

# MEDIDA DE LA MADUREZ DEL HORMIGÓN EN UNA ESTRUCTURA

F.A. Avid, GIIICMA - UTN Universidad Tecnológica Nacional -Facultad Regional  
P. Moreira, Concordia, Concordia, E.R., ARGENTINA -jdsota@gmail.com  
M. Chury  
J.D. Sota

## Resumen

En este trabajo, se desarrolla un sistema de medida de la temperatura del hormigón de una estructura, desde las primeras horas de la hidratación del cemento 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 microcomputadora. La misma lee de los sensores las temperaturas a intervalos prefijados y los registra. Esta almacena la información de forma permanente en una base de datos, y luego un software los extrae para su procesamiento.

En las experiencias se trabajó con un hormigón de 21 MPa de resistencia característica, y un cemento con adiciones (CPC40 según las normas nacionales).

Previamente se realizan ensayos de resistencia a la compresión 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 diferenciadas de la estructura.

## INTRODUCCIÓN

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).

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

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,

$T_a$  = temperatura promedio del hormigón durante el intervalo  $\Delta t$ , en °C, y

$T_0$  = 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 están en o por debajo de esta temperatura de referencia, no contribuyen al aumento de la resistencia. Generalmente, se utiliza un valor de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  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  $20^{\circ}\text{C}$ , requerida para producir una madurez igual a la alcanzada durante un periodo de curado a temperaturas diferentes a la temperatura de referencia ( Ec. 2).

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

donde:

$t_s$  = edad equivalente a una temperatura de referencia  $T_s$ , en días u horas.

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

$T_a$  = temperatura promedio del hormigón durante el intervalo  $\Delta t$ , en K.

$T_s$  = temperatura de referencia, en K y

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

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 (2 cm) 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.

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. Figuras 4 y 5.

La dosificación se compuso de un cemento portland CPC-40, cemento portland compuesto (hasta tres adiciones) de resistencia 40 MPa (Norma IRAM 50000); arena silícea gruesa de una cantera de la zona; canto rodado silíceo tamaños 1:3 y 1:2 y un aditivo superfluidificante. Las características de los agregados se informan en la Tabla 1.

Las proporciones de los materiales integrantes de la dosificación se resumen en la Tabla 2.

Se confeccionaron probetas cilíndricas de 15x30 para determinar la resistencia a las diferentes edades estudiadas. 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.

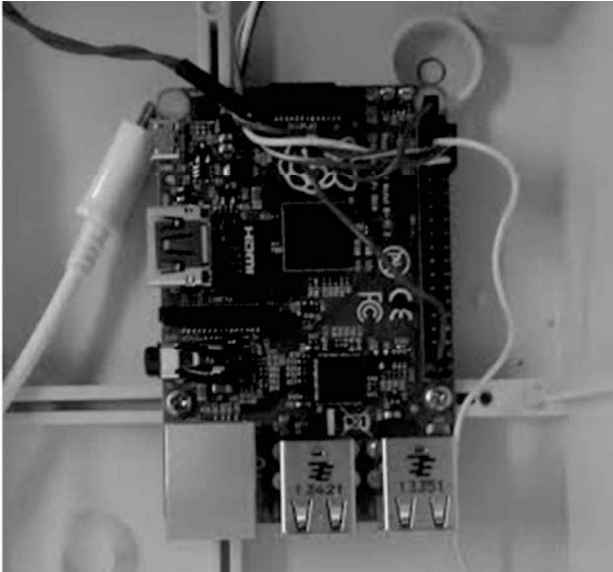


Figura 1. Microcomputadora (Rasberry Pi B+).



Figura 2. Sensores.



Figura 3. Termómetros digitales.



Figuras 4 y 5. Colocación de sensores.

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

**Tabla 1:** Características de los agregados.

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		

**Tabla 2:** Dosificación del hormigón utilizado en las experiencias.

## 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 (°C.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.

Se observan en los mismos una buena correlación entre los valores determinados de madurez y los correspondientes a las resistencias. Los gráficos expresan los valores reales de resistencia de cada base determinados con el ensayo de probetas. Tabla 3.

Los sensores corroboran que el hormigón entregado a la obra cumplía con el valor de resistencia requerido por el pliego (H21). Los valores a 28 días de resistencia así lo confirman.

## CONSIDERACIONES FINALES

En función de los resultados obtenidos en esta primera experiencia se pueden hacer las siguientes consideraciones:

- Los resultados de la experiencia son razonables y se conciben 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.
- 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).

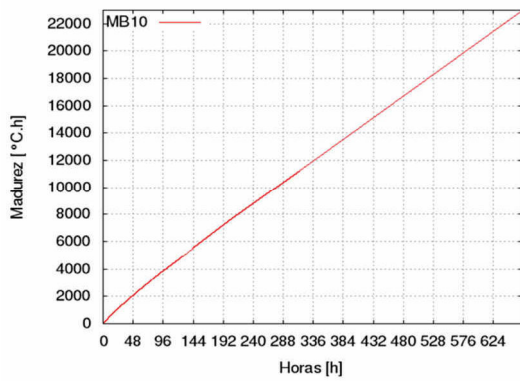


Figura 6. Tiempo vs madurez.

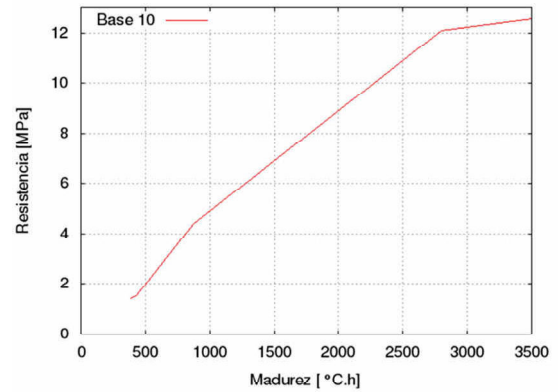


Figura 7. Resistencia vs madurez Base 10.

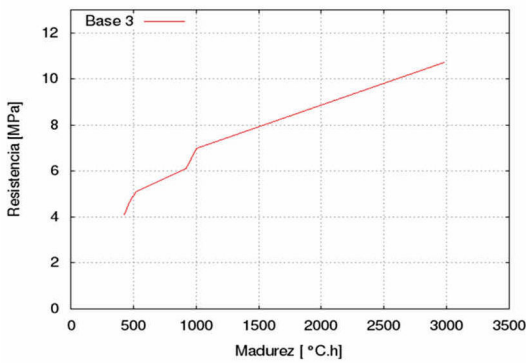


Figura 8. Resistencia vs madurez Base 3.

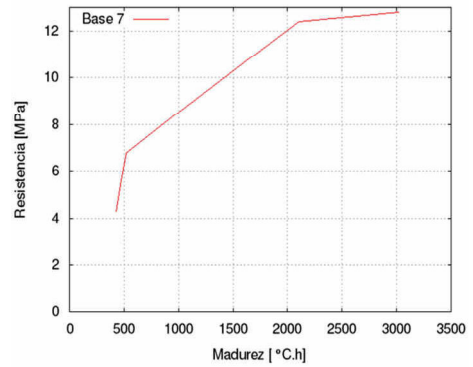


Figura 9. Resistencia vs madurez Base 7.

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	--	--	--	--

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

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Empresa Constructora DINALE S.A., a la Empresa elaboradora de hormigón COINAR S.R.L. por la colaboración y datos aportados para realizar las experiencias y a los integrantes del Grupo GIICMA por su colaboración en los ensayos, en particular a la Becarios alumnos de Ing. Civil; Alberto Palacios y Andrea Pereyra.

## 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.