



# MÉTODO DE MADUREZ

**Fredrick Akuamoah**  
**Abril 2021**

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>EL MÉTODO DE MADUREZ</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE MADUREZ</b>	<b>4</b>
<b>RELACIÓN RESISTENCIA-MADUREZ</b>	<b>5</b>
<b>APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MADUREZ</b>	<b>8</b>
<b>LIMITACIONES DEL MÉTODO DE MADUREZ</b>	<b>9</b>
<b>CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES</b>	<b>9</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>10</b>



## RESUMEN

El método de madurez es una técnica utilizada para proporcionar una estimación más precisa de los efectos del tiempo y la temperatura en el desarrollo de la resistencia del hormigón.

Este método es una forma no destructiva y fiable de estimar la resistencia del hormigón en obra en tiempo real, permitiendo un mejor control de la calidad, y reduciendo tanto el número de ensayos tradicionales (en general rotura de probetas) como los plazos de construcción. Además, ayuda a garantizar una mayor seguridad.

Sin embargo, hay que tener en cuenta ciertas limitaciones y consideraciones al utilizar el método de madurez. Este documento muestra la necesidad del método de madurez como práctica estándar para estimar la resistencia del hormigón, la normativa ASTM pertinentes aplicables a él y algunas recomendaciones sobre las limitaciones del método.

## INTRODUCCIÓN

Es bien sabido en el sector de la construcción que el hormigón es uno de los materiales más utilizados en el mundo, quizás porque los áridos del hormigón están disponibles prácticamente en todas partes.

El hormigón se comporta de forma diferente según varíen las temperaturas. El hormigón curado a bajas temperaturas ganará resistencia más lentamente que el mismo hormigón curado a temperaturas más altas. Esta dependencia de la temperatura puede ser una carga para muchos contratistas que necesitan conocer la resistencia de su hormigón, especialmente cuando intentan acelerar los tajos de obra para cumplir los plazos.

La incapacidad de determinar la resistencia de una losa de hormigón antes de realizar operaciones de construcción críticas, como el desencofrado, puede ser catastrófica.

El derrumbe de las Skyline Towers, un edificio de varias plantas en construcción en el condado de Fairfax, Virginia, en marzo de 1973, en el que murieron 14 trabajadores y 34 resultaron heridos, se atribuyó a la retirada prematura del encofrado, tras la investigación del Instituto Nacional de Normas y Tecnología (Carino y Lew, 2001).

En aquel momento, el hormigón de la losa donde se produjo el fallo tenía sólo cuatro días de antigüedad y estaba curado a una temperatura media de 7 °C. Cinco años después, 51 trabajadores murieron en el colapso de la torre de refrigeración en Willow Island, WV, el 27 de abril de 1978, debido a la insuficiente resistencia del hormigón para soportar las cargas de construcción aplicadas - el anterior levantamiento de hormigón fue expuesto a una temperatura ambiente de 10 °C durante sólo un día (Carino & Lew, 2001).

Este incidente provocó la urgente necesidad de establecer normas para estimar la resistencia del hormigón in situ. La investigación del NIST condujo a la normalización del método de madurez, un concepto introducido a principios de los años 50, en la Sociedad Americana de Ensayos de Materiales (ASTM) C1074 en 1987.

El objetivo de este documento es proporcionar una comprensión del método de madurez, su uso y sus limitaciones.

## EL MÉTODO DE MADUREZ

El método de madurez se publica en la norma C1074 de la ASTM, y se utiliza para estimar el efecto combinado del tiempo y la temperatura en el desarrollo de la resistencia del hormigón.

El primer paso para aplicar el método de madurez es elegir una función de madurez para crear un índice de madurez. Existen dos funciones de madurez recomendadas por la norma ASTM C1074:

- La función de madurez de **Nurse-Saul**
- La función de madurez de **Freiesleben Hansen y Pedersen**, conocida popularmente como la función de madurez de **Arrhenius**.

Ambas funciones se basan en gran medida en el perfil de temperatura del hormigón durante el periodo de curado del mismo.

La función de madurez de Nurse-Saul asume que la tasa de ganancia de resistencia es una función lineal de la temperatura. Esta aproximación lineal es una de las principales limitaciones de la función de madurez de Nurse-Saul. Se consideró inválida cuando las temperaturas de curado varían en un amplio rango durante el período de curado o dentro del miembro de hormigón curado, lo que llevó a la propuesta de una función de madurez más robusta, la función de madurez de Arrhenius (Soutsos, Kanavaris, & Hatzitheodorou, 2018).

Los dos índices de madurez se denominan en la norma ASTM C1074 "Factor Tiempo-Temperatura" (TTF) para la función de madurez Nurse-Saul y "Edad Equivalente" para la función de madurez Arrhenius, respectivamente.

## ÍNDICE DE MADUREZ

### Factor Tiempo-Temperatura (Nurse-Saul)

El TTF se muestra en la ecuación 1:

$$M(t) = \sum_{0}^{t} (T_a - T_o) \Delta t \quad (1)$$

**Donde:**

$M(t)$  = Factor temperatura-tiempo, °C-días o °C-horas,

$\Delta t$  = Intervalo de tiempo, días u horas,

$T_a$  = Temperatura media del hormigón, °C, durante el intervalo de tiempo,  $\Delta t$

$T_o$  = Temperatura del punto de referencia, °C.

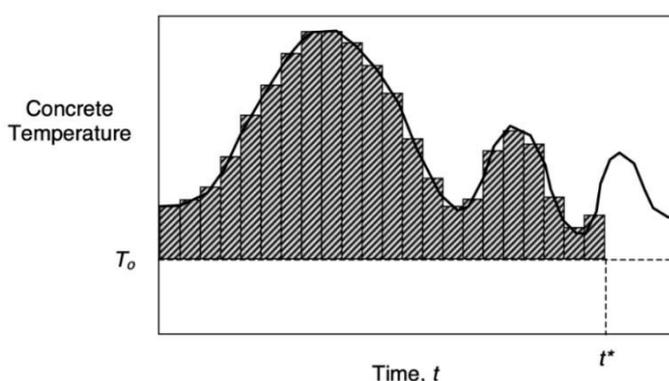


Figura 1 - Evolución de la temperatura en el tiempo (Carino y Lew, 2001).

La figura 1 muestra un ejemplo de un historial de temperatura-tiempo utilizado en el cálculo de la TTF mediante la ecuación 1.

De acuerdo con la figura 1, la TTF en el momento  $t^*$  es el área por debajo de la curva de temperatura y la temperatura de referencia.  $T_o$  se define como la temperatura por debajo de la cual el hormigón deja de ganar resistencia.

Varía en función de: "tipo de cemento, el tipo y la dosificación de los aditivos utilizados y otros aditivos que afectan a la velocidad de hidratación, y del rango de temperaturas que experimentará el hormigón durante su curado" (ASTM C1074, 2019).

Por lo tanto, conocer el  $T_o$  correcto a utilizar es fundamental para estimar una resistencia precisa del hormigón in situ.

Aunque rara vez se utiliza en la construcción comercial, la norma ASTM C1074 recomienda un valor de  $T_o$  de 0 °C para el cemento tipo 1 sin aditivos y un rango de temperatura de curado de 0 a 40 °C. Sin embargo,  $T_o$  puede determinarse experimentalmente para maximizar la precisión de la estimación de la resistencia.

### Edad equivalente (método Arrhenius)

La función de Edad Equivalente introdujo el cálculo de la edad equivalente del hormigón a una temperatura determinada, como se muestra en la ecuación 2.

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

**Donde:**

$t_e$  = edad equivalente a una temperatura determinada,  $T_s$ , días u horas

$E_a$  = energía de activación, J/mol,



$R$  = constante del gas, 8,31 J/(K \* mol),

$T_a$  = temperatura media del hormigón durante el intervalo de tiempo,  $\Delta t$ , K

$T_s$  = temperatura especificada, K, y

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

La función de Edad Equivalente con la Ecuación 2 supera una de las principales limitaciones de la función Nurse-Saul con la Ecuación 1 al introducir  $E_a$ .

$E_a$  describe el efecto de la temperatura en la tasa de desarrollo de la resistencia y permite una relación no lineal entre la tasa de desarrollo de la resistencia y la temperatura de curado (Carino y Lew, 2001).

Al igual que la  $T_0$  para la TTF, la  $E_a$  es vital para estimar el desarrollo de la resistencia de forma eficiente. También depende del tipo de cemento, el tipo y la dosificación de los aditivos que afectan a la velocidad de desarrollo de la resistencia y la relación agua-material cementante.

Los valores de  $E_a$  recomendados por la norma ASTM C1074 para un cemento de tipo I sin aditivos o adiciones son de 38.000 a 45.000 J/mol (ASTM C1074, 2019). Sin embargo, el valor de  $E_a$  puede determinarse experimentalmente para maximizar la precisión de la estimación de la resistencia.

## RELACIÓN RESISTENCIA-MADUREZ

Al establecer la función de madurez de Nurse-Saul o TTF, (Saul, 1951) definió la "regla de madurez", afirmando que "el hormigón de la misma mezcla con el mismo [índice] de madurez tiene aproximadamente la misma resistencia cualquiera que sea la combinación de temperatura y tiempo para componer esa madurez".

Esto significa que, en la medida en que se conozca el índice de madurez correspondiente a una determinada resistencia para una mezcla de hormigón y unos constituyentes determinados, la resistencia del hormigón puede estimarse independientemente de la temperatura de curado o del historial de temperaturas. Esta regla se muestra en la figura 2. Cabe señalar que la edad equivalente o la función de madurez de Arrhenius obedece a esta regla.

La relación o curva resistencia-madurez puede realizarse utilizando muchos modelos diferentes, cuatro de los cuales son la ecuación hiperbólica lineal, la parabólica hiperbólica, la logarítmica y la función exponencial. Entre los cuatro modelos, sólo las ecuaciones hiperbólica lineal y logarítmica se muestran en la norma ASTM C1074.

La ecuación logarítmica es sencilla de utilizar en comparación con la hiperbólica lineal, pero tiene sus limitaciones. Supone que el hormigón gana resistencia indefinidamente, lo cual es falso. Por lo tanto, el modelo hiperbólico lineal, ecuación 3, es generalmente el modelo más adecuado para el desarrollo de la resistencia en las primeras edades del hormigón (Carino & Lew, 2001).

$$S = S_u \frac{k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \quad (3)$$

### Donde:

$S$  = resistencia a la edad  $t$ , MPa

$S_u$  = resistencia límite, MPa

$k$  = constante de velocidad, 1/día

$t$  = edad de la prueba, día, y

$t_0$  = edad al inicio del desarrollo de la fuerza, día

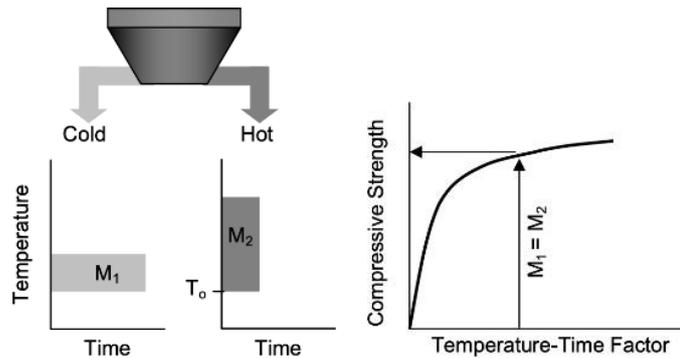


Figura 2 - Diagrama de la regla de madurez (Wade, 2005)

Los parámetros  $S_u$ ,  $k$  y  $t_0$  pueden obtenerse mediante un análisis de regresión por mínimos cuadrados o utilizando una función Solver disponible en Excel u hoja de cálculo (ASTM C1074, 2019).

Las figuras 3 y 4 muestran un gráfico ejemplar de la resistencia a la compresión en función de los dos índices de madurez, TTF, y la edad equivalente para una mezcla de hormigón particular. La curva resultante de la relación resistencia-madurez, como se muestra en las Figuras 3 y 4, se utiliza para estimar la resistencia in situ de la mezcla de hormigón particular que se utilizó para este ejemplo.

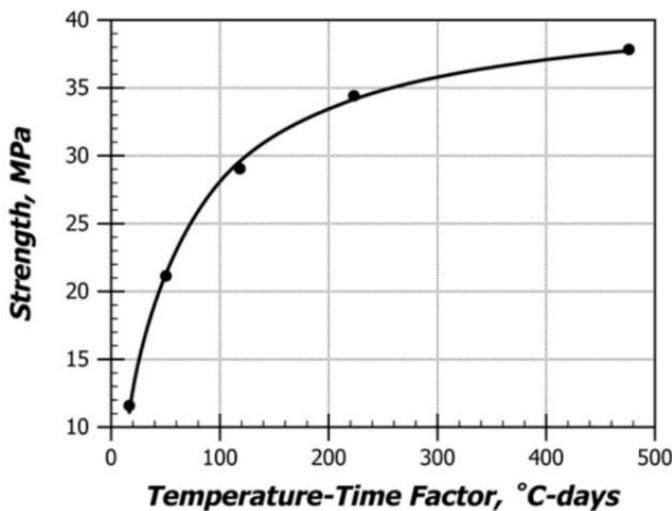


Figura 3 - Ejemplo de relación entre la resistencia a la compresión y la TTF (ASTM C1074, 2019)

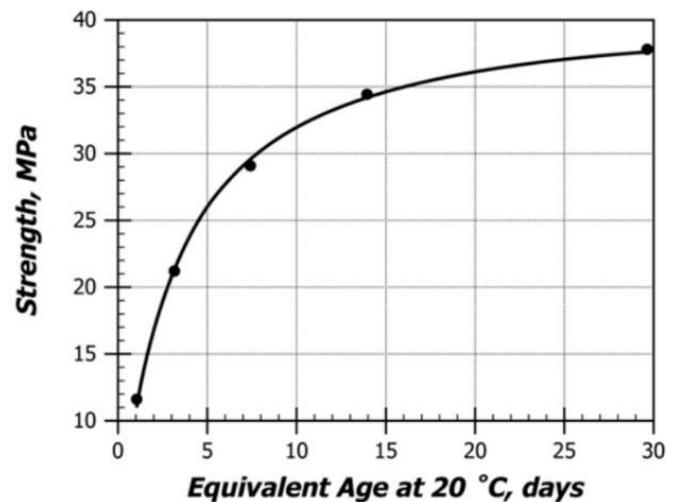


Figura 4 - Ejemplo de relación entre la resistencia a la compresión y la edad equivalente a 20 °C (ASTM C1074, 2019)

## Determinación de la temperatura de referencia o de la energía de activación

Como se ha mencionado anteriormente, la capacidad de estimar eficazmente la resistencia del hormigón in situ depende en gran medida de la elección de los valores adecuados de  $t_0$  o  $E_a$  para la ecuación 1 y la ecuación 2, respectivamente. Ambos parámetros dependen en gran medida de la temperatura de curado; por lo tanto, las muestras con temperaturas de curado tempranas más elevadas darán lugar a una mayor resistencia inicial y a una menor resistencia a largo plazo, y viceversa, como se muestra en la figura 5 (Carino y Lew, 2001).

Este fenómeno se conoce como "efecto cruzado". Para estimar la resistencia del hormigón con exactitud, los valores adecuados de  $t_0$  y  $E_a$  deben determinarse utilizando el procedimiento indicado en el Apéndice X1 de la norma ASTM C1074 (ASTM C1074, 2019), como se describe a continuación

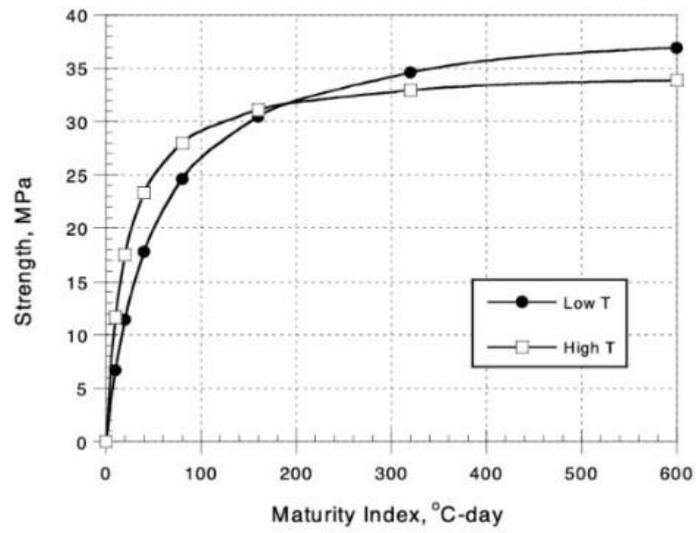


Figura 5 - El "efecto cruzado" debido a las diferentes temperaturas de curado temprano (Carino & Lew, 2001)

## APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MADUREZ

Hay cuatro pasos necesarios para aplicar el ensayo de madurez según la norma ASTM C1074: la determinación del índice de madurez apropiado para la mezcla específica que se va a utilizar, la determinación de la relación resistencia-madurez, la medición de la temperatura y el tiempo del hormigón in situ y la estimación de la resistencia in situ, todo lo cual se muestra en la figura 6.

Para determinar el índice de madurez, se preparan un mínimo de 15 probetas cilíndricas de hormigón. "Las proporciones de la mezcla y los constituyentes del hormigón deberán ser similares a los del hormigón cuya resistencia se estimará mediante esta práctica" (ASTM C1074, 2019). Después de moldear los cilindros, se colocan sensores de temperatura "dentro de  $\pm 15$  mm de los centros de al menos dos cilindros" (ASTM C1074, 2019). Las probetas se curan en "un tanque de almacenamiento de agua [o baño,] o una sala húmeda que cumpla" la especificación de requisitos ASTM C511 (ASTM C1074, 2019). Los ensayos de compresión se realizan en al menos dos especímenes a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días. El intervalo de tiempo recomendado de media hora o menos debe utilizarse para las primeras 48 horas del registro de temperatura, y se permiten intervalos de tiempo más largos para el resto del proceso de curado (ASTM C1074, 2019). El índice de madurez se evalúa según la ecuación 1 o 2 (Carino y Lew, 2001), utilizando los datos de tiempo y temperatura de los cilindros monitorizados.

Después de determinar el índice de madurez, se hace un gráfico de la resistencia media a la compresión en función del índice medio de madurez, que se muestra en las figuras 3 y 4 (Carino y Lew, 2001). Se dibuja una curva de mejor ajuste, o se puede utilizar el análisis de regresión para determinar la curva de mejor ajuste para una relación adecuada de resistencia-madurez utilizando la Ecuación 3. Esta curva resultante se utilizará para estimar la resistencia in situ de esa mezcla de hormigón (Carino & Lew, 2001).

La medición de la madurez in situ es necesaria para estimar la resistencia del hormigón en obra. Los sensores de temperatura deben fijarse dentro de la sección que se va a hormigonar antes de la colocación del hormigón, o insertarse en el hormigón fresco tan pronto como sea práctico después de la colocación del hormigón (Carino y Lew, 2001). Estos sensores de temperatura deben colocarse en lugares de la estructura que no estén expuestos a la temperatura ambiente y que sean críticos para los requisitos estructurales. La importancia de la colocación de los sensores no puede exagerarse si "las estimaciones de resistencia se utilizan para programar el inicio de las operaciones de construcción críticas", como la retirada del encofrado (Carino y Lew, 2001).

Los datos de temperatura del sensor deben registrarse tan pronto como sea posible. Cuando se desea conocer la resistencia en una ubicación de un sensor, el índice de madurez se estima a partir del registro de temperatura y tiempo. La resistencia en obra puede entonces estimarse utilizando los valores de madurez y la curva o relación resistencia-madurez previamente establecida.

"Antes realizar operaciones críticas como el postensado o el desencofrado, que se basan en la resistencia estimada a partir de la madurez del hormigón", la norma ASTM C1074 exige que se realicen otros ensayos para verificar que la mezcla de hormigón ensayada es la misma que se entrega en la obra (ASTM C1074, 2019). Algunos de estos ensayos se enumeran en la sección 9.5 de la norma ASTM C1074.

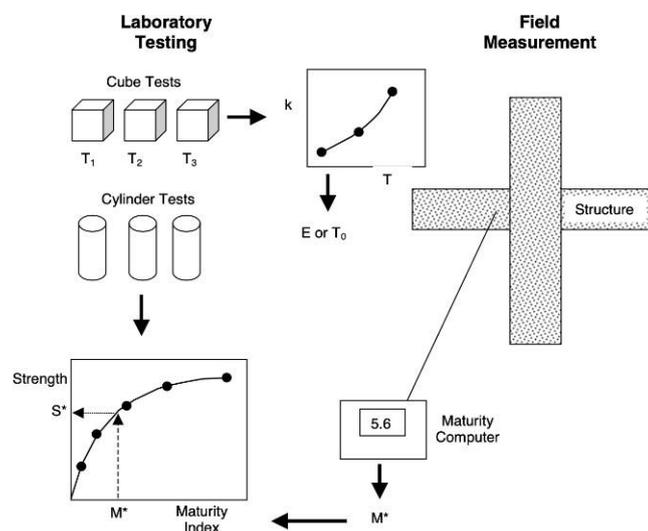


Figura 6 - Aplicación del método de madurez (Carino y Lew, 2001)



## LIMITACIONES DEL MÉTODO DE MADUREZ

A pesar de que el método de maduración es relativamente sencillo, fiable y no destructivo para el hormigón in situ, algunos factores pueden afectar a la precisión de la técnica:

### Adecuación del índice de madurez

En las primeras etapas de la aplicación del método de madurez, la elección del índice de madurez correcto, es decir, la elección entre la ecuación 1 o la 2, puede afectar a la precisión de la estimación de la resistencia final. Como se ha mencionado anteriormente, la ecuación 1 supone que el índice de aumento de la resistencia es una función lineal de la temperatura. Esta suposición se ha considerado inválida cuando las temperaturas de curado varían en un amplio rango durante el periodo de curado o dentro del miembro de hormigón curado.

### Temperatura de la edad temprana en obra

Como se ha comentado, y se muestra en la figura 4, la temperatura a edad temprana, ya sea alta o baja, provocará el "efecto cruzado". No sólo eso, sino que cuando la tasa de hidratación aumenta, la temperatura de curado también lo hace. Este aumento de la tasa de hidratación no da a los productos de reacción el tiempo necesario para distribuirse uniformemente.

### Proporciones de la mezcla de hormigón en obra vs laboratorio

Utilizar las proporciones correctas de la mezcla es uno de los pasos críticos para garantizar la precisión de las estimaciones de resistencia in situ.

La mezcla de hormigón y los componentes utilizados en laboratorio para desarrollar la relación resistencia-madurez deben ser la misma mezcla y los mismos componentes utilizados en la obra. Si las dos mezclas y constituyentes difieren, se invalida la relación resistencia-madurez y, en consecuencia, habrá que realizar un nuevo ensayo.

## CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

En este artículo se analiza el método de madurez y cómo puede utilizarse para ayudar a predecir la resistencia del hormigón en obra.

El método de madurez es una forma potente, rentable y no destructiva de estimar la resistencia del hormigón in situ. Es importante en la industria, ya que permite el inicio de operaciones de construcción críticas, como el postensado de los tendones, la apertura de las carreteras al tráfico, la retirada del encofrado y las cimbras, y el control de temperaturas de curado.

También permite un mejor control de calidad. Aunque no se ha investigado en este documento, hay que tener en cuenta que el hormigón puede curar de forma diferente en las probetas que en obra debido a las mayores masas de hormigón en obra.

Por las razones expuestas, a continuación se ofrecen algunas recomendaciones sobre el uso del método de madurez:

- El índice de madurez más apropiado para utilizar es la edad equivalente (Ecuación 2)
- $E_a$  (o  $t_{0'}$ , si se prefiere la Ecuación 1) debe determinarse experimentalmente.
- La mezcla y los constituyentes utilizados en la obtención de la relación resistencia-madurez deben ser la misma mezcla y los mismos constituyentes utilizados en obra.
- La temperatura del hormigón en obra a edad temprana debe ser monitoreada de cerca.

## REFERENCIAS

ASTM C1074-19, Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

Carino, N. J., y Lew, H. S. (2001, 21-23 de mayo). El método de la madurez: From Theory to Application. Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, Washington, D.C., American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, Peter C. Chang, Editor, 2001, 19 p.

Kim, T., & Rens, K. L. (2008). Método de maduración del hormigón mediante curado a temperatura variable para hormigón normal y de alta resistencia. I: Estudio Experimental. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(12), 727-734.

Saul, A.G.A. (1951). Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure. *Magazine of Concrete Research*, Mar. pp. 127-140.

Soutsos, M., Kanavaris, F., & Hatzitheodorou, A. (2018). Análisis crítico de las estimaciones de resistencia a partir de funciones de madurez. *Case Studies in Construction Materials*, 9.

Wade S. (2005, 15 de diciembre). Evaluación del método de maduración para estimar la resistencia del hormigón. Recuperado el 24 de junio de 2020, de <https://etd.auburn.edu/handle/10415/127?show=full>.

