistencia a compresión. ....	28
Tabla 04:	Calibración mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante INVIERNO. ....	29
Tabla 05:	Comprobación con el método de la madurez (6a).....	30
Tabla 06:	Verificación del método de la madurez. ....	31
Tabla 07:	Calibración inversa mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante INVIERNO.....	31
Tabla 08:	Comprobación inversa con el método de la madurez (6a). ....	32
Tabla 09:	Verificación del método de la madurez. ....	33
Tabla 10:	Verificación del método de la madurez (probetas de hormigón).....	34
Tabla 11:	Verificación del método de la madurez calibración inversa (probetas de hormigón). 34	
Tabla 12:	Verificación del método de la madurez (piezas de hormigón). ....	35
Tabla 13:	Verificación del método de la madurez calibración inversa (piezas de hormigón).35	
Tabla 14:	Calibración mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante INVIERNO. ....	35
Tabla 15:	Comprobación con el método de la madurez (6b). ....	36
Tabla 16:	Verificación del método de la madurez. ....	37
Tabla 17:	Calibración inversa mezcla de hormigón HA-35 con acelerante INVIERNO.....	38
Tabla 18:	Comprobación inversa con el método de la madurez (12b).....	39
Tabla 19:	Verificación del método de la madurez. ....	40
Tabla 20:	Verificación del método de la madurez (probetas de hormigón).....	40
Tabla 21:	Verificación del método de la madurez calibración inversa (probetas de hormigón). 41	
Tabla 22:	Verificación del método de la madurez (piezas de hormigón). ....	41
Tabla 23:	Verificación del método de la madurez calibración inversa (piezas de hormigón).42	
Tabla 24:	Calibración mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante VERANO.....	42
Tabla 25:	Comprobación con el método de la madurez (Xc).....	43
Tabla 26:	Verificación del método de la madurez. ....	44
Tabla 27:	Calibración inversa mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante VERANO. ....	45
Tabla 28:	Comprobación inversa con el método de la madurez (5c). ....	46
Tabla 29:	Verificación del método de la madurez. ....	46
Tabla 30:	Verificación del método de la madurez (probetas de hormigón).....	47
Tabla 31:	Verificación del método de la madurez calibración inversa (probetas de hormigón). 47	



Tabla 32:	Verificación del método de la madurez (piezas de hormigón). .....	48
Tabla 33:	Verificación del método de la madurez calibración inversa (piezas de hormigón).	49
Tabla 34:	Verificación porcentual del método de la madurez calibración normalizada (piezas de hormigón).....	49
Tabla 35:	Verificación porcentual del método de la madurez calibración inversa (piezas de hormigón).	49



## Figuras

Figura 01:	Esquema de funcionamiento del martillo de rebote. (ACI, 2003) .....	13
Figura 02:	Esquema de funcionamiento del ensayo de penetración. (ACI, 2003) .....	14
Figura 03:	Esquema de funcionamiento del ensayo de arrancamiento. (ACI, 2003).....	14
Figura 04:	Esquema de funcionamiento de Break-off number. (ACI, 2003) .....	15
Figura 05:	Esquema de funcionamiento del ensayo de pulso ultrasónico. (ACI, 2003) .....	15
Figura 06:	Gráfico de función de madurez. (ACI, 2003) .....	16
Figura 07:	Rangos útiles de resistencia a la compresión para métodos de prueba in situ. (ACI, 2003)	16
Figura 08:	Desempeño relativo de las pruebas in situ. (ACI, 2003) .....	17
Figura 09:	Periodos de desencofrado y descimbrado de elementos de hormigón armado. (fomento, 2011) .....	22
Figura 10:	Albarán vertido 14 de febrero, invierno. (Fuente propia) .....	24
Figura 11:	Albarán vertido 28 de junio, verano. (Fuente propia) .....	25
Figura 12:	Aditivo acelerante de fraguado, ficha técnica. (Fuente propia).....	25
Figura 13:	Ensayo de carga sobre probeta cuadrada. (Fuente propia) .....	27
Figura 14:	Gráfico calibración mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante INVIERNO (Fuente propia).	29
Figura 15:	Gráfico curva hormigón HA-35 INVIERNO (Fuente propia).....	30
Figura 16:	Probetas curadas en condiciones de laboratorio (Fuente propia).....	31
Figura 17:	Gráfico calibración inversa mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante INVIERNO (Fuente propia).....	32
Figura 18:	Gráfico curva hormigón HA-35 INVIERNO inversa (Fuente propia).....	33
Figura 19:	Probetas curadas en condiciones ambientales (Fuente propia).....	33
Figura 20:	Pieza de hormigón en condiciones de factoría (Fuente propia). .....	34
Figura 21:	Gráfico calibración mezcla de hormigón HA-35 con acelerante INVIERNO (Fuente propia).....	36
Figura 22:	Gráfico curva hormigón HA-35 (Fuente propia).....	37
Figura 23:	Probetas curadas en condiciones de laboratorio (Fuente propia).....	37
Figura 24:	Gráfico calibración inversa mezcla de hormigón HA-35 con acelerante INVIERNO (Fuente propia).....	38
Figura 25:	Gráfico curva hormigón HA-35 INVIERNO inversa (Fuente propia).....	39
Figura 26:	Probetas curadas en condiciones ambientales (Fuente propia).....	40
Figura 27:	Pieza de hormigón en condiciones de factoría (Fuente propia). .....	41
Figura 28:	Gráfico calibración mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante VERANO (Fuente propia).	43





Figura 29:	Gráfico curva hormigón HA-35 VERANO (Fuente propia).....	44
Figura 30:	Probetas curadas en condiciones de laboratorio (Fuente propia).....	44
Figura 31:	Gráfico calibración inversa mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante VERANO (Fuente propia).....	45
Figura 32:	Gráfico curva hormigón HA-35 VERANO inversa (Fuente propia). ....	46
Figura 33:	Probetas curadas en condiciones ambientales (Fuente propia).....	47
Figura 34:	Pieza de hormigón en condiciones de factoría (Fuente propia). ....	48



## Introducción

La monitorización en estructuras ha adquirido gran importancia en la actualidad, pues los procesos constructivos se han optimizado con el fin de ser más eficientes y rápidos, sin dejar de ser seguros, por esta razón el método de la madurez se presenta como una alternativa muy importante, debido a su gran control y precisión a la hora de estimar la resistencia en tiempo real de una mezcla de hormigón, basándose en el historial de temperatura interna de la misma, el cual va variando con el proceso de fraguado y las condiciones ambientales.

En el presente documento se realizó una campaña experimental en fábrica de elementos prefabricados, con el fin de evaluar la influencia térmica que se presenta en una misma mezcla de hormigón con y sin aditivos aceleradores de fraguado, puesto que los procesos buscan ser cada vez más eficientes sin dejar de lado la seguridad, con el fin de maximizar la rentabilidad.

La temperatura es el factor más influyente en el desarrollo de la resistencia de una mezcla de hormigón, y este varía según la época del año y la ubicación geográfica, por eso la gran importancia de analizar bajo estos factores, y basado en un método que mide la temperatura interna de la mezcla y en base a esto realiza las estimaciones correspondientes, pues el método normalizado de compresión mediante probetas curadas en condiciones de laboratorio presenta resultados que pueden ser discutibles según sea el caso, llevando a esperas excesivas o en el peor de los casos, deficientes, poniendo en juego la integridad estructural del elemento hormigonado.

## Resumen

El método de la madurez es un método no destructivo de control de la resistencia del hormigón, que se basa en la temperatura interna de la pieza, debida tanto a las condiciones ambientales, como a las temperaturas provenientes de la reacción química propia del material cementicio que reacciona con el agua, formando la pasta de cemento. Es un método de control muy importante, pues presenta resultados en tiempo real y bajo condiciones no controladas de un elemento determinado, convirtiéndolo en una herramienta muy importante en procesos de alto nivel de control y seguridad como lo son la prefabricación de estructuras de hormigón. Este método surge bajo la premisa de optimizar procesos constructivos, teniendo siempre en cuenta la seguridad de las estructuras.

Para el desarrollo de este trabajo se pretende realizar una campaña experimental en una fábrica de hormigón prefabricado ubicada en Utiel, perteneciente al Grupo Hormifer, con el fin de estudiar el comportamiento interno del hormigón con y sin aditivos aceleradores de fraguado, aplicando el método de la madurez, en dos épocas diferentes del año, observando la evolución térmica de una misma mezcla de hormigón, y así poder estipular la resistencia exacta que posee la pieza en tiempo real, obteniendo curvas de madurez que expliquen el proceso de fraguado, bajo la influencia de aditivos, además de hacer una comparativa con el método de control estipulado en las normativas, que consiste en la rotura de probetas cilíndricas o cúbicas, que se encuentran curadas en condiciones de laboratorio, es decir temperatura constante de  $20 \pm 1$  °C y humedad relativa mayor al 95%.

Es de interés observar la influencia térmica que ocasiona la inclusión de un aditivo acelerador de fraguado dentro de una mezcla de hormigón, observando la curva térmica que desarrolla y su respectiva comparativa con el correspondiente hormigón sin la adición de aditivo, además de interpretar la influencia de las condiciones ambientales en estos procesos.

El proceso de sensorización se pretende realizar con la ayuda de la empresa Cosmos Engineering, quienes proveerán los dispositivos de captación de datos de temperatura interna del hormigón, y todo el sistema de transmisión, para así poder realizar el ensayo, basado en las normativas americanas ACI 225.1 R y ASTM C 1074-98, donde se especifica la práctica de los ensayos para determinar la resistencia del hormigón, y más específicamente el Método de la Madurez, y sus ecuaciones correspondientes para tratar los datos y realizar las curvas correspondientes antes mencionadas.



## Abstract

The maturity method is a non-destructive method of controlling the resistance of the concrete, which is based on the internal temperature of the piece, due both to the environmental conditions and to the temperatures coming from the chemical reaction of the cementitious material that reacts with water, forming cement paste. It is a very important control method, since it presents results in real time and under uncontrolled conditions of a given element, making it a very important tool in processes with a high level of control and safety, such as the prefabrication of concrete structures. This method arises under the premise of optimizing construction, always taking into account the safety of the structures.

For the development of this work, it is intended to carry out an experimental campaign in a precast concrete factory located in Utiel, belonging to Grupo Hormifer, in order to study the internal behavior of concrete with and without setting accelerator additives, applying the method of maturity, at two different times of the year, observing the thermal evolution of the same concrete mixture, and thus be able to stipulate the exact resistance of the piece in real time, obtaining maturity curves that explain the setting process, under the influence of additives, in addition to making a comparison with the control method stipulated in the regulations, which consists of breaking cylindrical or cubic specimens, which are cured under laboratory conditions, that is, a constant temperature of  $20 \pm 1$  °C and relative humidity greater than 95%.

It is of interest to observe the thermal influence caused by the inclusion of a setting accelerator additive in a concrete mix, observing the thermal curve that it develops and its respective comparison with the corresponding concrete without the additive improvement, in addition to interpreting the influence of environmental conditions in these processes.

The sensing process is intended to be carried out with the help of the company Cosmos Engineering, who will provide the data collection devices for the internal temperature of the concrete, and the entire transmission system, in order to carry out the test, based on the American ACI regulations. 225.1 R and ASTM C 1074-98, where the practice of tests to determine the resistance of concrete is specified, and more specifically the Maturity Method, and its corresponding ones to treat the data and perform the aforementioned corresponding curves.



## Objetivos

### Objetivo principal:

Obtener por medio de método de la madurez, en base a una campaña experimental realizada en las instalaciones de la empresa Grupo Hormifer y con la ayuda de los equipos de captación de la empresa COSMOS, la influencia de las condiciones térmicas de exposición y los aditivos en el proceso de fraguado y resistencia a edades tempranas de una mezcla de hormigón.

### Objetivos específicos:

- Comprender la importancia del método de la madurez en el desarrollo de una estructura con el fin de optimizar procesos constructivos, y sabiendo en qué lugares esta normalizado el mismo y es posible su aplicación.
- Realizar una campaña experimental, evaluando el comportamiento térmico de un hormigón con aditivos aceleradores de fraguado en fábrica de prefabricados, visualizando la evolución de los mismos.
- Realizar una campaña experimental, evaluando el comportamiento térmico de un hormigón sin aditivos aceleradores de fraguado, vertido en invierno y en verano, con el fin de visualizar el comportamiento del mismo cambiando las condiciones ambientales.
- Realizar el tratamiento de datos basado en el método de la madurez, con su respectiva calibración previa al hormigón que se va a utilizar, la cual está realizada mediante el ensayo de compresión en el hormigón.
- A modo inductivo, realizar el mismo ensayo, calibrando la mezcla de hormigón por medio de probetas curadas en condiciones ambientales, y así poder realizar una comparativa (no siendo ésta una forma normalizada).
- Concluir cual es la influencia de la temperatura en la resistencia a edades tempranas de una mezcla de hormigón y cuál es la temporada más idónea para realizar un vertido.

## Estado del arte

### Normativas:

#### ACI

Dentro del documento expedido por el **American Concrete Institute (ACI)**, se encuentra el **ACI 225.1 R** en el cual se especifican los métodos in situ para estimar la resistencia del hormigón, que son ensayos realizados al hormigón en el sitio, para contrastar los resultados obtenidos con probetas de hormigón, como se especifica en la normativa la normativa **C 192/C 192M** (ASTM, 2002), en su mayoría se les denomina ensayos no destructivos, pues presentan una afección nula o mínima al elemento de hormigón, obteniendo lecturas que con ayuda de ciertas correlaciones permiten obtener la resistencia del elemento. (ACI, 2003)

Esta normativa es una revisión de los métodos especificados por el ASTM para estimar la resistencia del hormigón in situ, tanto en el caso de construcciones nuevas como existentes, y el objetivo es proporcionar una guía de cómo realizar y analizar los resultados de los ensayos que se mencionan a continuación:

#### *Ensayo de rebote (ASTM C 805)*

Consiste en presionar el llamado martillo Schmidt contra el elemento de hormigón, el cual dará un golpe, el cual será correlacionado con la fuerza de rebote del mismo, obteniendo una resistencia aproximada.

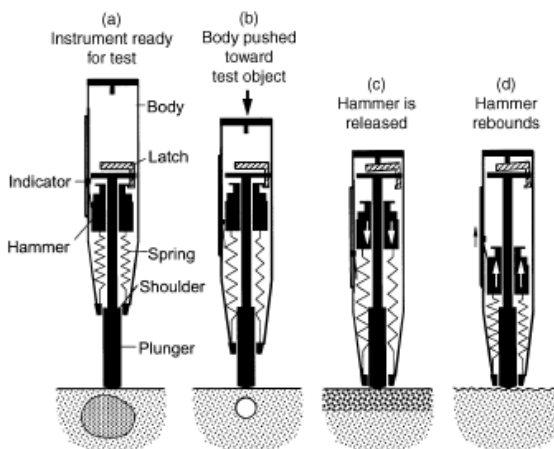


Figura 01: Esquema de funcionamiento del martillo de rebote. (ACI, 2003)

#### *Resistencia a la penetración (ASTM C 803/C 803M)*

Consiste en la utilización de una pistola, que al disparar una sonda esta penetra en el hormigón. Realizando una correlación de la profundidad que se introduce en este se obtiene la resistencia; se conoce comúnmente como la Sonda de Windsor.

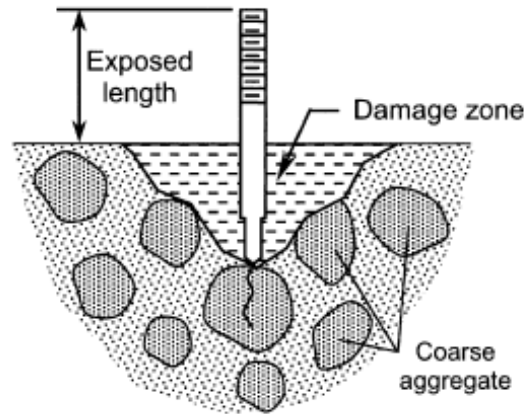


Figura 02: Esquema de funcionamiento del ensayo de penetración. (ACI, 2003)

#### Pullout test (ASTM C 900)

Consiste en correlacionar la fuerza necesaria para extraer un elemento de metal incrustado en el hormigón, el cual posee una cabeza agrandada, la fuerza de este se aplica apoyándose en el hormigón con una especie de anillo.

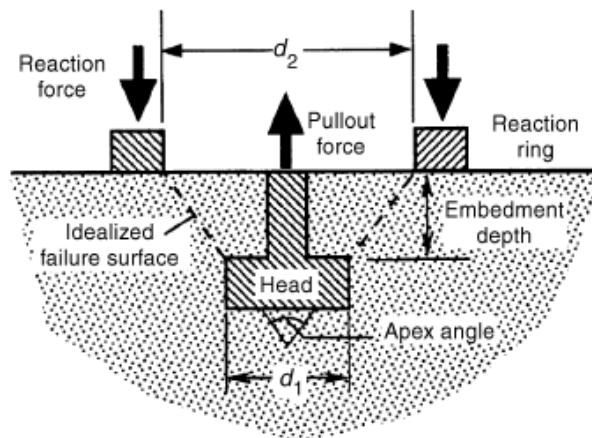


Figura 03: Esquema de funcionamiento del ensayo de arrancamiento. (ACI, 2003)

#### Break-off number (ASTM C 1150)

Consiste en medir la fuerza requerida para romper un núcleo cilíndrico de una masa de hormigón más grande, obteniendo la resistencia del hormigón al realizar una relación entre la fuerza necesaria y una relación de resistencia previamente establecida.

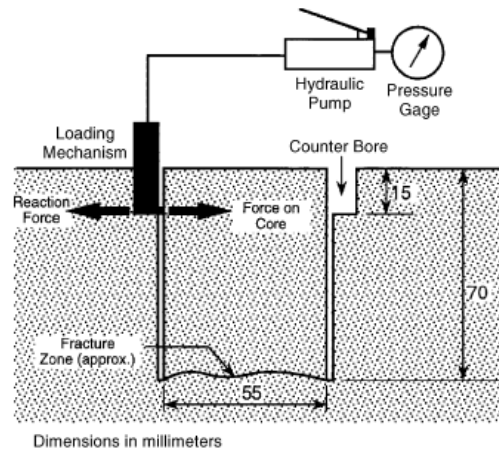


Figura 04: Esquema de funcionamiento de Break-off number. (ACI, 2003)

#### Velocidad de pulso ultrasónico (ASTM C 597)

Consiste en determinar la resistencia del hormigón, al relacionar esta con la velocidad de propagación del pulso ultrasónico generado por el pulsómetro, el cual envía una señal de alto voltaje que es captada por un transductor, que dependiendo de su ubicación, proporciona una resistencia.

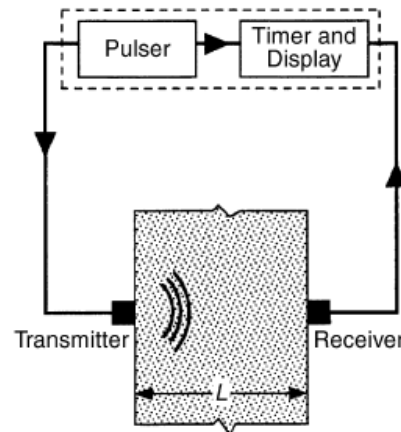


Figura 05: Esquema de funcionamiento del ensayo de pulso ultrasónico. (ACI, 2003)

#### Método de la madurez (ASTM C 1074)

Se basa en el concepto de que el hormigón es una mezcla de materiales que reaccionan químicamente, generando una reacción exotérmica, esto significa que el desarrollo de las resistencias está directamente relacionado con la temperatura dentro de la mezcla, lo que implica que la resistencia a cualquier edad depende de la historia térmica del hormigón.



La historia térmica del hormigón y una función de madurez son utilizadas para calcular el índice de madurez, con el cual se cuantifican los efectos del tiempo y la temperatura.

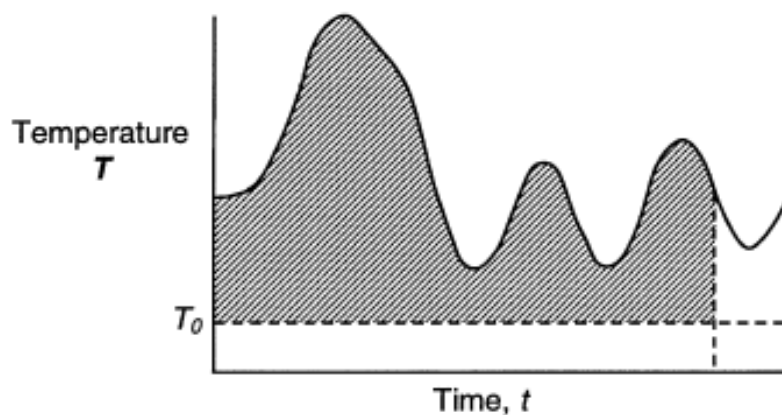


Figura 06: Gráfico de función de madurez. (ACI, 2003)

El ACI realiza una comparativa entre los métodos anteriormente mencionados con el fin de determinar los beneficios, similitudes y facilidades de los mismos, lo cual se expresa en la Figura 7 y 8.

Test method	Range of compressive strength*	
	MPa	psi
Rebound number	10 to 40	1500 to 6000
Probe penetration	10 to 120	1500 to 17,000 <sup>†</sup>
Pin penetration	3 to 30	500 to 4000
Pullout	2 to 130 <sup>‡</sup>	300 to 19,000 <sup>‡</sup>
Ultrasonic pulse velocity	1 to 70	100 to 10,000
Break-off	3 to 50	500 to 7000
Maturity	No limit	
Cast-in-place cylinder	No limit	

\*Higher strengths may be tested if satisfactory data are presented for the test method and equipment to be used.

<sup>†</sup>For strengths above 40 MPa (6000 psi), special probes are required.

<sup>‡</sup>For strengths above 55 MPa (8000 psi), special high-strength bolts are required to extract pullout inserts.

Figura 07: Rangos útiles de resistencia a la compresión para métodos de prueba in situ. (ACI, 2003)



Test method	ASTM Standard	Accuracy*		Ease of use*
		New construction	Existing construction	
Rebound number	C 805	+	+	++
Penetration resistance	C 803/C 803M	+	+	++
Pullout	C 900	++	++	+
Break-off	C 1150	++	++	+
Pulse velocity	C 597	++	+	+
Maturity	C 1074	++ <sup>†</sup>	N/A	+
Cast-in-place cylinder	C 873	++	N/A	+

\*A test method with a ++ results in a more accurate strength estimate or is easier to use than a method with a +. N/A indicates that the method is not applicable to existing construction.

<sup>†</sup>Requires verification by other tests.

Figura 08: Desempeño relativo de las pruebas in situ. (ACI, 2003)

Basado en estas observaciones se puede apreciar la importancia del método de la madurez, pues presenta gran superioridad sobre los otros métodos de su misma naturaleza.

## ASTM

El método de la madurez es un método no destructivo realizado en el hormigón, en estado fresco, en el cual se mide la temperatura interna del mismo, con el fin relacionarla con una previa calibración realizada en condiciones controladas, con el fin de predecir su resistencia real a cualquier edad.

Este ensayo está normalizado por la **American Society for Testing and Materials (ASTM)**, organización internacional de estándares que desarrolla y publica dichos parámetros técnicos para una gran cantidad de materiales, productos y sistemas, dicho documento es el **C 1074-98**, Estándar Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, en la cual se especifica el procedimiento para estimar la resistencia del concreto por medio del método de madurez, donde el índice de madurez se expresa en términos del factor temperatura-tiempo o en términos de la edad equivalente a una temperatura especificada. Se requiere establecer la relación resistencia-madurez de la mezcla de hormigón en el laboratorio y registrar el historial de temperaturas de la muestra a evaluar con el fin de estimar la resistencia. (ASTM, 1998)

Dentro de los aspectos más importantes a evaluar por el método de la madurez, se encuentran los siguientes:

- Tiempos de desencofrado y re-apuntalamiento seguros.
- Control de puntos críticos de la estructura en proceso de monitorización.
- Resistencias necesarias para procesos de transmisión de fuerzas de pretensado, con armaduras pretensas o postesas.
- Entrada en servicio de estructuras.

Estos aspectos anteriormente mencionados, basan su eficiencia y exactitud en la determinación adecuada de la función de madurez, la cual viene dada por la calibración inicial de cada uno de



los hormigones a tener en cuenta, actualmente existen dos funciones de madurez validas que se basan en el historial de temperaturas para calcular el índice de madurez.

Funciones de madurez:

- Función de cálculo de factor temperatura-tiempo:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \Delta t$$

- $M(t)$ : Factor temperatura tiempo a una edad  $t$ , se expresa en grados día o grados hora.
  - $\Delta t$ : Intervalo de tiempo, se expresa en días o horas.
  - $T_A$ : Temperatura promedio en el hormigón durante el intervalo de tiempo, se expresa en grados.
  - $T_0$ : Temperatura de referencia, se expresa en grados.
- Función de cálculo de edad equivalente, a una temperatura especificada:

$$t_e = \sum e^{-Q \left( \frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s} \right) \Delta t}$$

- $T_e$ : Edad equivalente a una temperatura especifica  $T_s$ , se expresa en días o horas.
- $Q$ : Energía de activación.
- $T_a$ : promedio de temperaturas en el hormigón durante el intervalo de tiempo.
- $T_s$ : temperatura especificada.
- $\Delta t$ : Intervalo de tiempo, se expresa en días o horas.

El procedimiento necesario para realizar el ensayo se desarrolla preparando quince (15) probetas cilíndricas de acuerdo con la normativa **C 192/C 192M** (ASTM, 2002), con un hormigón con las mismas condiciones con las que se pretende hormigonar el elemento a evaluar.

Se deben de introducir sensores de temperatura al menos en dos probetas, a una altura de quince (15) milímetros, y conectar los mismos con el fin de obtener todos los registros necesarios del desarrollo de temperatura de esta.

Se deben de curar las probetas en húmedo, en un baño de agua o en una habitación que cumpla con las condiciones de temperatura y humedad respectivas, especificadas en la normativa **C 511**.

Se realizan ensayos de compresión a dichas probetas a las edades de uno (1), tres (3), siete (7), catorce (14) y veintiocho (28) días, probando dos especímenes a cada una de las edades y calculando la resistencia promedio, teniendo en cuenta que si la diferencia de la resistencia de los mismos es mayor al diez por ciento (10%), se debe de ensayar otra probeta y promediar los resultados de los tres elementos, que en caso de tratarse de una probeta que se encuentre claramente mal realizada, se debe de desechar el resultado de esta.

En cada una de las edades se debe de registrar el índice de madurez promedio de las probetas instrumentadas, utilizando un diferencial de tiempo de media hora en las primeras horas de



fraguado del hormigón, que es donde más se encuentra una diferencia marcada en la temperatura de la muestra.

Se debe de graficar la resistencia a la compresión promedio como una función del valor promedio del índice de la madurez, y la curva resultante es la relación resistencia-madurez que se utiliza para estimar la resistencia de otras muestras curadas bajo condiciones diferentes de temperatura.

### Normativa por países

A continuación, se presenta una tabla en la cual se especifican los países en los cuales está contemplado el método de la madurez, tanto para su aplicación directa como para su aplicación complementaria, algunas de estas son la normativa directa del método de la madurez en dicho país, y otras simplemente la normativa general de construcción, en la cual se especifica el método de la madurez como herramienta para el cálculo de la resistencia del hormigón.

Tabla 01: Normativas de aplicación/especificativas Método de la madurez.

PAÍS	NORMATIVA	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
ARGENTINA	CIRSOC-201	Reglamento argentino de estructuras de hormigón.	C4. Criterios y control de conformidad del hormigón: (C4.3.3) Aplicación de la madurez del hormigón.
CANADÁ	CSA-233.1	Materiales de concreto y métodos de construcción de concreto/Métodos de ensayo y practica estándar para concreto.	-
CHILE	NCH-170	Concreto-Requisitos generales, Institución nacional de normalización.	-
COLOMBIA	NTC-3756	Procedimientos para estimar la resistencia del concreto por el método de la madurez.	-
DINAMARCA	DS-482	Danish Standard – Execution of concrete structures	DS-411
ESPAÑA	UNE-EN-13670	Ejecución de estructuras de hormigón.	F8.5. Curado y protección: (3) Las estimaciones detalladas del desarrollo de las propiedades del hormigón.
GUATEMALA	NTG-41042	Practica para la estimación de la resistencia del concreto por el método de la madurez.	-
HOLANDA	NEN-41042	Determination of strength of fresh concrete with the method of weighted maturity.	-
PANAMÁ	REP-04	Reglamento estructural de la república de Panamá.	ACI 318-02
UNITED KINGDOM	NSCS	National structural concrete specification for buiding construction.	5.7.1. Temporary construction loads: Ensure the structure is not subjected to temporary loads during construction that will cause distress, taking account of the maturity of the concrete at the time of loading.

### UNE-EN-13670

Esta normativa es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 13670:2009, correspondiente a la normativa española, titulada Ejecución de estructuras de hormigón, la cual incluye un anexo nacional con sus especificaciones correspondientes.



El anexo F, en el cual se especifican las directrices sobre el hormigonado, posee en su índice F.8.5, titulado Curado y protección, detalles para estimar el desarrollo de las propiedades del hormigón, en los cuales enumera los siguientes:

- a) *Cálculo de la madurez a partir de medidas de la temperatura a una profundidad máxima de 10 mm bajo la superficie.*
- b) *Cálculo de la madurez en base a la temperatura media diaria del aire.*
- c) *Temperatura de curado.*
- d) *Ensayo de índice de rebote (después de su calibración en probetas del hormigón correspondiente).*
- e) *Otros métodos de idoneidad establecida.*

(AENOR, 2009)

Además de esto, especifica que los cálculos de madurez deben basarse en una función adecuada, y que debe de ser contrastada para el tipo de cemento o la combinación de cemento y adición utilizada.

Este es el único referente normativo en España que indica el método de madurez, y como se puede apreciar lo indica como una herramienta complementaria con un valor alto en los resultados obtenidos.

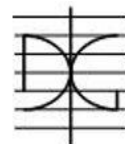
### Madurez:

En 1973, en el estado de Virginia en Estados Unidos se presentó el colapso de una edificación correspondiente al condominio Skyline Plaza, el cual constaba de veintiséis (26) pisos, dejando como saldo la muerte de catorce (14) personas, y otras treinta y cinco (35) heridas. Posteriormente se pudo establecer que las causas del colapso se debían a una mala ejecución de las fases constructivas de la edificación, pues se realizó un des apuntalamiento prematuro en una de las fases, sin tener aun las resistencias necesarias en la estructura, ocasionando un colapso progresivo de gran parte de la edificación. (Hmong, s.f.)

Este accidente motivó la implementación de métodos más específicos a la hora de determinar las cargas en fase constructiva, dependiendo del método que se desee implementar, pues una estructura en su fase constructiva constituye una estructura evolutiva, la cual cambia en su configuración, cargas y resistencia, pues durante la construcción se pueden llegar a alcanzar cargas superiores a las esperadas en servicio, por lo tanto los procesos de cimbrado y descimbrado cobran gran importancia, enfatizando en la importancia de saber las cargas de construcción y la edad a la cual el hormigón obtiene la resistencia necesaria. (Yepes, 2018)

Dentro de los procesos constructivos más comunes se encuentran los siguientes:

- Cimbrado y descimbrado:  
Es un proceso simple en el cual se realiza el proceso de descimbrado total, y por lo general se utilizan dos juegos de puntales.
- Cimbrado, clareado y descimbrado:  
Este método consiste en realizar un retiro de material a una edad temprana, más específicamente el encofrado y por lo menos la mitad de los puntales,



generando unas cargas en los forjados intermedios que deben de ser comprobadas.

- Cimbrado, recimbrado y descimbrado:  
Este método consiste en realizar el retiro total de material a una edad temprana, con el fin de que toda la carga la resista el forjado, para posteriormente volver a colocar los puntales con el fin de que se ayude a resistir las cargas debidas a los forjados superiores.

Existen diferentes métodos de cálculo de la transmisión de cargas durante la construcción que han sido desarrollados por diferentes autores mediante investigaciones, llegando a la contribución de un método de cálculo, los cuales son los siguientes:

- Método simplificado de Grundy y Kabaila (1963)
- Método simplificado para recimbrado de Taylor (1967)
- Modelo de Liu et al (1985-1986)
- Modelo EFM de Stivaros y Halvorsen (1990)
- Modelo de Masollam y Chen (1991)
- Método simplificado modificado de Mosollam y Chen (1991)
- Modelo de morangues et al (1992-1994-1996)
- Método simplificado de Duan y Chen (1995)
- Método simplificado de Fang et al (2001)
- Estudio realizado por Alvarado et al (2009)
- Nuevo método simplificado por Calderon et al (2011)
- Estudio realizado por Gash et al (2012)

(Moreno, 2014)

Pero una vez sabiendo la carga que se debe de resistir en cada una de las fases constructivas, tanto en una edificación, como en una estructura, y el plazo mínimo se encuentra dado por la evolución de la resistencia y el módulo de deformación de la mezcla de hormigón, además de las condiciones de curado las cuales afectan drásticamente a la mezcla. La normativa EHE-08 en sus comentarios incluye la siguiente ecuación:

$$j = \frac{400}{\left(\frac{Q}{G} + 0.5\right)(T + 10)}$$

Donde:

- j: Número de días.
- T: Temperatura media, en grados centígrados, de las máximas y mínimas diarias durante los j días.
- G: Carga que actúa sobre el elemento al descimbrar (incluido el peso propio).
- Q: Carga que actuara posteriormente (Q+G = Carga máxima total).

(fomento, 2011)

Además de la ecuación anterior, la EHE-08 también especifica una tabla que se puede utilizar en el caso de que se utilice un cemento de endurecimiento normal y condiciones normales de curado, en la cual se especifican los periodos de desencofrado y descimbrado de elementos de hormigón armado.

**Tabla 74**  
**Períodos de desencofrado y descimbrado de elementos de hormigón armado**

Temperatura superficial del hormigón (°C)	≥ 24°	16°	8°	2°	
Encofrado vertical	9 horas	12 horas	18 horas	30 horas	
Losas	Fondos de encofrado	2 días	3 días	5 días	8 días
	Puntales	7 días	9 días	13 días	20 días
Vigas	Fondos de encofrado	7 días	9 días	13 días	20 días
	Puntales	10 días	13 días	18 días	28 días

Figura 09: Periodos de desencofrado y descimbrado de elementos de hormigón armado. (fomento, 2011)

Como se puede apreciar, los periodos de desencofrado y descimbrado dependen básicamente del tipo de hormigón y de las condiciones ambientales, y es por esto que cobra gran importancia el método de la madurez, que se define como un método para evaluar la resistencia del hormigón recién vertido, en el cual se relaciona el tiempo transcurrido y las mediciones de temperatura internas, con el fin de obtener valores de resistencia reales. (Command center concrete, s.f.)

Se han realizado varios estudios en los cuales se pretende comparar la veracidad y utilidad del método de la madurez, con el tradicional y normativo método a compresión simple, en el cual se realizan una serie de probetas que curan en condiciones de laboratorio, además de compararlo a su vez con los diferentes tiempos especificados según los métodos anteriormente mencionados, como el método de Calavera, en el cual se determinó que en todos los puntos de una estructura, la edad de descimbrado es mayor a la del tiempo de fraguado final obtenida con el método de la madurez. (Castro-Garrido, 2016)

La prefabricación de estructuras de hormigón ha crecido de manera considerable en los últimos tiempos, debido a las ventajas inherentes a los procesos industriales y a la utilización de materiales con mayores prestaciones y calidad. Uno de los objetivos en la industrialización de elementos de hormigón es conseguir mayores producciones, y es por esta razón que día a día se trabaja en nuevas tecnologías que estudien la rápida evolución de los hormigones empleados, buscando eficiencia y control. El método de la madurez es un método que presenta muchas virtudes, siendo su mejor característica la de saber la resistencia exacta del hormigón en cada momento, basándose en la temperatura interna del mismo, y es por esto que esta investigación presenta una gran importancia en estos procesos ingenieriles.



## Campaña experimental:

Se realiza una campaña experimental en planta de prefabricado ubicada en Utiel, en los meses de febrero (invierno) y junio (verano), con el fin de obtener una comparativa real en dos condiciones ambientales totalmente diferentes.

## Hormigón monitorizado:

- HA-35 (Con aditivo acelerador de fraguado) INVIERNO: (10 sensores) / (12 Probetas)
  - Probetas curadas a 20C (6):  
Se monitoriza la temperatura del agua de la balsa. (1 sensores)
    - Rotura 24 horas (2). (1 sensores)  
Se monitoriza una de ellas.
    - Rotura 3 días (2). (1 sensores)  
Se monitoriza una de ellas.
    - Rotura 7 días (2). (1 sensores)  
Se monitoriza una de ellas.
  - Probetas curadas a temperatura ambiente (6):  
Se monitoriza la temperatura ambiente. (1 sensores)
    - Rotura 24 horas (2). (1 sensores)  
Se monitoriza una de ellas.
    - Rotura 3 días (2). (1 sensores)  
Se monitoriza una de ellas.
    - Rotura 7 días (2). (1 sensores)  
Se monitoriza una de ellas.
  - Pieza de hormigón monitorizada. (2 sensores)
- HA-35 (Sin aditivo acelerador de fraguado) INVIERNO: (10 sensores) / (12 Probetas)
  - Probetas curadas a 20C (6):  
Se monitoriza la temperatura del agua de la balsa. (1 sensores)
    - Rotura 24 horas (2). (1 sensores)  
Se monitoriza una de ellas.
    - Rotura 3 días (2). (1 sensores)  
Se monitoriza una de ellas.
    - Rotura 7 días (2). (1 sensores)  
Se monitoriza una de ellas.
  - Probetas curadas a temperatura ambiente (6):  
Se monitoriza la temperatura ambiente. (1 sensores)
    - Rotura 24 horas (2). (1 sensores)  
Se monitoriza una de ellas.
    - Rotura 3 días (2). (1 sensores)  
Se monitoriza una de ellas.
    - Rotura 7 días (2). (1 sensores)  
Se monitoriza una de ellas.
  - Pieza de hormigón monitorizada. (2 sensores)



- HA-35 (Sin aditivo acelerador de fraguado) VERANO: (10 sensores) / (12 Probetas)
  - Probetas curadas a 20C (6):
    - Se monitoriza la temperatura del agua de la balsa. (1 sensores)
      - Rotura 24 horas (2). (1 sensores)
        - Se monitoriza una de ellas.
      - Rotura 3 días (2). (1 sensores)
        - Se monitoriza una de ellas.
      - Rotura 7 días (2). (1 sensores)
        - Se monitoriza una de ellas.
    - Probetas curadas a temperatura ambiente (6):
      - Se monitoriza la temperatura ambiente. (1 sensores)
        - Rotura 24 horas (2). (1 sensores)
          - Se monitoriza una de ellas.
        - Rotura 3 días (2). (1 sensores)
          - Se monitoriza una de ellas.
        - Rotura 7 días (2). (1 sensores)
          - Se monitoriza una de ellas.
      - Pieza de hormigón monitorizada. (2 sensores)

Albaranes:

**hormarXXI** Hormigones Industriales

ALBARÁN 422454

FECHA 14/02/2023

Código Cliente 9918001

Código material B98034962

Nombre GRUPO HORMIFER ING. DEL HORMIGÓN Y ACERO, S.L.

Domicilio PLANTA PREFABRICADO EN UTIEL Población 1H30

Obra Hora límite uso a partir de carga

M<sup>3</sup> 8,90 D-350/F/12 TIPO DE HORMIGÓN A A/C 1/24 Kg/m<sup>3</sup> 2400 CEMENTO CLASE MARCA CEM III B-M(S-LL) 42.5EMEX

ADITIVO		ADICIONES		CONTROL DE CALIDAD			
MARCA	L/m <sup>3</sup>	PROCEDECENCIA	Kg / m <sup>3</sup>	LABORATORIO	H. TOMA	CONO	ELEMENTO
STRUCTURO 354	0						

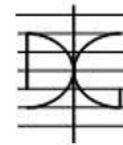
Horas de carga: 16:33 Hora llegada a obra: 15:59 Hora inicio descarga: 16:00 Hora fin descarga: Hora salida de obra: Hora llegada a planta: 7302-FJJ

Localización: PLANTA PREFABRICADOS Observaciones: AGUA A PETICIÓN DEL CLIENTE SI  NO

Hormigón devuelto a planta: HORMAR XXI S.L. B5-4016571 Firma: [Firma] Fecha: [Fecha] Recibí: RESPONSABLE RECEPCIÓN.

EMPRESA TRANSPORTISTA: Nombre: Nombre:

Figura 10: Albarán vertido 14 de febrero, invierno. (Fuente propia)



**hormarXXI**

Avda. Juan Ciudad Combado, s/n - Pol. de Agua Aranga - 03008 ALICANTE  
PLANTA DE COX - t: 965 48 55 31  
PLANTA DE ABARÁN - t: 965 77 04 25  
PLANTA DE ROSGUA (El Pontón) - t: 962 30 95 45  
PLANTA DE ALICANTE (Alcalá) - t: 962 10 13 42  
PLANTA DE SITA DE GÓRREOS (Alcoite) - t: 962 10 13 42

Planta de suministro n.º **RÉQUENA**

**ALBARÁN** 423437  
28/06/2023  
FECHA  
Código Cliente **9918001**  
Código material **B98034952**

Nombre **GRUPO HORMIFER ING. DEL HORMIGÓN Y ACERO, S.L.**  
Domicilio **PLANTA PREFABRICADO EN UTIEL** Población **1h30**  
Obra **PLANTA PREFABRICADO EN UTIEL** Hora límite uso a partir de carga

M<sup>3</sup> **4,00** TIPO DE HORMIGÓN **D-350/F/12** CEMENTO **CEM II B-M(S-LL) 42,5 NEMEX**  
A A/C **0,4** Kg/m<sup>3</sup> **353**

ADITIVO		ADICIONES		CONTROL DE CALIDAD			
ADITIVO	L/m <sup>3</sup>	PROCEDENCIA	Kg / m <sup>3</sup>	LABORATORIO	H. TOMA	CONO	ELEMENTO
<b>STRUCTURO 361</b>	<b>5,06</b>						

Horas de carga **16:49** Hora llegada a obra **17:04** Hora inicio descarga **18:08** Hora fin descarga Hora salida de obra Hora llegada a planta  
Hormigonera n.º **7302-FJU**

Localización **PREFABRICADOS** Observaciones: AGUA A PETICIÓN DEL CLIENTE  
Hormigón devuelto a planta **HORMAR XXI S.L. B54016571** Firma **JUAN JOSE MATEU SANCHEZ** Cantidad  Sí  No litros  
EMPRESA TRANSPORTISTA Nombre: Nombre:

Figura 11: Albarán vertido 28 de junio, verano. (Fuente propia)

Aditivo

**ENAH**

**EnahCel**

**Aditivo Acelerante de Endurecimiento**  
UNE-EN 934-2:2009+A1:2012

LOTE **03/03/22** Polígono Industrial Los Ulanos de la Estación  
C/ Joaquín Costa, parcela 121  
FECHA **03/03/2022** 50800 Zuera (Zaragoza)

CE	PROPIEDADES QUÍMICAS	PROPIEDADES FÍSICAS
0099	Contenido máximo en cloruros: exento	Aspecto físico:
19	Contenido máximo en alcalinos: Max. 15% en masa	Líquido amarillento
23	Comportamiento frente a la corrosión:	Densidad: 1,30 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
	solo contiene componentes del capítulo A.1 de la	pH: 7,5 ± 1
	Norma EN 934-1:2008	
	Sustancias peligrosas: ver ficha de datos de seguridad	

Dosificación habitual: entre 1 % y 3 % sobre el peso de cemento.  
Precauciones de almacenamiento: conservar al resguardo de las heladas y de la acción directa del sol.  
Utilización y precauciones: deben utilizarse las medidas preventivas para el manejo de productos químicos.  
Caducidad: 12 meses después de la fecha de fabricación.

**PELIGRO** Indicaciones de peligro:  
H318 Provoca lesiones oculares graves.  
EUH032 En contacto con ácidos libera gases muy tóxicos.  
Seguir las instrucciones de la ficha de seguridad

Química para Hormigón SL. C/Gran 62, Bajos 08030 Barcelona T: +34 933 455 802 anah@enah.es  
T: +34 999 700 701 www.enah.es

Figura 12: Aditivo acelerante de fraguado, ficha técnica. (Fuente propia)

## Resultados:

Tabla 02: Ensayo de rotura de probetas a compresión.

NOMBRE	¿SENSOR?	CODIGO	ROTURA (días)	ADITIVO (SI/NO)	AMBIENTE (Inv/Ver)	CONDICIONES DE CURADO	CARGA (KN)
SA BA D1-Inv	SI	1a	1	NO	INVIERNO	BALSA	59,1
SA BA D1-Inv	NO	2a	1	NO	INVIERNO	BALSA	59,5
SA BA D3-Inv	NO	3a	3	NO	INVIERNO	BALSA	490,0
SA BA D3-Inv	SI	4a	3	NO	INVIERNO	BALSA	527,1
SA BA D7-Inv	NO	5a	7	NO	INVIERNO	BALSA	684,7
SA BA D7-Inv	SI	6a	7	NO	INVIERNO	BALSA	681,4
SA AB D1-Inv	SI	7a	1	NO	INVIERNO	AMBIENTE	62,5
SA AB D1-Inv	NO	8a	1	NO	INVIERNO	AMBIENTE	54,7
SA AB D3-Inv	SI	9a	3	NO	INVIERNO	AMBIENTE	347,0
SA AB D3-Inv	NO	10a	3	NO	INVIERNO	AMBIENTE	353,7
SA AB D7-Inv	SI	11a	7	NO	INVIERNO	AMBIENTE	600,2
SA AB D7-Inv	NO	12a	7	NO	INVIERNO	AMBIENTE	605,7
SA PI S1-Inv	SI	-	-	NO	INVIERNO	ELEMENTO	-
SA PI S2-Inv	SI	-	-	NO	INVIERNO	ELEMENTO	-
CA BA D1-Inv	SI	1b	1	SI	INVIERNO	BALSA	109,7
CA BA D1-Inv	NO	2b	1	SI	INVIERNO	BALSA	109,5
CA BA D3-Inv	SI	3b	3	SI	INVIERNO	BALSA	460,2
CA BA D3-Inv	NO	4b	3	SI	INVIERNO	BALSA	504,0
CA BA D7-Inv	NO	5b	7	SI	INVIERNO	BALSA	654,5
CA BA D7-Inv	SI	6b	7	SI	INVIERNO	BALSA	665,4
CA AB D1-Inv	NO	7b	1	SI	INVIERNO	AMBIENTE	108,7
CA AB D1-Inv	SI	8b	1	SI	INVIERNO	AMBIENTE	107,5
CA AB D3-Inv	NO	9b	3	SI	INVIERNO	AMBIENTE	331,2
CA AB D3-Inv	SI	10b	3	SI	INVIERNO	AMBIENTE	317,2
CA AB D7-Inv	NO	11b	7	SI	INVIERNO	AMBIENTE	548,4
CA AB D7-Inv	SI	12b	7	SI	INVIERNO	AMBIENTE	549,2
CA PI S1-Inv	SI	-	-	SI	INVIERNO	ELEMENTO	-
CA PI S2-Inv	SI	-	-	SI	INVIERNO	ELEMENTO	-
SA BA D1-Ver	SI	1c	1	NO	VERANO	BALSA	333,5
SA BA D1-Ver	NO	2c	1	NO	VERANO	BALSA	339,6
SA BA D3-Ver	SI	3c	3	NO	VERANO	BALSA	511,1
SA BA D3-Ver	NO	4c	3	NO	VERANO	BALSA	527,0
SA BA D7-Ver	SI	5c	7	NO	VERANO	BALSA	597,8
SA BA D7-Ver	NO	6c	7	NO	VERANO	BALSA	670,3
SA AB D1-Ver	SI	7c	1	NO	VERANO	AMBIENTE	352,7
SA AB D1-Ver	NO	8c	1	NO	VERANO	AMBIENTE	339,4
SA AB D3-Ver	SI	9c	3	NO	VERANO	AMBIENTE	520,2
SA AB D3-Ver	NO	10c	3	NO	VERANO	AMBIENTE	505,0
SA AB D7-Ver	SI	11c	7	NO	VERANO	AMBIENTE	610,3
SA AB D7-Ver	SI	12c	7	NO	VERANO	AMBIENTE	634,1

SA PI S1- Ver	-	-	NO	VERANO	ELEMENTO	-
SA PI S2- Ver	-	-	NO	VERANO	ELEMENTO	-

### Cálculo de resistencia:

Se realiza el cálculo correspondiente de la resistencia de cada una de las probetas, correspondientes a la carga aplicada a las probetas cúbicas.



Figura 13: Ensayo de carga sobre probeta cuadrada. (Fuente propia)

- Dimensiones probeta cubica:

$$l = 0.15m$$

- Área aplicación de la carga (milímetros):

$$A = l^2$$

$$A = 0.15^2$$

$$A = 0.0225 \text{ m}^2 = 22500 \text{ mm}^2$$

- Resistencia (MPa):

$$\text{Resistencia} = Q/A$$

- Q: Carga aplicada (N).

Tabla 03: Cálculo de resistencia a compresión.

NOMBRE	¿SENSOR?	CODIGO	ROTURA (días)	ADITIVO (SI/NO)	AMBIENTE (Inv/Ver)	CONDICIONES DE CURADO	CARGA (KN)	RESISTENCIA (MPa)
SA BA D1-Inv	SI	1a	1	NO	INVIERNO	BALSA	59,1	2,627
SA BA D1-Inv	NO	2a	1	NO	INVIERNO	BALSA	59,5	2,644
SA BA D3-Inv	NO	3a	3	NO	INVIERNO	BALSA	490,0	21,778
SA BA D3-Inv	SI	4a	3	NO	INVIERNO	BALSA	527,1	23,427
SA BA D7-Inv	NO	5a	7	NO	INVIERNO	BALSA	684,7	30,431
SA BA D7-Inv	SI	6a	7	NO	INVIERNO	BALSA	681,4	30,284
SA AB D1-Inv	SI	7a	1	NO	INVIERNO	AMBIENTE	62,5	2,778
SA AB D1-Inv	NO	8a	1	NO	INVIERNO	AMBIENTE	54,7	2,431
SA AB D3-Inv	SI	9a	3	NO	INVIERNO	AMBIENTE	347,0	15,422
SA AB D3-Inv	NO	10a	3	NO	INVIERNO	AMBIENTE	353,7	15,720
SA AB D7-Inv	SI	11a	7	NO	INVIERNO	AMBIENTE	600,2	26,676
SA AB D7-Inv	NO	12a	7	NO	INVIERNO	AMBIENTE	605,7	26,920
SA PI S1-Inv	SI	-	-	NO	INVIERNO	ELEMENTO	-	-
SA PI S2-Inv	SI	-	-	NO	INVIERNO	ELEMENTO	-	-
CA BA D1-Inv	SI	1b	1	SI	INVIERNO	BALSA	109,7	4,876
CA BA D1-Inv	NO	2b	1	SI	INVIERNO	BALSA	109,5	4,867
CA BA D3-Inv	SI	3b	3	SI	INVIERNO	BALSA	460,2	20,453
CA BA D3-Inv	NO	4b	3	SI	INVIERNO	BALSA	504,0	22,400
CA BA D7-Inv	NO	5b	7	SI	INVIERNO	BALSA	654,5	29,089
CA BA D7-Inv	SI	6b	7	SI	INVIERNO	BALSA	665,4	29,573
CA AB D1-Inv	NO	7b	1	SI	INVIERNO	AMBIENTE	108,7	4,831
CA AB D1-Inv	SI	8b	1	SI	INVIERNO	AMBIENTE	107,5	4,778
CA AB D3-Inv	NO	9b	3	SI	INVIERNO	AMBIENTE	331,2	14,720
CA AB D3-Inv	SI	10b	3	SI	INVIERNO	AMBIENTE	317,2	14,098
CA AB D7-Inv	NO	11b	7	SI	INVIERNO	AMBIENTE	548,4	24,373
CA AB D7-Inv	SI	12b	7	SI	INVIERNO	AMBIENTE	549,2	24,409
CA PI S1-Inv	SI	-	-	SI	INVIERNO	ELEMENTO	-	-
CA PI S2-Inv	SI	-	-	SI	INVIERNO	ELEMENTO	-	-
SA BA D1-Ver		1c	1	NO	VERANO	BALSA	333,5	14,822
SA BA D1- Ver		2c	1	NO	VERANO	BALSA	339,6	15,093
SA BA D3- Ver		3c	3	NO	VERANO	BALSA	511,1	22,711
SA BA D3- Ver		4c	3	NO	VERANO	BALSA	527,0	23,422
SA BA D7- Ver		5c	7	NO	VERANO	BALSA	597,8	26,569
SA BA D7- Ver		6c	7	NO	VERANO	BALSA	670,3	29,791
SA AB D1- Ver		7c	1	NO	VERANO	AMBIENTE	352,7	15,676
SA AB D1- Ver		8c	1	NO	VERANO	AMBIENTE	339,4	15,084
SA AB D3- Ver		9c	3	NO	VERANO	AMBIENTE	520,2	23,111
SA AB D3- Ver		10c	3	NO	VERANO	AMBIENTE	505,0	22,444
SA AB D7- Ver		11c	7	NO	VERANO	AMBIENTE	610,3	27,124
SA AB D7- Ver		12c	7	NO	VERANO	AMBIENTE	634,1	28,182
SA PI S1- Ver		-	-	NO	VERANO	ELEMENTO	-	-
SA PI S2- Ver		-	-	NO	VERANO	ELEMENTO	-	-

HA-35 (SIN aditivo acelerador de fraguado) INVIERNO:

- Calibración:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0)\Delta t$$

Se realiza el cálculo correspondiente de la madurez

Tabla 04: Calibración mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante INVIERNO.

CODIGO	DIA	MADUREZ	LOG10(Mad)	RESISTENCIA (MPa)
7a	0,9421	13,5248	1,1311	2,60
1a	0,9343	13,2343	1,1217	2,64
4a	2,9825	63,5441	1,8031	22,60
6a	6,9920	162,3568	2,2105	30,36

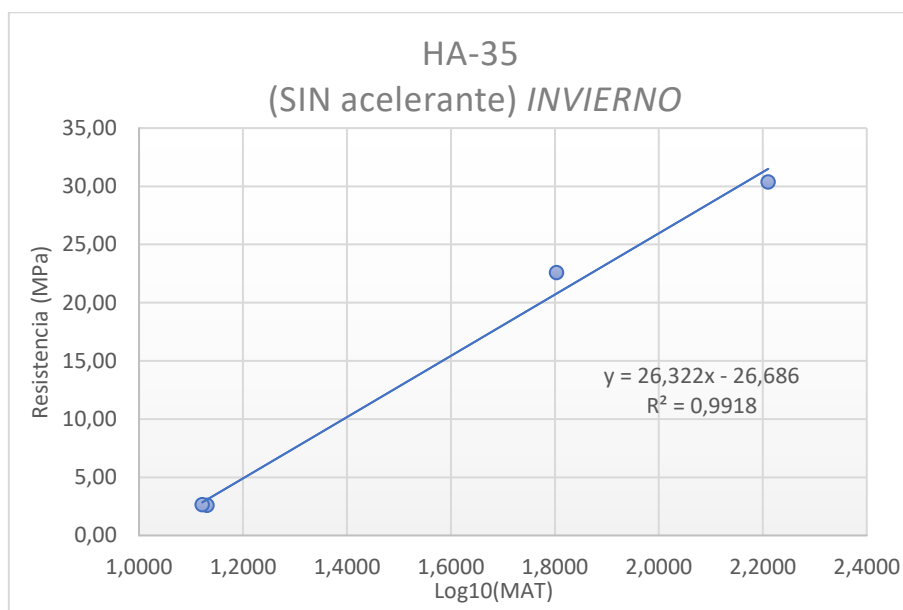


Figura 14: Gráfico calibración mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante INVIERNO (Fuente propia).

- Regresión lineal:

$$y = 26.322x - 26.686$$

$$a = 26.322$$

$$b = -26.686$$

- Comprobación:

$$\text{Resistencia} = (a * \log(M)) + b$$

$$\text{Resistencia} = (26.322 * \log(M)) - 26.686$$

Tabla 05: Comprobación con el método de la madurez (6a).

TIEMPO (Día)	TEMPERATURA (°C)	MADUREZ	RESISTENCIA (MPa)
0	15,8	0	0
1	15,3	13,425	3,003
2	25,1	39,244	15,265
3	24,8	64,281	20,906
4	24,2	88,511	24,563
5	24,2	112,674	27,322
6	25,3	136,956	29,553
7	23,2	162,357	31,498

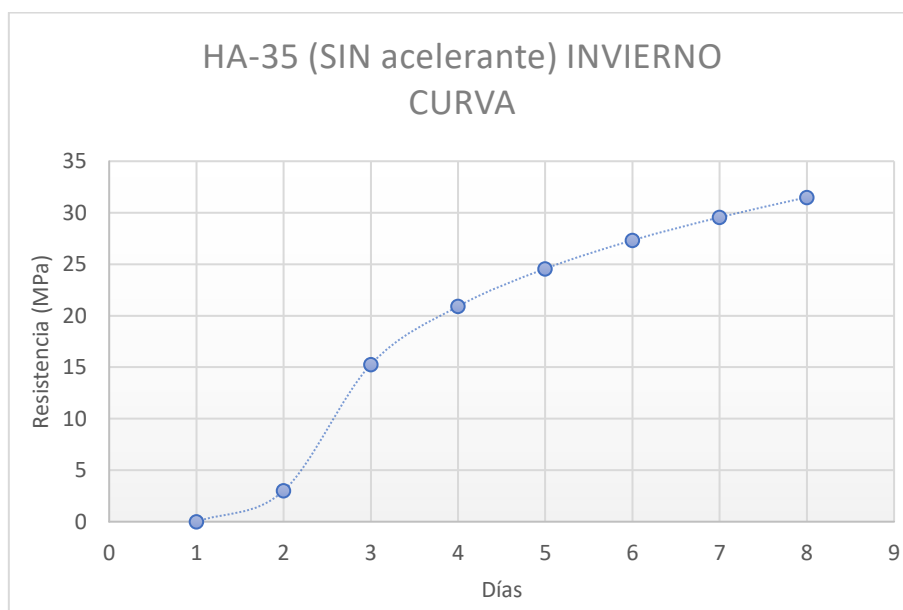


Figura 15: Gráfico curva hormigón HA-35 INVIERNO (Fuente propia).

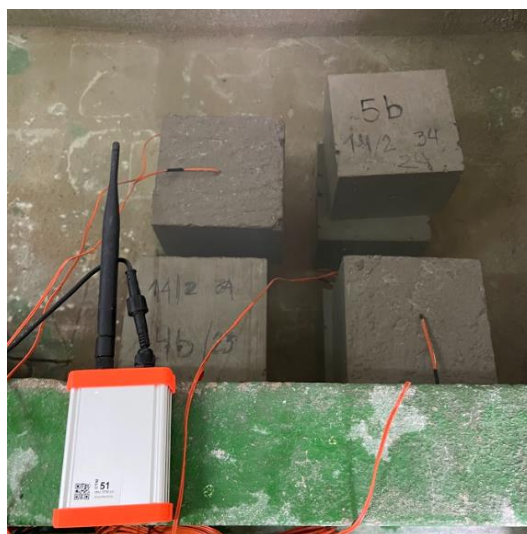


Figura 16: Probetas curadas en condiciones de laboratorio (Fuente propia).

○ Verificación:

Tabla 06: Verificación del método de la madurez.

CODIGO	RESISTENCIA PRENSA (MPa)	RESISTENCIA CALCULADA (MPa)	PORCENTAJE ERROR (%)
7a	2,60	3,003	15,5%
1a	2,64	3,003	13,7%
4a	22,60	20,906	7,5%
6a	30,36	31,498	3,7%

● Calibración inversa:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0)\Delta t$$

Se realiza el cálculo correspondiente de la madurez

Tabla 07: Calibración inversa mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante INVIERNO.

CODIGO	DIA	MADUREZ	LOG10(Mad)	RESISTENCIA (MPa)
7a	0,9421	13,5248	1,1311	2,60
1a	0,9343	13,2343	1,1217	2,64
4a	2,9424	39,2632	1,5940	15,57
6a	6,9334	95,5931	1,9804	26,80



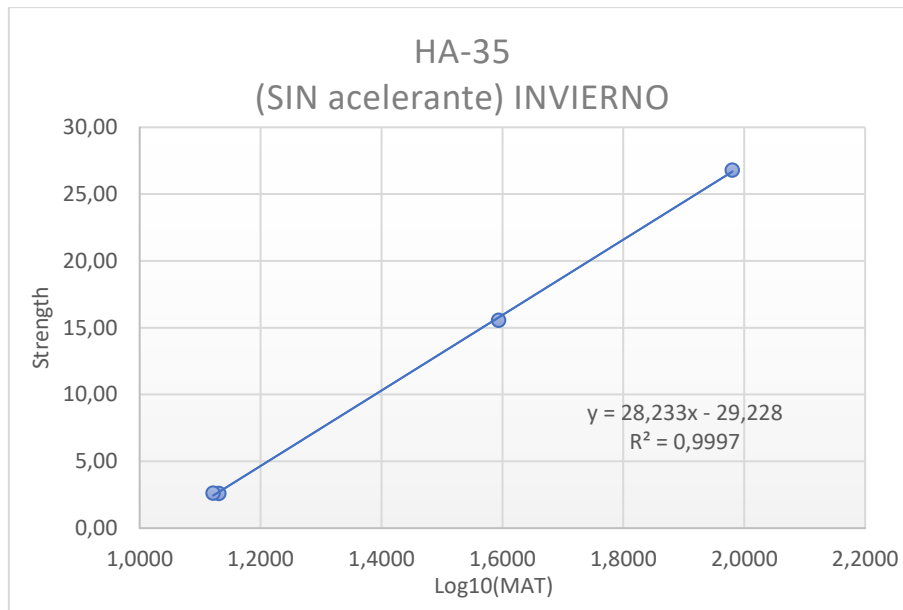


Figura 17: Gráfico calibración inversa mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante INVIERNO (Fuente propia).

- Regresión lineal:

$$y = 28.233 - 29.228$$

$$a = 28.233$$

$$b = -29.228$$

- Comprobación:

$$\text{Resistencia} = (a * \log(M)) + b$$

$$\text{Resistencia} = (28.233 * \log(M)) - 29.228$$

Tabla 08: Comprobación inversa con el método de la madurez (6a).

TIEMPO (Día)	TEMPERATURA (°C)	MADUREZ	RESISTENCIA (MPa)
0	15,7	0,000	0,000
1	15,1	14,270	3,365
2	13,4	27,884	11,579
3	13,6	40,740	16,228
4	12,8	53,358	19,536
5	14,0	66,525	22,240
6	16,0	80,981	24,651
7	16,3	95,593	26,685

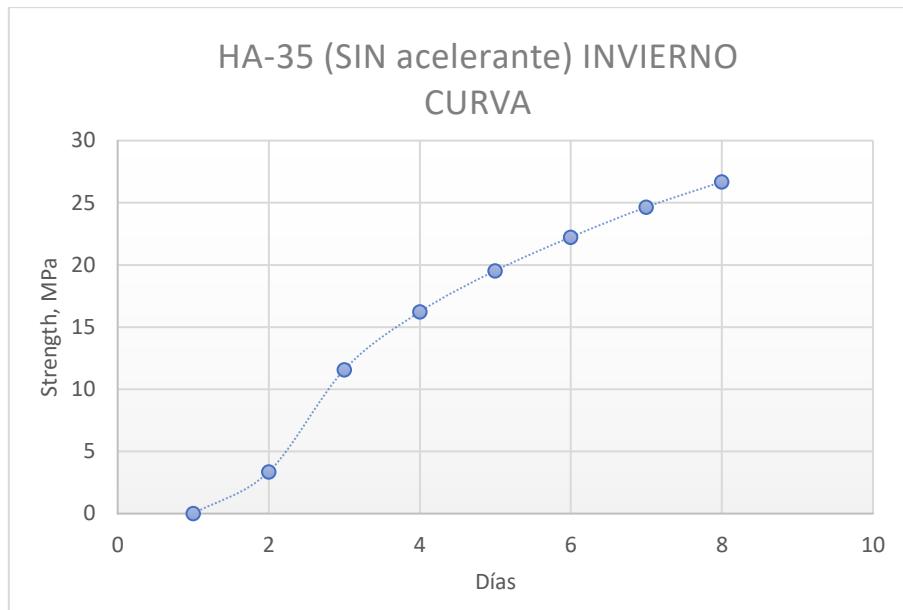


Figura 18: Gráfico curva hormigón HA-35 INVIERNO inversa (Fuente propia).

o Verificación:

Tabla 09: Verificación del método de la madurez.

<b>CODIGO</b>	<b>RESISTENCIA PRENSA (MPa)</b>	<b>RESISTENCIA CALCULADA (MPa)</b>	<b>PORCENTAJE ERROR (%)</b>
<b>7a</b>	2,60	3,36	29,4%
<b>1a</b>	2,64	3,36	27,4%
<b>4a</b>	15,57	16,23	4,2%
<b>6a</b>	26,80	26,69	0,4%

- Aplicación del método de la madurez:
  - o Probetas curadas en condiciones ambientales:

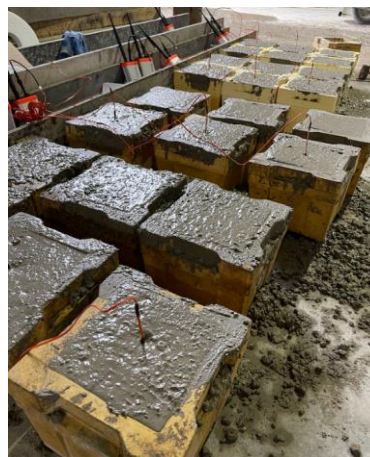


Figura 19: Probetas curadas en condiciones ambientales (Fuente propia).

Tabla 10: Verificación del método de la madurez (probetas de hormigón).

TIEMPO (Día)	PROBETA 11a Temperatura/Resistencia	ENSAYO COMPRESIÓN
0	15,70	0,00
1	15,10	3,70
2	13,40	11,36
3	13,60	15,69
4	12,80	18,78
5	14,00	21,30
6	16,00	23,55
7	16,30	25,44

Tabla 11: Verificación del método de la madurez calibración inversa (probetas de hormigón).

TIEMPO (Día)	PROBETA 6a Temperatura/Resistencia	ENSAYO COMPRESIÓN
0	15,80	0,00
1	15,30	2,62
2	25,10	15,77
3	24,80	21,82
4	24,20	25,74
5	24,20	28,70
6	25,30	31,09
7	23,20	33,18

- Piezas de hormigón en condiciones de factoría:



Figura 20: Pieza de hormigón en condiciones de factoría (Fuente propia).

Tabla 12: Verificación del método de la madurez (piezas de hormigón).

TIEMPO (Día)	PIEZA 1 (SA PI S1)		PIEZA 2 (SA PI S2)		ENSAYO COMPRESIÓN
	Temperatura	Resistencia	Temperatura	Resistencia	
0	15,70	0,00	15,70	0,00	
1	19,80	5,39	18,70	4,85	2,60
2	15,90	14,17	15,10	13,57	
3	13,90	18,14	13,30	17,57	15,57
4	13,40	20,86	12,90	20,32	
5	14,20	23,10	13,80	22,59	
6	15,50	25,13	15,20	24,66	
7	15,80	26,44	15,40	26,01	26,80

Tabla 13: Verificación del método de la madurez calibración inversa (piezas de hormigón).

TIEMPO (Día)	PIEZA 1 (SA PI S1)		PIEZA 2 (SA PI S2)		ENSAYO COMPRESIÓN
	Temperatura	Resistencia	Temperatura	Resistencia	
0	15,70	0,00	15,70	0,00	
1	19,80	5,18	18,70	4,60	2,60
2	15,90	14,59	15,10	13,96	
3	13,90	18,85	13,30	18,24	15,57
4	13,40	21,77	12,90	21,19	
5	14,20	24,18	13,80	23,63	
6	15,50	26,35	15,20	25,84	
7	15,80	27,75	15,40	27,29	26,80

HA-35 (CON aditivo acelerador de fraguado) INVIERNO:

- Calibración:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \Delta t$$

Se realiza el cálculo correspondiente de la madurez

Tabla 14: Calibración mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante INVIERNO.

CODIGO	DIA	MADUREZ	LOG10(Mad)	RESISTENCIA (MPa)
8b	0,9002	14,1275	1,1501	4,80
1b	0,9168	14,3691	1,1574	4,87
3b	2,9947	65,9146	1,8190	21,43
6b	6,9596	160,1183	2,2044	29,33

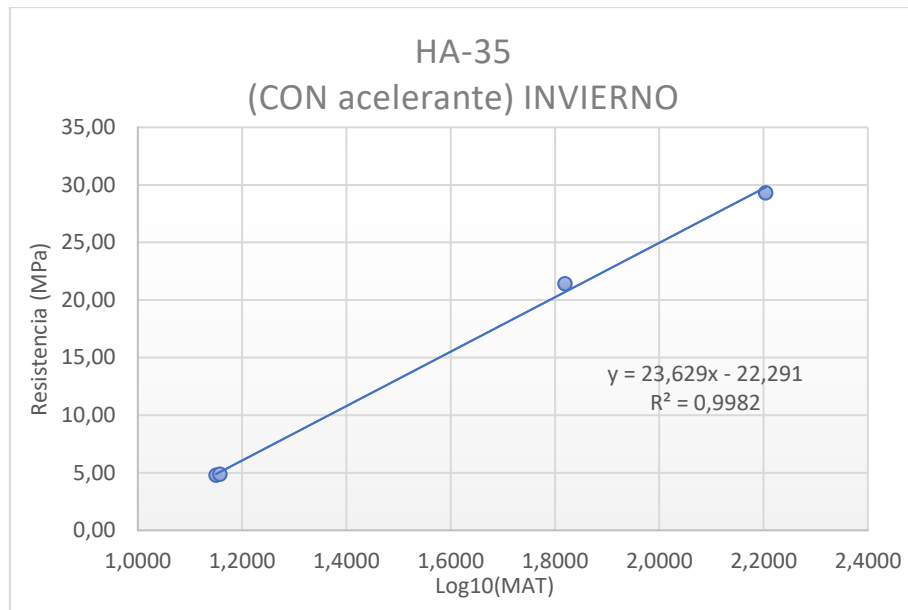


Figura 21: Gráfico calibración mezcla de hormigón HA-35 con acelerante INVIERNO (Fuente propia).

- Regresión lineal:

$$y = 23.629x - 22.291$$

$$a = 23.629$$

$$b = -22.291$$

- Comprobación:

$$Resistencia = (a * \log(M)) + b$$

$$Resistencia = (23.629 * \log(M)) - 22.291$$

Tabla 15: Comprobación con el método de la madurez (6b).

TIEMPO (Día)	TEMPERATURA (°C)	MADUREZ	RESISTENCIA (MPa)
0	15,9	0,000	0,000
1	17,7	15,746	5,997
2	24,8	40,163	15,606
3	24,3	64,948	20,538
4	23,9	88,409	23,703
5	23,6	112,377	26,164
6	24,8	135,973	28,120
7	23,5	160,118	29,798

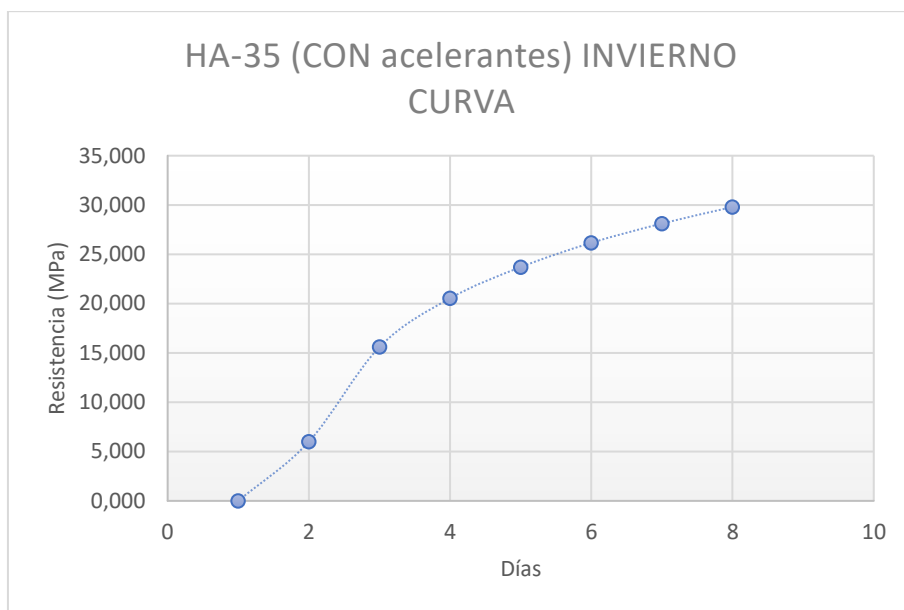


Figura 22: Gráfico curva hormigón HA-35 (Fuente propia).

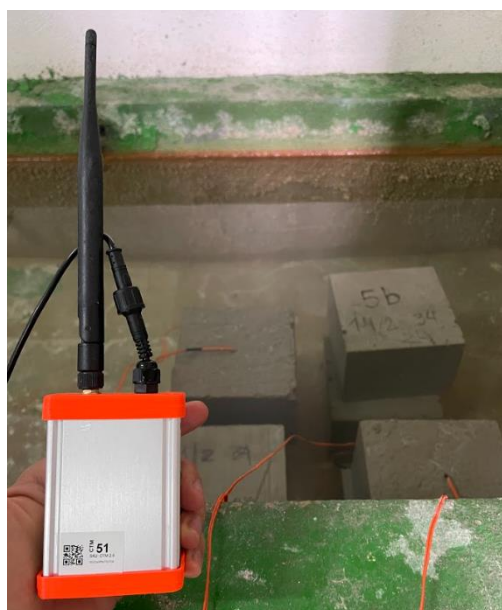


Figura 23: Probetas curadas en condiciones de laboratorio (Fuente propia).

o Verificación:

Tabla 16: Verificación del método de la madurez.

CODIGO	RESISTENCIA PRENSA (MPa)	RESISTENCIA CALCULADA (MPa)	PORCENTAJE ERROR (%)
<b>8b</b>	4,80	5,997	24,9%
<b>1b</b>	4,87	5,997	23,1%

<b>3b</b>	21,43	20,538	4,2%
<b>6b</b>	29,33	29,798	1,6%

- Calibración inversa:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \Delta t$$

Se realiza el cálculo correspondiente de la madurez

Tabla 17: Calibración inversa mezcla de hormigón HA-35 con acelerante INVIERNO.

<b>CODIGO</b>	<b>DIA</b>	<b>MADUREZ</b>	<b>LOG10(Mad)</b>	<b>RESISTENCIA (MPa)</b>
<b>8b</b>	0,9002	14,1275	1,1501	4,80
<b>1b</b>	0,9168	14,3691	1,1574	4,87
<b>10b</b>	2,9095	39,5097	1,5967	14,41
<b>12b</b>	6,8916	93,0345	1,9686	24,39

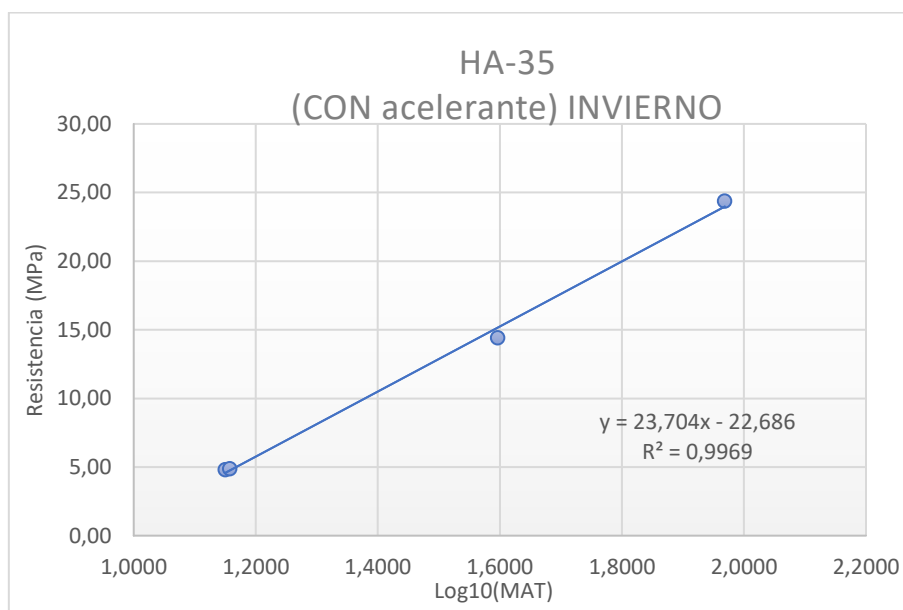


Figura 24: Gráfico calibración inversa mezcla de hormigón HA-35 con acelerante INVIERNO (Fuente propia).

- Regresión lineal:

$$y = 23.704x - 22.686$$

$$a = 23.704$$

$$b = -22.686$$

- Comprobación:

$$\text{Resistencia} = (a * \log(M)) + b$$

$$\text{Resistencia} = (23.704 * \log(M)) - 22.686$$

Tabla 18: Comprobación inversa con el método de la madurez (12b).

TIEMPO (Día)	TEMPERATURA (°C)	MADUREZ	RESISTENCIA (MPa)
0	16,5	0,000	0,000
1	14,4	15,709	5,668
2	13	28,182	11,684
3	12,8	40,304	15,367
4	12,7	52,416	18,072
5	14	65,271	20,330
6	16,2	79,446	22,353
7	16	93,035	23,979

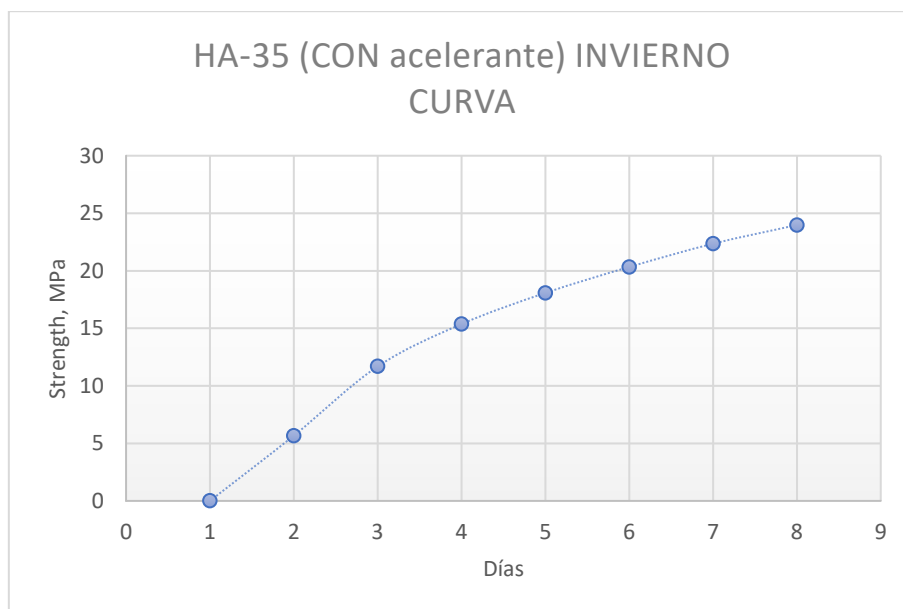


Figura 25: Gráfico curva hormigón HA-35 INVIERNO inversa (Fuente propia).



- Verificación:

Tabla 19: Verificación del método de la madurez.

<i>CODIGO</i>	<i>RESISTENCIA PRENSA (MPa)</i>	<i>RESISTENCIA CALCULADA (MPa)</i>	<i>PORCENTAJE ERROR (%)</i>
<b>8b</b>	4,80	5,67	18,1%
<b>1b</b>	4,87	5,67	16,4%
<b>10b</b>	14,41	15,37	6,6%
<b>12b</b>	24,39	23,98	1,7%

- Aplicación del método de la madurez:
  - Probetas curadas en condiciones ambientales:



Figura 26: Probetas curadas en condiciones ambientales (Fuente propia).

Tabla 20: Verificación del método de la madurez (probetas de hormigón).

<i>TIEMPO (Día)</i>	<i>PROBETA 12b Temperatura/Resistencia</i>	<i>ENSAYO COMPRESIÓN</i>
<b>0</b>	16,50	0,00
<b>1</b>	14,40	5,97
<b>2</b>	13,00	11,97
<b>3</b>	12,80	15,64
<b>4</b>	12,70	18,34
<b>5</b>	14,00	20,59
<b>6</b>	16,20	22,61
<b>7</b>	16,00	24,23

Tabla 21: Verificación del método de la madurez calibración inversa (probetas de hormigón).

TIEMPO (Día)	PROBETA 6b		ENSAYO COMPRESIÓN
	Temperatura/Resistencia		
0	15,90	0,00	
1	17,70	5,69	4,80
2	24,80	15,33	
3	24,30	20,28	14,41
4	23,90	23,45	
5	23,60	25,92	
6	24,80	27,89	
7	23,50	29,57	24,39

- Piezas de hormigón en condiciones de factoría:

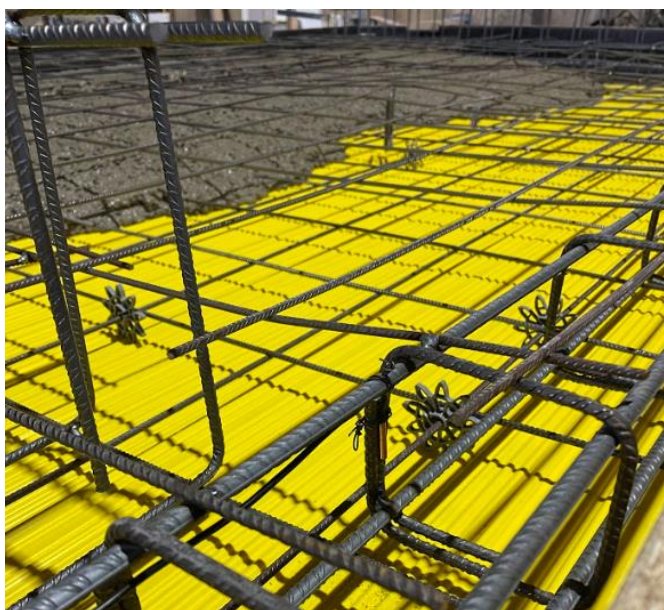


Figura 27: Pieza de hormigón en condiciones de factoría (Fuente propia).

Tabla 22: Verificación del método de la madurez (piezas de hormigón).

TIEMPO (Día)	PIEZA 1 (CA PI S1)		PIEZA 2 (CA PI S2)		ENSAYO COMPRESIÓN
	Temperatura/Resistencia		Temperatura/Resistencia		
0	16,50	0,00	16,50	0,00	
1	20,10	7,64	19,20	7,30	4,80
2	15,40	14,54	14,50	13,89	
3	14,70	18,17	14,00	17,53	14,41

4	13,60	20,70	13,20	20,06	
5	13,60	22,63	13,50	22,05	
6	14,30	23,61	13,90	23,07	
7	14,30	23,61	13,90	23,07	24,39

Tabla 23: Verificación del método de la madurez calibración inversa (piezas de hormigón).

TIEMPO (Día)	PIEZA 1 (CA PI S1) Temperatura/Resistencia		PIEZA 2 (CA PI S2) Temperatura/Resistencia		ENSAYO COMPRESIÓN
0	16,50	0,00	16,50	0,00	
1	20,10	7,34	19,20	7,00	4,80
2	15,40	14,26	14,50	13,61	
3	14,70	17,91	14,00	17,26	14,41
4	13,60	20,44	13,20	19,80	
5	13,60	22,37	13,50	21,79	
6	14,30	23,36	13,90	22,82	
7	14,30	23,36	13,90	22,82	24,39

HA-35 (SIN aditivo acelerador de fraguado) VERANO:

- Calibración:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \Delta t$$

Se realiza el cálculo correspondiente de la madurez

Tabla 24: Calibración mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante VERANO.

CODIGO	DIA	MADUREZ	LOG10(Mad)	RESISTENCIA (MPa)
7c	0,7929	29,5080	1,4699	15,38
1c	0,7914	29,1848	1,4652	14,96
3c	2,9979	88,5574	1,9472	23,07
5c	6,9162	194,6629	2,2893	28,18

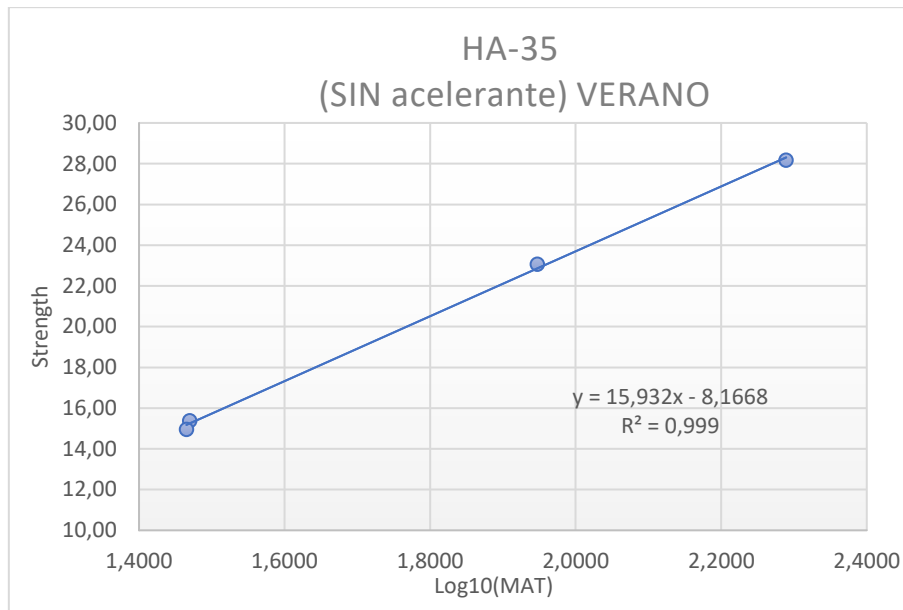


Figura 28: Gráfico calibración mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante VERANO (Fuente propia).

- Regresión lineal:

$$y = 15.932x - 8.1668$$

$$a = 15.932$$

$$b = -8.1668$$

- Comprobación:

$$\text{Resistencia} = (a * \log(M)) + b$$

$$\text{Resistencia} = (15.932 * \log(M)) - 8.1668$$

Tabla 25: Comprobación con el método de la madurez (Xc).

TIEMPO (Día)	TEMPERATURA (°C)	MADUREZ	RESISTENCIA (MPa)
0	34,1	0,000	0,000
1	27,6	34,947	16,423
2	27	61,950	20,384
3	26,8	88,924	22,885
4	26,7	115,749	24,709
5	27,9	142,616	26,153
6	27	169,959	27,367
7	26,8	194,663	28,306

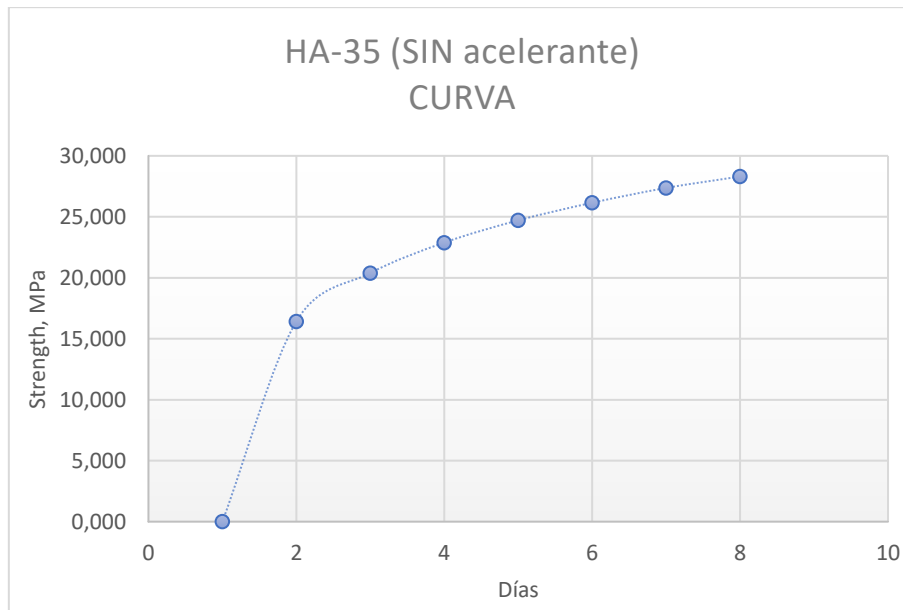


Figura 29: Gráfico curva hormigón HA-35 VERANO (Fuente propia).



Figura 30: Probetas curadas en condiciones de laboratorio (Fuente propia).

o Verificación:

Tabla 26: Verificación del método de la madurez.

CODIGO	RESISTENCIA PRENSA (MPa)	RESISTENCIA CALCULADA (MPa)	PORCENTAJE ERROR (%)
7c	15,38	16,423	6,8%
1c	14,96	16,423	9,8%
3c	23,07	22,885	0,8%
5c	28,18	28,306	0,4%

- Calibración inversa:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0)\Delta t$$

Se realiza el cálculo correspondiente de la madurez

Tabla 27: Calibración inversa mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante VERANO.

CODIGO	DIA	MADUREZ	LOG10(Mad)	RESISTENCIA (MPa)
7c	0,7929	29,5080	1,4699	15,38
1c	0,7914	29,1848	1,4652	14,96
9c	2,8605	90,0639	1,9546	22,38
11c	6,8548	203,1672	2,3079	27,65

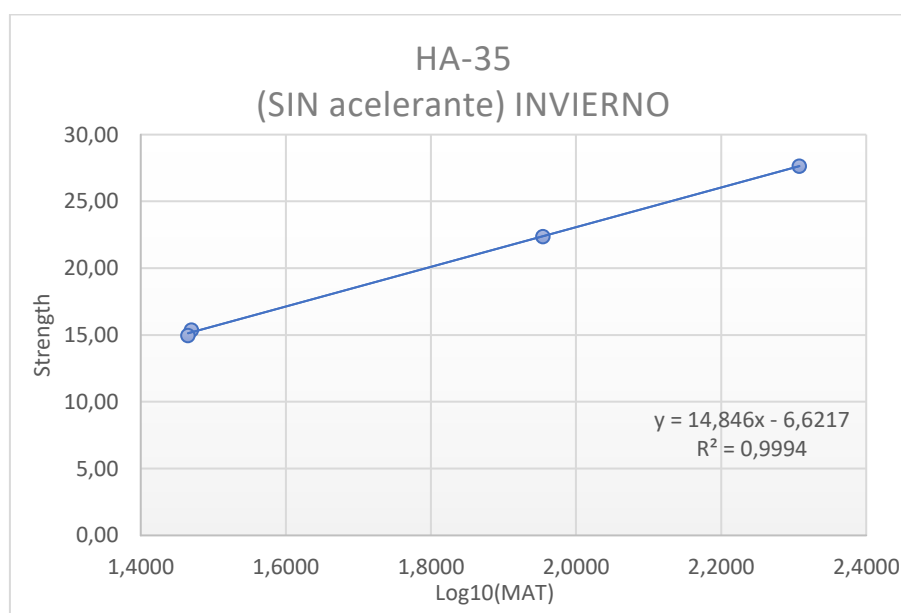


Figura 31: Gráfico calibración inversa mezcla de hormigón HA-35 sin acelerante VERANO (Fuente propia).

- Regresión lineal:

$$y = 14.846x - 6.6217$$

$$a = 14.846$$

$$b = -6.6217$$

- Comprobación:

$$\text{Resistencia} = (a * \log(M)) + b$$

$$\text{Resistencia} = (14.846 * \log(M)) - 6.6217$$

Tabla 28: Comprobación inversa con el método de la madurez (5c).

TIEMPO (Día)	TEMPERATURA (°C)	MADUREZ	RESISTENCIA (MPa)
0	34,3	0,000	0,000
1	29,6	34,933	16,289
2	29,4	63,454	20,138
3	28,9	92,336	22,556
4	30	121,551	24,329
5	30	150,677	25,714
6	28,2	178,549	26,808
7	29,1	203,167	27,641

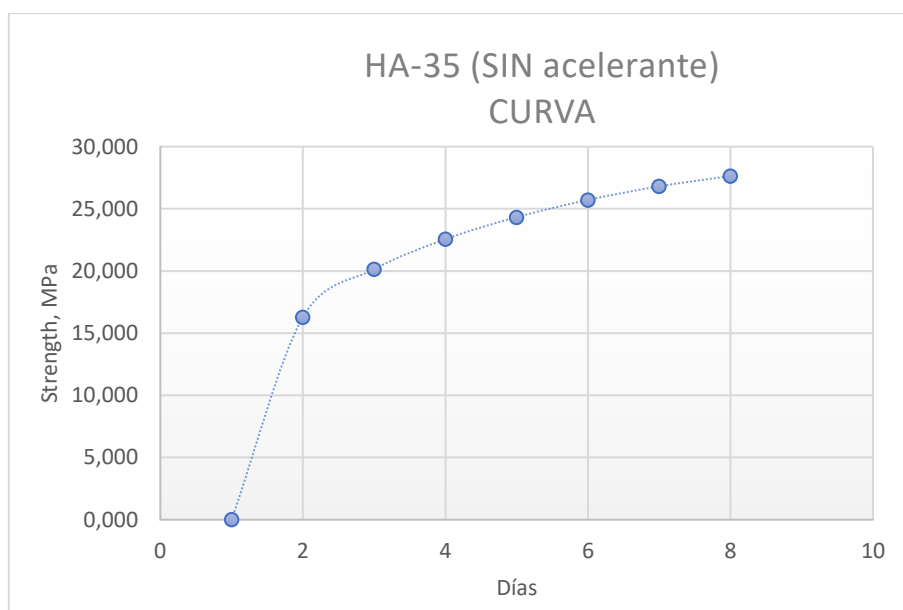


Figura 32: Gráfico curva hormigón HA-35 VERANO inversa (Fuente propia).

- Verificación:

Tabla 29: Verificación del método de la madurez.

CODIGO	RESISTENCIA PRENSA (MPa)	RESISTENCIA CALCULADA (MPa)	PORCENTAJE ERROR (%)
7c	15,38	16,29	5,9%

1c	14,96	16,29	8,9%
9c	22,38	22,56	0,8%
11c	27,65	27,64	0,0%

- Aplicación del método de la madurez:
  - Probetas curadas en condiciones ambientales:



Figura 33: Probetas curadas en condiciones ambientales (Fuente propia).

Tabla 30: Verificación del método de la madurez (probetas de hormigón).

TIEMPO (Día)	PROBETA 11c Temperatura/Resistencia	ENSAYO COMPRESIÓN
0	34,30	0,00
1	29,60	16,42
2	29,40	20,55
3	28,90	23,15
4	30,00	25,05
5	30,00	26,53
6	28,20	27,71
7	29,10	28,60

Tabla 31: Verificación del método de la madurez calibración inversa (probetas de hormigón).

TIEMPO (Día)	PROBETA 5c Temperatura/Resistencia	ENSAYO COMPRESIÓN
0	34,10	0,00



1	27,60	16,29	15,38
2	27,00	19,98	
3	26,80	22,31	22,78
4	26,70	24,01	
5	27,90	25,36	
6	27,00	26,49	
7	26,80	27,36	27,65

- Piezas de hormigón en condiciones de factoría:



Figura 34: Pieza de hormigón en condiciones de factoría (Fuente propia).

Tabla 32: Verificación del método de la madurez (piezas de hormigón).

TIEMPO (Día)	PIEZA 1 (SA PI S1) Temperatura/Resistencia		PIEZA 2 (SA PI S2) Temperatura/Resistencia		ENSAYO COMPRESIÓN
0	34,30	0,00	34,30	0,00	
1	32,70	17,99	33,00	17,94	15,38
2	28,10	21,51	28,20	21,49	
3	28,00	23,77	28,20	23,83	22,78
4	29,50	25,51	29,20	25,53	
5	29,20	26,92	28,60	26,45	
6	28,00	28,02	28,60	26,45	
7	28,20	28,88	28,60	26,45	27,65

Tabla 33: Verificación del método de la madurez calibración inversa (piezas de hormigón).

TIEMPO (Día)	PIEZA 1 (SA PI S1)		PIEZA 2 (SA PI S2)		ENSAYO COMPRESIÓN
	Temperatura/Resistencia		Temperatura/Resistencia		
0	34,30	0,00	34,30	0,00	
1	32,70	17,75	33,00	17,71	15,38
2	28,10	21,03	28,20	21,02	
3	28,00	23,14	28,20	23,20	22,78
4	29,50	24,76	29,20	24,78	
5	29,20	26,07	28,60	25,64	
6	28,00	27,10	28,60	25,64	
7	28,20	27,90	28,60	25,64	27,65

### Comparativa

Tabla 34: Verificación porcentual del método de la madurez calibración normalizada (piezas de hormigón).

TIEMPO (Día)	HA-35 Con aditivo (invierno)			HA-35 Sin aditivo (invierno)			HA-35 Sin aditivo (verano)		
	Resistencia (madurez)/Resistencia (probetas amb)/%error			Resistencia (madurez)/Resistencia (probetas amb)/%error			Resistencia (madurez)/Resistencia (probetas amb)/%error		
Probeta en condiciones de laboratorio (diferentes a la pieza)									
1	7,47	4,87	53,5%	5,12	2,64	94,0%	17,97	14,96	20,1%
3	17,85	21,43	16,7%	17,86	22,60	21,0%	23,90	23,07	3,2%
7	23,34	29,33	20,4%	26,23	30,36	13,6%	27,67	28,18	1,8%
Probeta en condiciones ambientales (iguales a la pieza)									
1	7,47	4,80	55,7%	5,12	2,60	97,0%	17,97	15,38	16,8%
3	17,85	14,41	23,9%	17,86	15,57	14,7%	23,90	22,78	4,5%
7	23,34	24,39	4,3%	26,23	26,80	2,2%	27,67	27,65	0,1%

Tabla 35: Verificación porcentual del método de la madurez calibración inversa (piezas de hormigón).

TIEMPO (Día)	HA-35 Con aditivo (invierno)			HA-35 Sin aditivo (invierno)			HA-35 Sin aditivo (verano)		
	Resistencia (madurez)/Resistencia (probetas amb)/%error			Resistencia (madurez)/Resistencia (probetas amb)/%error			Resistencia (madurez)/Resistencia (probetas amb)/%error		
Probeta en condiciones de laboratorio (diferentes a la pieza)									
1	7,17	4,87	47,3%	4,89	2,64	85,2%	17,73	14,96	18,5%
3	17,58	21,43	18,0%	18,54	22,60	17,9%	23,17	23,07	0,4%
7	23,09	29,33	21,3%	27,47	30,36	9,4%	26,77	28,18	5,0%



Probeta en condiciones ambientales (iguales a la pieza)									
1	7,17	4,80	49,5%	4,89	2,60	88,1%	17,73	15,38	15,3%
3	17,58	14,41	22,0%	18,54	15,57	19,1%	23,17	22,78	3,5%
7	23,09	24,39	5,3%	27,47	26,80	2,7%	26,77	27,65	3,2%



## Análisis de resultados

Como primera medida se pretende analizar los resultados obtenidos a nivel individual en cada uno de los tres tipos de hormigones calibrados y posteriormente evaluados, observándose que las calibraciones realizadas por medio de las probetas curadas en condiciones de laboratorio (método normalizado), y las realizadas por medio de las probetas curadas en condiciones ambientales, dan como resultados porcentajes de variación entre los dos métodos inferiores al diez por ciento, sin importar las condiciones ambientales o la inclusión o no de aditivos aceleradores de fraguado; aun sabiendo esto, se observa en todos los casos estudiados, que a edades de 24 horas de fraguado los porcentajes son más bajos con la calibración inversa, pero sin ser representativo, pues la variación es mínima.

El comportamiento térmico de dos mezclas de hormigón exactamente iguales, adicionando a una un aditivo acelerador de fraguado, se ve representado en la curva de desarrollo térmico con un desarrollo rápido de la temperatura, obteniendo su cresta a una misma temperatura, pero con la diferencia de ciertas horas en su desarrollo, evidenciando que la función del aditivo es la de acelerar la reacción química, sin que esto se represente en la obtención de más temperatura máxima.

Al comparar el método tradicional de rotura de probetas en condiciones de laboratorio, que es el método que está normalizado, con el método de la madurez, se pudo observar que los porcentajes de error son más altos que cuando se comparó el método de madurez con la probeta que se encontraba curando en las mismas condiciones ambientales que la pieza de hormigón, aun sabiendo que esta se ve afectada debido a la diferencia de volúmenes de hormigón, llevando a que se encuentre menos incertidumbre en el método de madurez que en el método tradicional, pues casi en la totalidad de las edades y los casos analizados los porcentajes de error son menores.

Se pudo establecer en todos los casos, que los porcentajes de variación entre la resistencia obtenida por medio del método de la madurez y la obtenida por medio del método tradicional de rotura de probetas, van disminuyendo a medida que va aumentando el tiempo de fraguado, evidenciando que el método de la madurez no es un método preciso a edades de veinticuatro horas, no obstante esta precisión varía dependiendo de las condiciones del hormigón, y de las condiciones ambientales, pues se evidencia que a mayor sean las temperaturas de curado en las primeras horas, va aumentando la precisión del método de la madurez a estas edades; además de que las condiciones de la mezcla, como lo son los aditivos aceleradores de fraguado, quienes ocasionan un aumento en la velocidad del desarrollo de las temperaturas de fraguado, pues esta reacción química que se genera dentro del hormigón aumenta, disminuyendo a su vez los porcentajes de error del método de la madurez.

En la totalidad de los casos evaluados, al comparar los resultados obtenidos entre el método de la madurez y la rotura de probetas curadas en las mismas condiciones ambientales que la pieza de hormigón, los porcentajes de variación entre los resultados obtenidos a una edad de 7 días fueron menores a un seis por ciento, evidenciando una gran precisión en el método de la madurez a esta edad.

Se puede evidenciar como las condiciones ambientales influyen de manera directa en la evolución de la resistencia del hormigón, convirtiéndose en un factor muy importante, así como lo especifica la normativa EHE en su tabla 74, "*Periodos de desencofrado y descimbrado de*



*elementos de hormigón armado*”, en la cual especifica tiempos de espera para los diferentes procesos constructivos, pero el método de madurez es más preciso y tiene en cuenta factores directos de la mezcla, que como se puede apreciar en el hormigón que posee el aditivo acelerador de fraguado afectan directamente a su evolución.



## Conclusiones

- El método de la madurez es un método que se encuentra estipulado en ciertas normativas como complementario, y que en ningún caso puede sustituir al ensayo a compresión del hormigón, a excepción de algunas normativas en las cuales ya ha sido estipulado como un método sustituto debido a sus grandes virtudes.
- El método de la madurez es una alternativa de control en las estructuras de hormigón muy competente, pues presenta resultados en tiempo real, teniendo en cuenta los factores reales de curado de la estructura, llevando a obtener resultados más precisos que el método tradicional de las probetas (ensayo a compresión), aun sabiendo que en la mayoría de los países no está normalizado, o solo se encuentra como un método de control complementario pero que no es de obligatorio cumplimiento.
- La adición de un aditivo acelerador de fraguado en una mezcla de hormigón se ve interpretada con un desarrollo de temperatura acelerado en la mezcla, llegando a su cresta térmica antes que una mezcla sin aditivos de este tipo, encontrándose en las mismas condiciones ambientales.
- La temperatura ambiental influye directamente en el desarrollo de la resistencia, pues a mayor temperatura ambiental inicial, mayor aumento de las resistencias a edades tempranas, presentándose curvas que en su desarrollo inicial presentan pendientes pronunciadas, pero que con el tiempo cae el desarrollo de la misma, contrario a hormigones que en sus edades tempranas están expuestos a temperaturas más bajas, y presentan curvas con pendientes menos pronunciadas pero más constantes en el tiempo, llegando a desarrollos de resistencias un poco mayores en muchos de esos casos.
- El método normalizado para la calibración de las curvas específicas del método de la madurez es el ensayo de probetas curadas en condiciones de laboratorio, sin embargo, si se calibra por medio de probetas curadas en condiciones no controladas, los resultados obtenidos no son significativamente diferentes, presentándose variaciones mínimas en los casos analizados.
- Para obtener una mayor precisión a la hora de monitorizar un hormigón por medio del método de la madurez, es recomendable la realización de mínimo dos calibraciones, una en verano y una en invierno, pues las primeras horas de fraguado del hormigón influyen de manera representativa en la mezcla, pudiendo obtener mejores resultados en las primeras horas del vertido de las piezas de hormigón.



## Futuras líneas de investigación

- Realizar la comprobación por medio de otra formulación del método de la madurez diferente a Nurse-Saul, como lo es el método de Arrhenius, con la diferencia de que este método incluye la energía de activación.
- Realizar comprobaciones de hormigones calibrados en diferentes épocas del año, con el fin de comprobar un hormigón calibrado en invierno, fraguado en verano y un hormigón calibrado en verano y fraguado en invierno.



## Referencias

- ACI. (1 de 1 de 2003). ACI 228.1R-03. *In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*. USA: ACI.
- AENOR. (2009). EN 13670:2009. *Ejecucion de estructuras de hormigon*. Madrid, Madrid, España.
- ASTM. (1998). C 1074 - 98. *Standard Practice for Estimating Concrete Strength by teh Maturity Method*. USA: ASTM.
- ASTM. (2002). C 192/C 192M -02. *Standard Practice for Making and Curing Concret Specimens inthe Laboratory*. USA: ASTM.
- Castro-Garrido, M. C.-G. (01 de 2016). Aplicacion del metodo de la madurez para la estimacion del plazo de descimbrado de forjados construidos con sistemas industrializados. *Informes de la Construcción*.
- Command center concrete. (s.f.). <https://www.commandcenterconcrete.com/>. Obtenido de <https://www.commandcenterconcrete.com/es/educacion/que-es-la-madurez-del-concreto/#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20de%20la%20madurez%2C%20m%C3%A1s%20com%C3%BAmente%20conocida%20como%20%E2%80%9Cmadurez,a%20valore s%20de%20resistencia%20reales>.
- fomento, M. d. (2011). EHE-08 . *Instruccion de Hormigon Estructural*. España.
- Hmong. (s.f.). *hmong.es*. Obtenido de [https://hmong.es/wiki/Skyline\\_Towers\\_Building#title](https://hmong.es/wiki/Skyline_Towers_Building#title)
- Moreno, M. B. (30 de 07 de 2014). DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA DE APOYO AL CÁLCULO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE CIMBRADO/DESCIMBRADO DE EDIFICIOS EN ALTURA HORMIGONADOS IN SITU. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO APLICANDO TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA. Valencia, Valencia, España.
- Yepes, V. (05 de 04 de 2018). *Blogs UPV*. Obtenido de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/04/25/cimbrado-recimbrado-clareado-y-descimbrado-de-plantas-consecutivas/>