



Ensayos no destructivos y destructivos para evaluación de estructuras

MEDIDA DE LA MADUREZ DEL HORMIGÓN DE PAVIMENTOS URBANOS PARA DETERMINAR SU RESISTENCIA. DISEÑO DE EQUIPAMIENTO.

Jorge D. Sota, Fabián Avid, Marcelo Barreda, Mario Chury, Pablo Moreira.
Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Concordia-Entre Ríos Argentina
jdsota@gmail.com

Resumen

El método de madurez permite evaluar la resistencia "in situ" de un pavimento de hormigón. Esta información puede utilizarse, entre otras cosas, para determinar el momento oportuno para la apertura de un pavimento al tránsito y para aserrar juntas. En este trabajo se desarrolla un sistema de medida de la temperatura del hormigón, desde las primeras horas de su hidratación hasta los 28 días, para calcular la madurez. 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. Simultáneamente, se realizaron ensayos de resistencia en probetas cilíndricas para establecer la relación con la madurez del hormigón, que fue calculada empleando las expresiones de Nurse-Saul y de Arrhenius. Las temperaturas se registraron en probetas cilíndricas (15x30cm) y vigas prismáticas (15x15x55cm), con resultados satisfactorios y muy buena correlación. En las experiencias se trabajó con un hormigón de 25 MPa de resistencia a compresión, con un cemento con adiciones (CPC40 según las normas nacionales). Los resultados permitieron determinar la curva de resistencia-madurez del hormigón estudiado y poner a punto el equipamiento de medición.

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

Abstract

The maturity method allows to evaluate the "in situ" resistance of a concrete pavement. This information can, among other things, be used to determine the timing of the opening of a pavement to traffic and logs together time. In this paper a system for measuring the temperature of the concrete is developed, from the first hours of hydration up to 28 days to calculate maturity. The design of the system includes a number of temperature sensors connected to a microcontroller. The same sensor reads temperature -lapse and records. A program run by a computer reading the stored permanently in an interface allowing processing. Simultaneously, strength tests were performed on cylindrical specimens to establish the relationship with the maturity of the concrete, which was calculated using the expressions of Nurse- Saul and Arrhenius. Temperatures were recorded on cylindrical specimens (15x30cm) and prismatic beams (15x15x55cm) with satisfactory results and good correlation. In the experiments we worked with 25 MPa concrete compressive strength with cement with additions (CPC40 according to national standards). The results allowed to determine the strength-maturity curve of the studied concrete and tune measurement equipment.

Keywords: maturity, concrete, strength, time, temperature.

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).

La resistencia de un hormigón que ha sido colocado, compactado y curado correctamente es una función de su edad y del historial de temperatura. Tiempos más prolongados y aumentos en las temperaturas de curado conducen a aumentos en el desarrollo de la resistencia. El método de madurez reconoce este efecto combinado del tiempo y la temperatura y proporciona una base para estimar el desarrollo de resistencia del hormigón “in situ” mediante el control de la temperatura y el tiempo. En la construcción de pavimentos de hormigón, esta facultad, entre otras cosas, permite a los ingenieros determinar el momento apropiado para aserrar las juntas y la apertura al tránsito.

La madurez es un indicador de la historia del tiempo y la temperatura de un hormigón y se toma, generalmente, como el producto del tiempo y la temperatura. La suposición esencial en el método de madurez es que dos hormigones con la misma madurez tendrán la misma resistencia, aunque cada uno puede haber estado expuesto a condiciones de curado diferentes.

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 de cuánta resistencia ha desarrollado el hormigón. Las dos funciones de madurez utilizadas para este propósito son la de Nurse-Saul y la de Arrhenius.

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)

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

Ecuación 1

donde:

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

Δt = intervalo de tiempo, en días u horas,

T_a = temperatura promedio del hormigón durante el intervalo Δt , en °C, y

T_o = 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 °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 periodo de curado a temperaturas diferentes a la temperatura de referencia: (Ec. 2)

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

Ecuación 2

donde:

t_e = 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 Δt , en K,

T_s = temperatura de referencia, en K y

Δt = 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 que asume 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 C1074.



El proceso de ensayo de madurez consiste esencialmente en dos pasos: el desarrollo de la curva de resistencia-madurez en laboratorio y la medición de la madurez del hormigón en obra. De esta forma se puede determinar la resistencia efectiva del hormigón de un pavimento.

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.

En el caso del presente trabajo se ha desarrollado un equipo de medición sencillo conjuntamente con un software, con el fin de iniciar las experiencias.

Metodología

El desafío más importante en este estudio fue el de contar con un sistema de medición de la temperatura en el hormigón que sea fiable, en virtud que en este tiempo no se podían adquirir los equipos que estaban en el mercado.

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 un microcontrolador Figura 1. 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, empleando las expresiones de Nurse-Saul para cálculo de madurez y de Arrhenius.

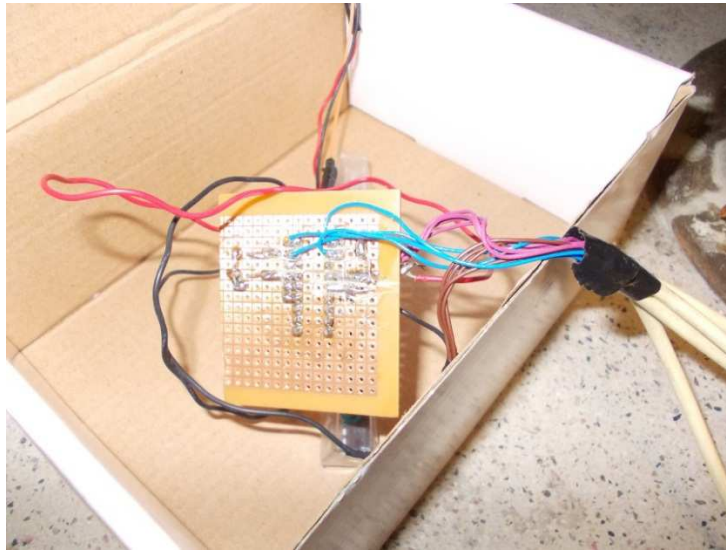


Figura 1 – Plaqueta y Microcontrolador

Con este equipamiento se realizaron todas las lecturas de temperatura en secuencia continua en intervalos de una hora seleccionando las correspondientes a las edades de ensayo para su análisis.

Para las experiencias en el Laboratorio se diseñó una mezcla de hormigón para pavimentos urbanos, que es usada en la localidad.

Los materiales utilizados fueron:

Cemento portland CPC-40 Cemento portland compuesto (hasta tres adiciones) de resistencia 40 MPa (Norma IRAM 50000); Arena silícea de una cantera de la Zona; Canto rodado silíceo. Las características de los agregados se informan en la Tabla 1.

Material	Módulo de finura	Tamaño Máximo
Arena Natural	1,38	--
Canto Rodado	7,05	3/4"

Tabla 1 – Características de los agregados

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

Material	P.e (g/cm ²)	Volumen (litros)	Peso (Kg)
Agua	1	168	168
Cemento	3,10	108	335
Arena Natural	2,63	288	757
Canto Rodado	2,65	416	1102
Aire		20	
Asentamiento		6cm	

Tabla 2 – Dosificación de Hormigón utilizado en las experiencias

Se confeccionaron probetas cilíndricas de 15x30 para determinar la resistencia a las diferentes edades estudiadas. Figura 2

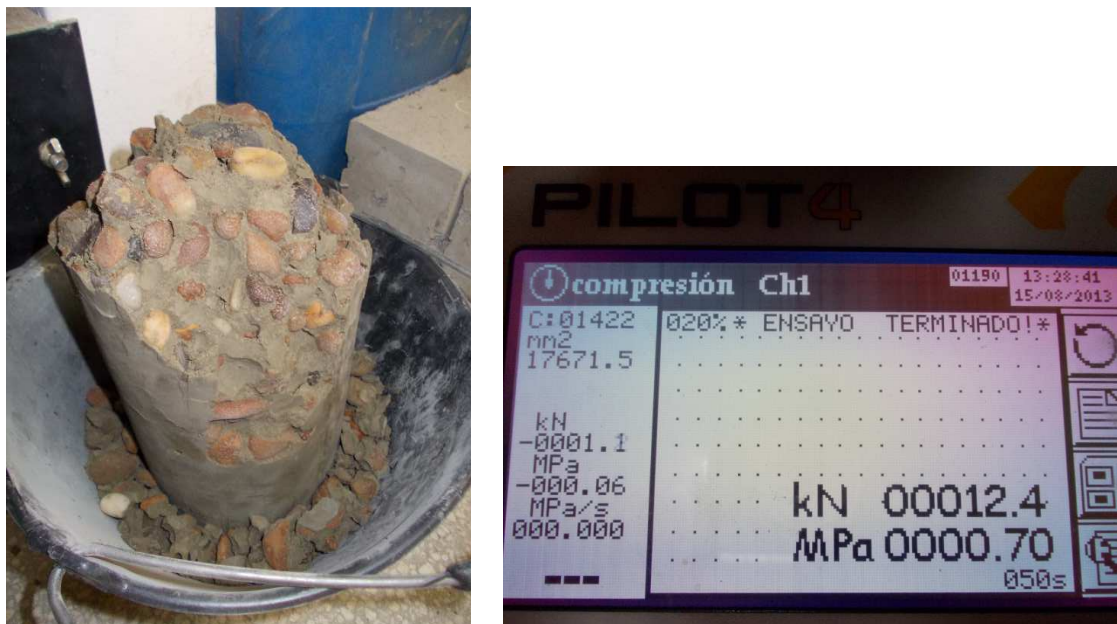
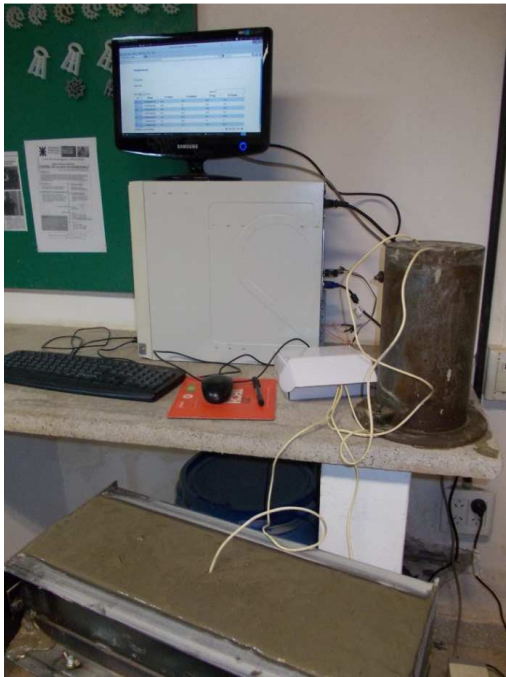


Figura 2 – Probeta ensayada en las primeras horas; registro de la prensa.

Las mediciones de temperatura se efectuaron sobre probetas de 15x30cm y sobre vigas de 15x15x55cm simultáneamente. Figura 2.



Id	Tiempo	T1 Cilindro	T2 Viga	T3 Ambiente	
169	1376570821192	19.5	18.4	19	19.7
168	1376570521548	19.6	18.3	18.6	19.6
167	1376570021915	19.6	18.3	18.7	19.6
166	137656902283	19.5	18.3	18.6	19.5
165	1376569022640	19.5	18.3	18.5	19.5
164	1376569322995	19.5	18.2	18.6	19.5
163	1376569023362	19.5	18.2	18.6	19.6
162	1376568723740	19.4	18.1	18.3	19.6
161	1376568424124	19.4	18.1	18.6	19.6
160	1376568124507	19.3	18.1	18.3	19.6

Figura 2 -Equipo de medición y procesamiento de datos

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. Figura 3



Figura 3 – Prensa de ensayo usada en las experiencias

Tanto las probetas para ensayo de resistencia como en las que se efectuaban las mediciones de temperatura se mantuvieron en el mismo ambiente 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, se procedió a correlacionar estos a los tiempos parciales utilizados. (Datos del madurómetro y resistencia a la misma edad)

La correlación de datos tanto con la probeta cilíndrica como con la viga se informan en la Tabla 3 y en los Grafico 1 y 2 las curvas resultantes (resistencia-madurez), los mismos corresponden a la mezcla en estudio en estas experiencias.

Tiempo (Horas)	Madurez (°C.h) Nurse-Saul	Edad Equivalente (h) Arrhenius	Resistencia (Mpa)
11	328,35	9,09	0,3
14	413,57	11,78	0,54
17	502,12	14,62	0,7
19	563,07	16,62	1,21
22	655,17	19,74	1,83
25	746,31	22,84	2,3
35	1042,61	32,71	4,65
48	1429,17	45,45	6,9
63	1858,85	59,44	8,78
135	4014,68	131,13	14,69
350	10358,78	341,02	20,38
518	15551,77	518,45	21,02

Tabla 3- Datos de correlación obtenidos en las experiencias

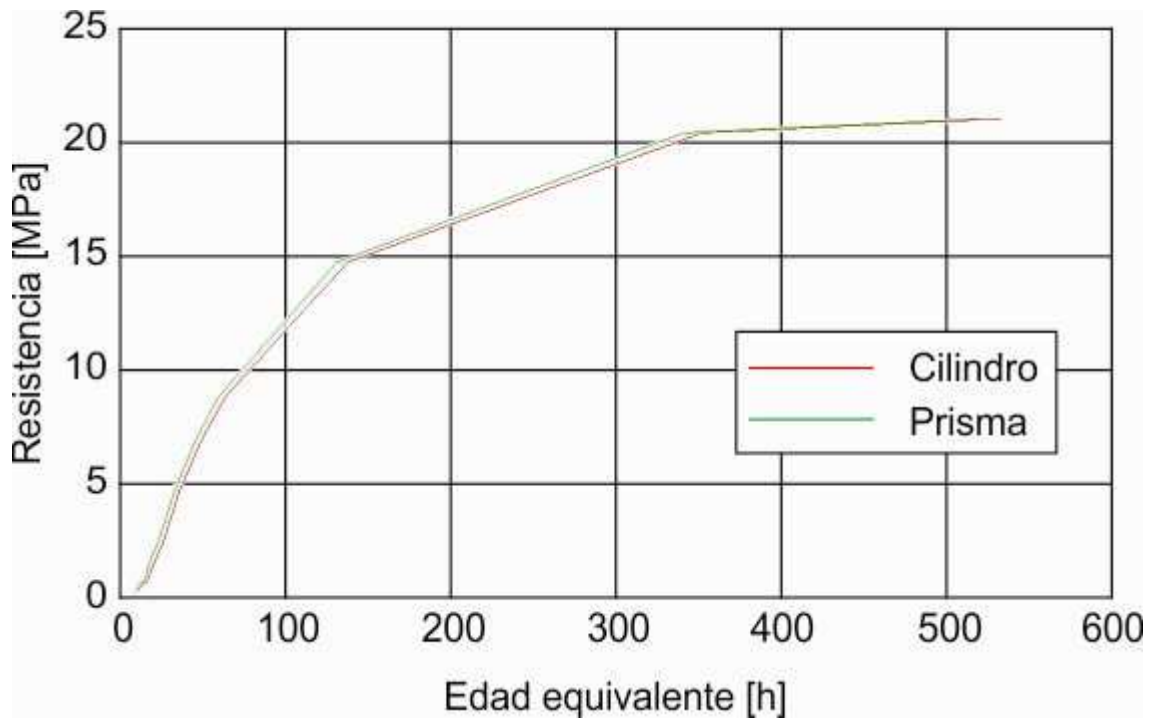


Gráfico 1 - Arrehnius - Edad Equivalente (h)

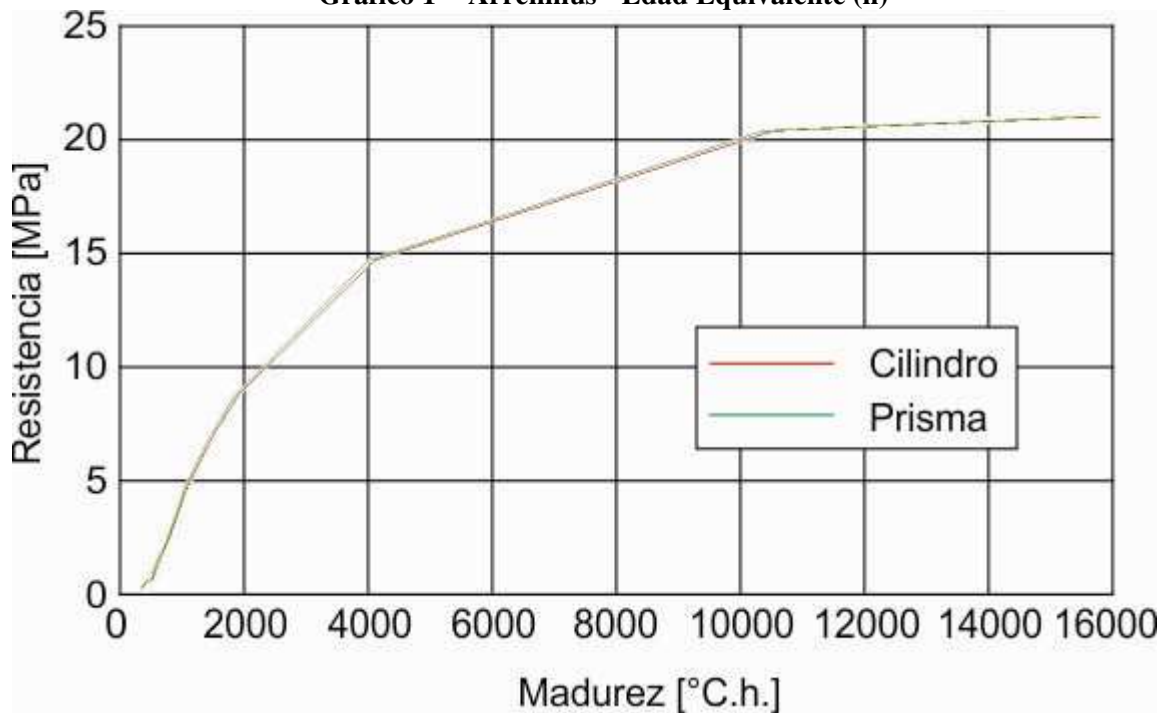


Gráfico 2 - Nurse-Saul - Madurez (°C.h)

Conclusiones

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 condicen con los que se obtienen en equipos de para la determinación de la madurez comerciales en hormigones de este tipo, en otras experiencias.

La diferencia de probeta, en relación con su geometría, utilizada en la medición de la temperatura no arroja diferencias significativas en el cálculo de la madurez del hormigón.

En la Facultad Regional Concordia de UTN se cuenta con recursos humanos que permiten encarar experiencias de este tipo en las que se requiere el diseño de equipamiento electrónico e informático para la realización de ensayos que actualicen los conocimientos del hormigón con dispositivos de bajo costo e iguales prestaciones y precisión que los comerciales, y transmitirlos académicamente a los alumnos de las carreras de ingeniería.

Actualmente se está terminando el diseño del equipamiento que permitirá efectuar las mediciones de madurez en la estructura de una planta de un edificio en altura.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las Autoridades de la Facultad, por acompañar y brindar apoyo al proyecto y a los integrantes del Grupo GIICMA por su colaboración en las experiencias

6. 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) Pliego de Especificaciones Técnicas Generales, Dirección Nacional de Vialidad, 1998.



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

5) Fisuras de contracción en pavimentos de hormigón y el aserrado de juntas. M. F. Barreda, M.J. Naber, I. Quispe Sallo, J.D. Sota. XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT-Colombia