

# RESISTENCIA A COMPRESION DEL HORMIGON DE CEMENTO PORTLAND EN UNA ESTRUCTURA DETERMINADA POR MADUREZ

Autor: Darío M. Wendler, Tutor: Jorge D. Sota

Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Concordia – Grupo GIICMA.  
Salta 277 – Concordia, Entre Ríos. [dariomartinw@gmail.com](mailto:dariomartinw@gmail.com); [jdsota@gmail.com](mailto:jdsota@gmail.com)

## Resumen

En este trabajo se desarrolla un sistema de medida de la temperatura del hormigón en una estructura desde las primeras horas de su hidratación hasta los 28 días, con un equipo desarrollado en la Facultad.

El diseño del sistema incluye una serie de sensores de temperatura conectados a un microcontrolador. El mismo lee de los sensores las temperaturas a intervalos prefijados y los registra. Un programa ejecutado por una computadora de lectura permanente, los almacena en una interface, permitiendo su procesamiento.

En las experiencias se trabajó con un hormigón de 20 MPa de resistencia, con un cemento CPC40 según Norma IRAM 50000).

Previamente se realizan ensayos de resistencia en probetas cilíndricas para establecer la relación con las lecturas de temperaturas, procesadas, empleando las expresiones de Nurse-Saul y de Arrhenius.

Los resultados permitieron determinar la curva de madurez del hormigón estudiado y establecer el grado de madurez en cada una de las partes analizadas de la estructura, las cuales son las bases de fundación de la misma.

Palabras Clave: Madurez, hormigón, resistencia, edad, temperatura

## Introducción

### ¿Qué es la madurez del hormigón?

El concepto de madurez utiliza el principio en que la resistencia del hormigón (y otras propiedades) está directamente relacionada con la edad y el desarrollo de su temperatura. A medida que pasa el tiempo, se produce la hidratación del cemento con la consecuente liberación de calor, lo que aumenta la temperatura interna del hormigón el avance en la hidratación del cemento. Los métodos de madurez proveen una aproximación relativamente simple para estimar de manera confiable la resistencia a compresión (y flexión) del hormigón a edad temprana (14 días o menos) en el sitio durante la construcción. El concepto de madurez, expresa que las muestra de hormigón que tengan la misma madurez, tendrán resistencias similares, independientemente de la combinación de tiempo y temperatura con la que se alcance la madurez.

### ¿Por qué utilizar los métodos de madurez?

Los métodos de madurez son utilizados como un indicador más confiable de la resistencia del hormigón en el sitio de la construcción, en vez de los ensayos a compresión de las probetas cilíndricas curadas en obra.

¿Por qué se dice que la estimación de resistencia con los métodos de madurez es más real que con probetas cilíndricas ensayadas a compresión (método tradicional)? Primeramente, cabe señalar que los volúmenes de hormigón intervinientes en las mediciones de madurez in situ son mucho mayores que el volumen de una probeta cilíndrica, por lo que el calor de hidratación generado en estos grandes volúmenes es mayor que el generado en una probeta cilíndrica, por lo que la tasa de ganancia de resistencia también es mayor. Como segundo punto, se debe considerar las condiciones de curado de las probetas, las cuales no suelen ser exactamente las mismas que las de los elementos estructurales analizados. Además, el método de madurez, de alguna manera, mide sobre el hormigón, con la condición real en que haya sido colado y compactado en el elemento estructural. Por otra parte, no es un ensayo destructivo.

Con los métodos de estimación de madurez la información es suministrada en tiempo real, dado que las mediciones de madurez son realizadas en el sitio en cualquier momento. Como resultado, se optimiza el flujo de trabajo en la construcción, y la programación de las actividades de construcción se pueden basar en una información de resistencia en el sitio más precisa.

## Desarrollo

El método de madurez proporciona un medio simple y útil de estimar la ganancia de resistencia del hormigón a edades tempranas (generalmente menores de 14 días).

Este método reconoce el efecto combinado del tiempo y la temperatura, proporcionando una base para estimar el desarrollo de resistencia del hormigón "in situ" mediante el control de la temperatura y el tiempo. [1]

Los efectos del tiempo y la temperatura en el aumento de la resistencia del hormigón se cuantifican mediante una función de madurez, que es indicativa del nivel de resistencia desarrollado por el hormigón. Las dos funciones de madurez utilizadas para este propósito son la de Nurse-Saul y la de Arrhenius. [2]

La función de Nurse-Saul, desarrollada en la década del '50 y la más ampliamente aceptada para medir la madurez, es el producto acumulado de tiempo y temperatura (Ec. 1).

$$M(t) = \sum (T_a - T_o) \Delta t \quad (1)$$

Donde:

M (t) = madurez (factor temperatura-tiempo) a la edad t, en °C.días o °C.horas,

$\Delta t$  = intervalo de tiempo, en días u horas,

T<sub>a</sub> = temperatura promedio del hormigón durante el intervalo  $\Delta t$ , en °C, y

T<sub>o</sub> = temperatura de referencia, en °C.

La temperatura de referencia es la temperatura en que cesa la ganancia de resistencia del hormigón; por lo tanto, los períodos durante los cuales las temperaturas son iguales o menores a esta temperatura de referencia, no contribuyen al aumento de la resistencia. Generalmente, se utiliza un valor de -10 °C para la temperatura de referencia en la ecuación de Nurse-Saul.

La madurez también puede ser determinada mediante el método de Arrhenius, que considera la no linealidad en la tasa de hidratación del cemento. El método de Arrhenius produce un índice de madurez en términos de una "edad equivalente", que representa el tiempo de curado equivalente, a una temperatura de referencia, generalmente 20°C, requerida para producir una madurez igual a la alcanzada durante un período de curado a temperaturas diferentes a la temperatura de referencia ( Ec. 2).

$$t_e = \sum e^{-Q \left( \frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s} \right) \Delta t} \quad (2)$$

Donde:

t<sub>e</sub> = edad equivalente a una temperatura de referencia T<sub>s</sub>, en días u horas,

Q = energía de activación dividida por la constante general de los gases, en K,

T<sub>a</sub> = temperatura promedio del hormigón durante el intervalo  $\Delta t$ , en K,

T<sub>s</sub> = temperatura de referencia, en K y

La ecuación de Arrhenius es una mejor representación de la función temperatura-tiempo que la ecuación de Nurse-Saul, cuando se espera una amplia variación en la temperatura del hormigón. Además, el enfoque de Nurse-Saul es limitado en función de asumir que la tasa de ganancia de resistencia es una función lineal. Sin embargo, la fórmula de Nurse-Saul es más ampliamente

utilizada, principalmente debido a su simplicidad. Ambas funciones de madurez se consideran en la Norma ASTM C 1074. [3]

Debido a que la madurez es dependiente sólo de la historia del tiempo y la temperatura del hormigón, los requisitos más básicos de equipo para determinar la madurez son un termómetro y un reloj. Sin embargo, con los años, se han desarrollado varios dispositivos de madurez que monitorean y registran automáticamente las temperaturas del hormigón en función del tiempo. Estos dispositivos se conectan a termocuplas embebidas en el hormigón y pueden computar la madurez por la ecuación de Nurse-Saul y la ecuación de Arrhenius, a intervalos definidos.[4]

En el caso del presente trabajo se ha desarrollado un prototipo de equipo de medición conjuntamente con un software, con el fin de desarrollar las experiencias. [5]

## Metodología

Se desarrolló un equipamiento de medición y se complementó con el software que permitió manejar los datos obtenidos. El diseño del sistema incluye una serie de sensores de temperatura conectados a una minicomputadora, registrando además la temperatura sobre la superficie del hormigón (Figura 1). La misma lee de los sensores las temperaturas a intervalos prefijados y los registra. Un programa realiza una lectura permanente de la información generada que luego almacena en una base de datos, permitiendo su procesamiento empleando las expresiones de Nurse-Saul para cálculo de madurez y/o de Arrhenius. La forma de introducir los sensores en la masa de hormigón, fue a través de varillas de acero, sujetándolos en uno de sus extremos y penetrando dicha masa (Figura 2). Los termómetros digitales usados se muestran en la Figura 3.

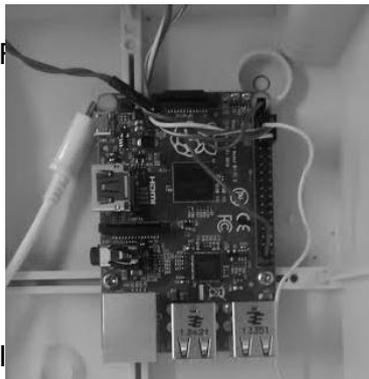


Figura 1 – Microcomputadora (Raspberry Pi B+)



Figura 2 – Sensores



Figura 3 – Termómetros digitales

Se estudiaron los hormigones de bases de una estructura de ampliación de los laboratorios de la Facultad, monitoreando el desarrollo de la resistencia con la medida de la madurez de los hormigones, con sensores colocados en las mismas. Figura 4 a) y 4 b).



Figura 4 a) – Colocación de sensores



Figura 4 b) – Colocación de sensores

Para la dosificación del hormigón se utilizó un cemento portland CPC-40, arena silícea gruesa de una cantera de la zona como agregado fino, canto rodado silíceo tamaños 1:3 y 1:2 como agregado grueso. Se le adiciono a la mezcla un aditivo superfluidificante. Las características de los agregados se informan en la Tabla 1.

Tabla 1 – Características de los agregados

Material	Módulo de finura	Tamaño Máximo	P.U. de Volumen
Arena silícea gruesa	2,69	--	1, 5
Canto Rodado 1:3 cm	7,26	1 “	1, 7
Canto Rodado 1:2 cm	6,70	3/4”	1, 6

La dosificación del hormigón utilizado se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2 – Dosificación del hormigón utilizado en las experiencias

Material	P.e (g/cm <sup>3</sup> )	Volumen (litros)	Peso (kg)
Agua	1	158	158
Cemento	3,11	101	315
Arena silícea gruesa	2,62	309	811
Canto Rodado 1:2	2,66	167	444
Canto Rodado 1:3	2,67	249	666
Aditivo	2,5 kg./ m <sup>3</sup>		
Aire (%)	2		
Asentamiento (cm)	10		
Resistencia promedio a las 28 días	25 MPa		

Se confeccionaron probetas cilíndricas de 15x30 para determinar la resistencia a las diferentes edades estudiadas. Las mismas figuran en los gráficos.

Las mediciones de temperatura se efectuaron sobre las bases 3, 7 y 10 de la estructura.

Los ensayos de resistencia se realizaron con una Prensa Automática Digital PILOT 4 (Controls de Italia) de 200 tn de capacidad; con visualización gráfica en tiempo real de los datos del ensayo, la curva de carga/tiempo y la velocidad de carga real así como visualización simultánea de la carga, tensión y velocidad de carga real en función de las cargas o de las tensiones.

Las probetas ensayadas se mantuvieron en el ambiente de las bases en las que se realizaban las mediciones durante la experiencia.

## Resultados

Obtenidos los datos de resistencia en los ensayos de compresión de las probetas y los de temperatura con el equipo diseñado para estas experiencias (colocado en las bases), se procedió a correlacionar estos a los tiempos parciales utilizados. (Datos del madurómetro y resistencia a la misma edad).

Se utilizó la fórmula de Nurse-Saul - Madurez ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ) para las variables, tiempo, temperatura y resistencia.

Los resultados se informan en las Figuras 6 a 9, los mismos corresponden a los valores medidos en estas experiencias.

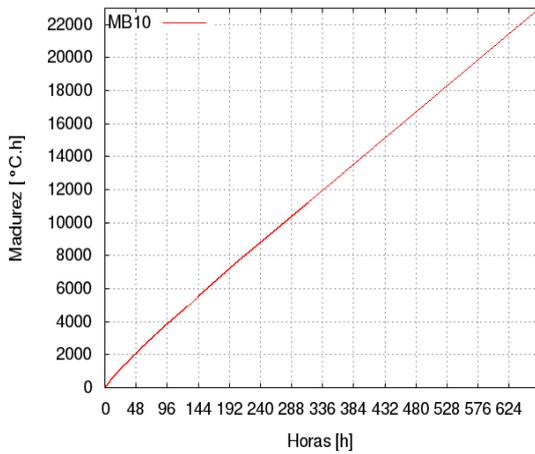


Figura 6 - Tiempo vs madurez

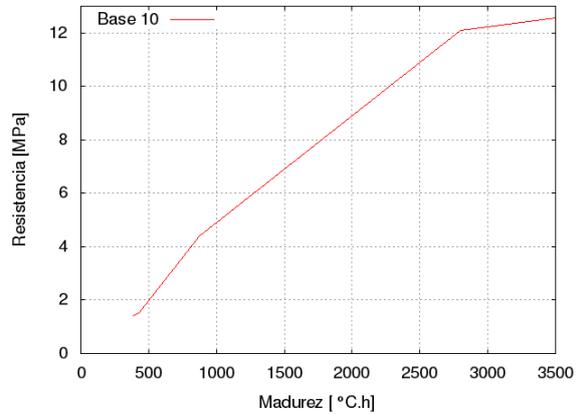


Figura 7 - Resistencia vs madurez Base 10

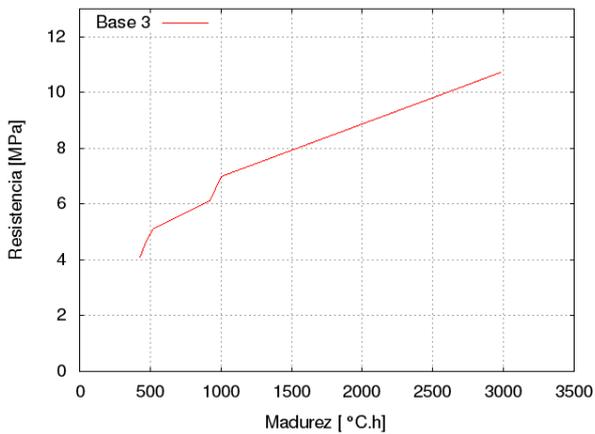


Figura 8 - Resistencia vs madurez Base 3

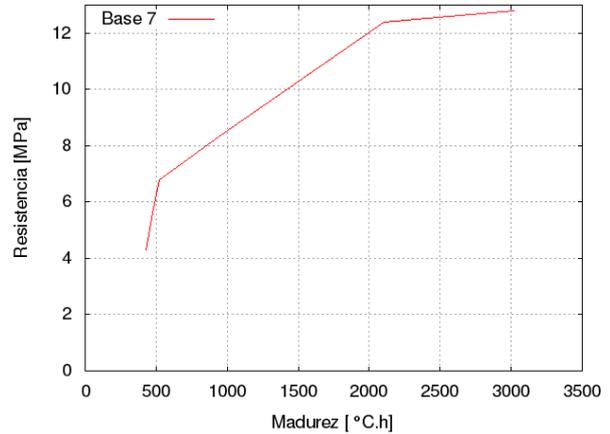


Figura 9 - Resistencia vs madurez Base 7

Se observan en los mismos una buena correlación entre los valores determinados de madurez y los correspondientes a las resistencias. Entrando con un valor de tiempo en el gráfico de la Figura 6, se puede obtener un valor de madurez. Luego, usando dicho valor hallado en cualquiera de las tres graficas restantes (Figura 7 a 9), se puede obtener un valor de resistencia a compresión para la Base 10, 3 o 7 según corresponda. Los gráficos expresan los valores reales de resistencia de cada base determinados con el ensayo de probetas que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 – Resistencias determinadas de las bases con probetas de hormigón a distintas edades

Base 3		Base 7		Base 10	
Edad horas	Resistencia en MPa	Edad horas	Resistencia en MPa	Edad horas	Resistencia en MPa
9	1,4	--	--	--	--
10	1,5	10	4,1	10	4,0
11	--	11	4,7	11	5,6
12	--	12	5,0	12	6,8
20	4,4	20	--	20	--
21	--	21	6,1	21	--
22	--	--	--	22	8,4
23	--	23	7,0	23	--
68	12,1	73	10,7	74	12,8
667	25,0	--	--	--	--

## Conclusiones

\* Los resultados de la experiencia son razonables y se condicen con los que se obtienen en equipos comerciales para la determinación de la madurez en hormigones de este tipo, en otras experiencias.

\* El uso de esta metodología permite controlar la totalidad del hormigón recibido, sin necesidad de tomar una cantidad importante de probetas para su posterior ensayo. Además, el cálculo de madurez es sumamente útil para optimizar el tiempo de encofrado y sobretodo donde los mismos son reutilizables.

\* La lectura de los sensores permite establecer la homogeneidad del hormigón y monitorear el desarrollo de la resistencia día a día.

El método será aplicado en nuestra próxima experiencia al monitoreo de la resistencia en una estructura completa de hormigón (losas, vigas y columnas).

## Referencias

[1] Peter C. Taylor, Steven H. Kosmatka, Gerald F. Voigt, et al, 2007. Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: a State-of-the-Practice Manual, FHWA Publication No. HIF - 07 – 004.

[2] ACI 325.11R-01, American Concrete Institute. Accelerated Techniques for Concrete Paving, 2001.

[3] M. F. Barreda, M.J. Naber, I. Quispe Sallo, J.D. Sota. “Fisuras de contracción en pavimentos de hormigón y el aserrado de juntas”. XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción. CONPAT 2013. Octubre de 2013. Cartagena de Indias, Colombia.

[4] ASTM C 1074, 1998. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method.

[5] J.D. Sota, F.A. Avid, M. Chury, P. Moreira. “Medida de la madurez del hormigón de pavimentos urbanos para determinar su resistencia. Diseño de equipamiento”. X Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras. CINPAR 2014. 4 al 6 de Junio de 2014. Santiago, Chile.

