

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional La Plata

APLICACIÓN DEL ENSAYO DE MADUREZ A PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

CENTRO DE INVESTIGACIONES VIALES

ÁREA ESTRUCTURAS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Director Tesis: Barreda, Marcelo.

Becaria: Mechura, Verónica

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CONCEPTO	2
ECUACIONES DE MADUREZ	3
Factor Tiempo Temperatura	3
Edad Equivalente	4
Resumen de ecuaciones	5
Determinación de la temperatura dato o de la energía de activación	6
Procedimiento	6
Determinación de la temperatura dato	10
Determinación de la energía de activación	10
EQUIPOS	11
PROCESO DE PRUEBA DE MADUREZ	12
Desarrollo de la curva de calibración de madurez	12
Estimación de la resistencia in-situ	14
Verificar la curva de madurez	15
USO DEL METODO DE MADUREZ	16
REGLAMENTACION Y NORMATIVA EXISTENTE	18
CIRSOC	18
ASTM C 1074 – 98	19
CONCLUSIONES	20
GLOSARIO	21
BIBLIOGRAFIA	22

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha producido un aumento en la velocidad de construcción lo cual conlleva a la rápida puesta en servicio de elementos de hormigón armado por lo que existe una necesidad para poder acelerar los procesos de construcción determinando las resistencias del hormigón a edades tempranas, por lo cual es necesario tener un modelo predictivo que nos entregue resultados de acuerdo a las situaciones reales en las que se encuentra sometido el hormigón, es decir, tipo de cemento, cambios climáticos y temperaturas a las que está expuesto el mismo, los tipos de protección que tiene el hormigón durante el proceso de endurecimiento y cualquier otra situación a la que éste elemento esté expuesto. Actualmente los métodos de predicción existentes no son tan confiables ya que existen métodos destructivos que no se pueden realizar a edades tempranas y métodos no destructivos como la toma de muestras tomadas por un laboratorio que somete al hormigón a condiciones ideales, es decir a temperaturas que oscilan entre los 20° y 25 °C, una humedad del 100%, a causa de esto los valores de las resistencias en terreno varían bastante con relación a las resistencias obtenidas en un laboratorio. Por esta razón es necesario utilizar un método predictivo más eficiente, este método es el de la madurez.

El método de madurez es una técnica que fue desarrollada a fines del año 1940 y a principio del año 1950, esta técnica relaciona los efectos en la resistencia conjugando la temperatura y la edad del hormigón in-situ. Saúl enuncia que "Muestras de una misma mezcla de hormigón tendrán iguales resistencias si es que tienen iguales valores de madurez, aunque el historial de temperaturas varíe en el transcurso del tiempo".

Existen tres pasos para poder determinar las resistencias en terreno aplicando el método de madurez que son:

1. Establecer la relación resistencia-madurez para la mezcla de hormigón en laboratorio.
2. Obtener los valores de madurez de acuerdo a los datos de temperatura tomados en terreno.
3. Comparar los valores de madurez obtenidos en terreno y en el laboratorio de acuerdo a los distintos historiales de temperatura en cada caso.

El método de la madurez es un buen indicador para determinar el desarrollo de las resistencias en terreno desde que el hormigón se encuentra en su estado fresco hasta cuando este llega a endurecer.

El concepto esta basado en el hecho de que la temperatura es un factor crítico en el proceso de la hidratación del cemento y por ende en el desarrollo de las resistencias del hormigón, especialmente a edades tempranas.

2. CONCEPTO

El método de madurez simplemente es una técnica para predecir la resistencia del hormigón basada en la historia de la temperatura del mismo. La resistencia aumenta con la hidratación del cemento. La cantidad de cemento hidratado depende del tiempo de curado del hormigón y a qué temperatura. La madurez es una medida de cómo ha progresado la hidratación.

Si se coloca un sensor de temperatura en un hormigón grabando la temperatura en todo momento, y luego se trazan estos datos, se obtiene una curva como la mostrada en la Figura 1.

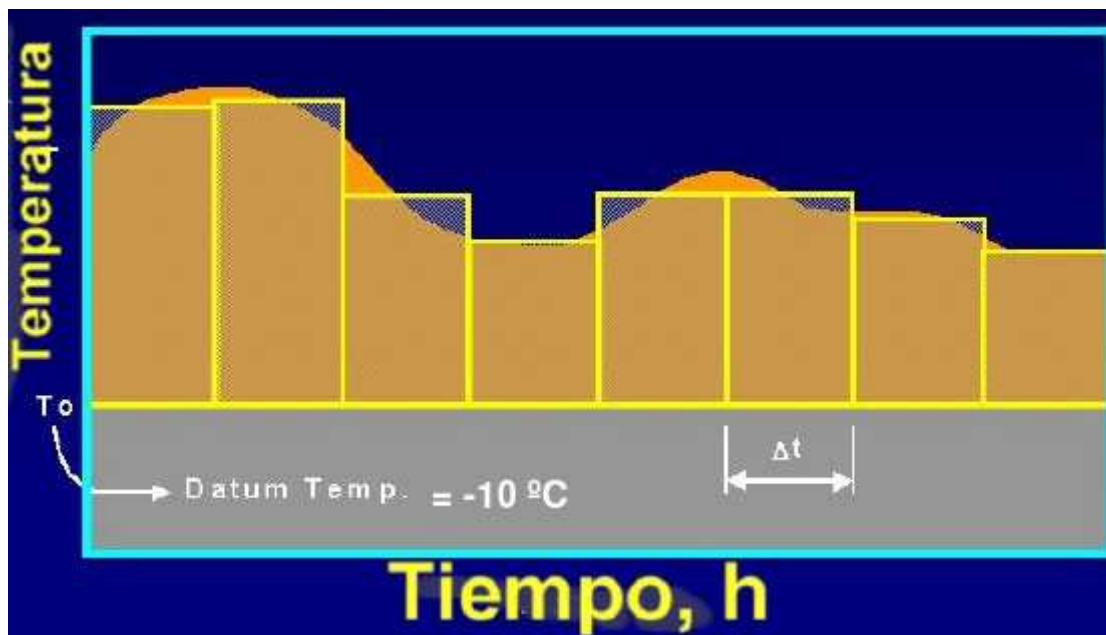


FIGURA 1. FUNCION DE MADUREZ

En la primera parte de la curva, la temperatura aumenta de su temperatura inicial debido al calor generado por la hidratación del hormigón. En la segunda parte, el hormigón fresco sube o baja con la temperatura dependiendo de la temperatura del aire.

En esta figura, T_0 —la temperatura dato— es el punto teórico en que cesa la hidratación. Ese valor es normalmente considerado como -10 °C . La madurez en cualquier momento es simplemente el área bajo la curva.

El supuesto inherente en el método de la madurez es que dos muestras de hormigón con la misma madurez tendrán la misma resistencia, aunque cada una puede haber sido expuesta a condiciones diferentes de curado. Este concepto se ilustra en la Figura 2, una muestra expuesta a bajas temperaturas toma más tiempo para alcanzar una madurez M_1 , y considerando una muestra expuesta a altas temperaturas tarda menos tiempo para alcanzar la madurez M_2 . Si $M_1 = M_2$, entonces estas dos muestras tienen igual resistencias aunque las condiciones de curado individual (tiempo y temperatura) son diferentes.

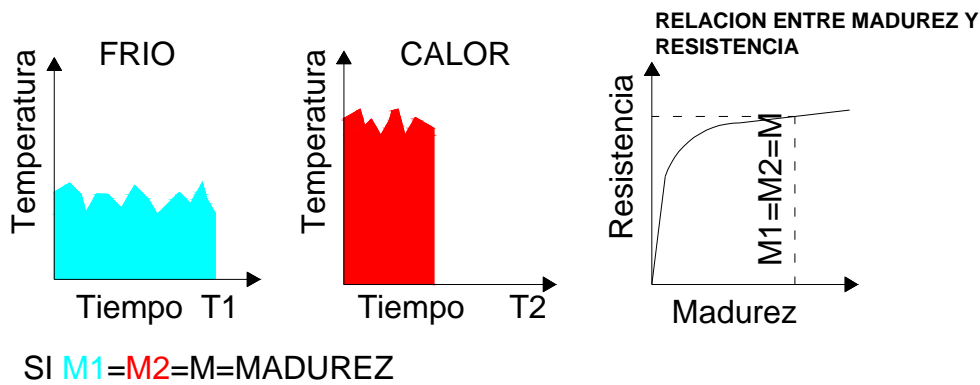


FIGURA 2. CONCEPTO DE MADUREZ

3. ECUACIONES DE MADUREZ

Una función de madurez es una expresión matemática para el cálculo de los efectos combinados de tiempo y temperatura sobre el desarrollo de resistencia de una mezcla cementícea. La característica clave de una función de madurez es la representación de cómo la temperatura afecta la proporción de desarrollo de resistencia. Hay dos acercamientos ampliamente usados:

Ecuación de Nurse Saúl

Ecuación de Arrhennius

3.1. Ecuación de Nurse-Saúl

La relación de madurez de Nurse-Saúl, desarrollada en los años cincuenta, es el producto acumulado de tiempo y temperatura:

$$M = \sum (T - T_0) \cdot \Delta t \quad \text{ECUACION 1. FACTOR TIEMPO TEMPERATURA}$$

Donde:

M = Madurez (factor tiempo y temperatura) a la edad t

Ta = Temperatura promedio del hormigón durante el intervalo de tiempo Δt

T0 = Temperatura dato

Δt = Intervalo de tiempo

La ecuación 1 surge del supuesto que la proporción del desarrollo de resistencia es una función lineal, ésta ecuación se usa para calcular el factor tiempo-temperatura.

Para calcularlo, es necesario conocer el valor apropiado de la temperatura dato para los materiales y condiciones específicas. La temperatura dato puede depender de:

- el tipo de cemento,
- el tipo y dosaje de los agregados en polvo u otro aditivo que afecte la proporción de la hidratación,
- el rango de temperaturas que el hormigón experimentará mientras endurece.

Ésta ecuación es simple y muy popular, sin embargo, no reconoce que la madurez aumenta desproporcionadamente a elevadas temperaturas y que, como se mencionó, éste aumento depende de los materiales cementíceos y de la relación agua-cemento utilizada. Esto hace relativamente inexacta la ecuación para temperaturas extremas y grandes cambios de temperatura. En la mayoría de los casos se subestima la resistencia a temperaturas elevadas y se sobrestima a bajas temperaturas.

Para el cemento de tipo I sin aditivos y un rango de temperatura de curado de 0 a 40 °C, la temperatura dato recomendada es 0°C. Para otras condiciones y cuando se desea una máxima precisión de la estimación de la resistencia, la temperatura dato apropiada puede ser determinada experimentalmente conforme los procedimientos que se indicaran mas adelante. En general, se usa un valor de -10 °C como temperatura dato.

Algunos tipos de instrumentos de madurez que calculan el factor tiempo-temperatura pueden no emplear la temperatura dato apropiada, y por lo tanto puede no indicar el valor verdadero del factor. El valor del factor tiempo temperatura visualizado por el instrumento puede ser corregido de la temperatura dato como sigue:

$$M_c = M_d - (T_0 - T_d)t$$

Donde:

M_c = Factor tiempo temperatura corregido. Grado-días o grado-horas,

M_d = Factor tiempo temperatura visualizado por el instrumento, grado-días o grado-horas

T_0 = Temperatura dato apropiada para el Hormigón, °C,

T_d =Temperatura dato incorporada en el instrumento, °C,

t = Tiempo transcurrido de cuando el instrumento fue prendido hasta que fue tomada una lectura, días u horas.

3.2. Ecuación Arrhenius

La ecuación Arrhenius, responde a la no linealidad en la proporción de la hidratación del cemento. Éste método produce un índice de madurez en términos de

una “edad equivalente” que representa la duración equivalente de curado en la temperatura de referencia que produciría el mismo valor de madurez como el período de curado para la temperatura promedio dada:

$$t_e = \sum_0^t e^{-\frac{\varepsilon}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)} \Delta t \quad \text{ECUACION 2. EDAD EQUIVALENTE}$$

Donde:

t_e : edad equivalente a una temperatura especificada T_s , días u horas,

E = Energía de activación aparente, J/mol.

R = Constante universal de los gases, 8.314 J/mol-K.

T : promedio de temperatura del hormigón, K, durante el intervalo de tiempo Δt .

T_r : temperatura especificada, K, y

Δt : intervalo de tiempo, días u horas.

Esta ecuación se usa para calcular la edad equivalente a una temperatura especificada. Para calcular la edad equivalente es necesario conocer la energía de activación para los materiales y condiciones específicas. La energía de activación depende de:

- el tipo de cemento,
- el tipo y dosaje de los agregados en polvo que afecte la proporción de desarrollo de resistencia
- la relación agua-materiales cementíceos

También se debe conocer la temperatura especificada, t_r . Tradicionalmente se usa un valor de 20 °C, pero otra temperatura conveniente es 23 °C, la cuál debe ser informada con el valor de la edad equivalente.

En general, para cemento de tipo I sin aditivos o adiciones, se utilizan valores de energía de activación en el rango de 40000 a 45000 j/mol. De esta manera un valor aproximado de Q , la energía de activación dividida por la constante de los gases de uso en la ecuación 2, es 5000 K (el valor de la constante de los gases es 8,31 j/ (K-mol)). Para otras condiciones y cuando se desea una máxima precisión de la estimación de la resistencia, el valor apropiado para Q puede ser determinado experimentalmente conforme a los procedimientos que se indicaran mas adelante.

Los instrumentos de madurez que calculan la edad equivalente conforme a la ecuación. 2, son basados en valores específicos de la energía de activación. Las lecturas visualizadas no pueden ser corregidas para el valor de la energía de

activación apropiada del hormigón usado. El usuario debe reconocer esta limitación cuando el hormigón colocado tiene un valor de energía de activación que es ampliamente diferente que la incorporada en el instrumento.

Aunque es un poco más complicada, esta ecuación proporciona los resultados más exactos cuando la temperatura varía ampliamente.

3.3. Resumen de ecuaciones

<p>Factor tiempo-temperatura</p> $M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t$	<p>M= Índice de madurez, °C-horas</p> <p>T = Temperatura promedio del hormigón, °C, Durante el intervalo de tiempo Δt</p> <p>T0 = Temperatura dato (usualmente se toma 0°C)</p> <p>t = tiempo transcurrido, horas</p> <p>Δt = Intervalo de tiempo, horas</p>
<p>Edad equivalente</p> $t_e = \sum_0^t e^{\frac{-E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)} \Delta t$	<p>te = Edad equivalente a la temperatura de referencia</p> <p>E = Energía de activación aparente, J/mol (ver ASTM C 1074 para valores típicos)</p> <p>R = Constante universal de los gases, 8.314 J/mol-K</p> <p>T = Temperatura promedio del hormigón, Kelvin, durante el intervalo de tiempo Δt</p> <p>Tr = Temperatura de referencia absoluta, Kelvin</p> <p>Δt = Intervalo de tiempo, horas</p>
<p>Madurez cargada/ Factor C</p> $M = \sum_0^t \frac{10 [C^{(0.1T_i - 1.245)} - C^{-2.245}]}{\ln C} \Delta t$	<p>M= Madurez cargada, °C-horas</p> <p>T = Temperatura promedio del hormigón, °C, durante el intervalo de tiempo Δt</p> <p>C = Factor cargado para el tipo de</p>

material cementíceo

t = Tiempo transcurrido, horas

Δt = Intervalo de tiempo, horas

TABLA 1. ASTM C 1074 Y FUNCIONES DE MADUREZ EUROPEAS

3.4. Determinación de la temperatura dato o de la energía de activación

3.4.1. Procedimiento

1. El ensayo requerido para determinar experimentalmente la temperatura dato o la energía de activación puede ser realizado usando las probetas de mortero, y los resultados son aplicables al hormigón en investigación. El enfoque básico es para establecer las relaciones entre la resistencia a compresión y la edad para probetas de mortero curadas en baños de agua mantenidos a tres temperaturas diferentes. Dos baños deben estar en las temperaturas máximas y mínimas esperadas para el hormigón colocado durante el período en que se estimó la resistencia. La tercera temperatura del baño debe ser la mitad entre los extremos. Dependiendo del procedimiento de análisis de datos que se usa, también pueden medirse los tiempos de fraguado final del mortero a las tres temperaturas.

2. Proporcionar una mezcla de mortero que tiene una relación de agregado fino - cemento (en masa) que es igual a la relación de agregado grueso y cemento de la mezcla de hormigón en investigación. La pasta tendrá la misma relación agua-materiales cementíceos y las mismas cantidades de mezclas que serán usadas en el hormigón.

3. Si los datos de resistencia serán analizados usando el procedimiento indicado en 7. Deben medirse los tiempos de fraguado finales. Para ello preparar tres probetas de mortero, cuidadosamente sumergir cada probeta en su baño a la temperatura correspondiente. Determinar el tiempo de fraguado final por cada temperatura. Las probetas son quitadas de los baños de agua y se quita el agua de exceso previo a hacer las medidas de penetración. Si los datos serán analizados utilizando los procedimientos de la regresión en 8, no es necesario medir los tiempos de fraguado.

4. Prepare tres conjuntos de cubos de mortero de 50 mm., con 18 cubos por conjunto. Moldear los cubos y cuidadosamente sumergir cada conjunto en uno de los baños de temperatura. Para cada conjunto, quitar los moldes y devolver las probetas a sus baños respectivos aproximadamente 1 h antes de la primer serie de ensayos de compresión.

5. Para cada conjunto de cubos, determinar la resistencia a compresión de tres cubos a una edad que es aproximadamente dos veces el tiempo de fraguado final. Si los tiempos de fraguado finales no fueron medidos, realizar la primer prueba cuando la resistencia a compresión es aproximadamente de 4 MPa. Realizar las pruebas subsiguientes de tres cubos de cada conjunto a edades que son aproximadamente dos veces la edad de los ensayos anteriores.

Por ejemplo, si el tiempo del primer ensayo fue de 12 horas, los sucesivos ensayos de resistencia a compresión serían realizados a 1, 2, 4, 8, 16 y 32 días.

6. Los datos de resistencia-edad obtenidos a las tres temperaturas de curado son analizados para determinar la relación entre la razón constante para el desarrollo de resistencia (valor K) y la temperatura de curado. Se pueden usar diferentes procedimientos dependiendo de las herramientas de computación disponibles. Si, por ejemplo, se tiene la capacidad para realizar análisis de regresión lineal, se debe usar el procedimiento descrito en 7 u 8.2. Si tiene un programa de computadora que puede realizar análisis de regresión con una función general, use el procedimiento descrito en 8.1.

7. En este caso deben ser conocidos los tiempos de fraguado final a las tres temperaturas. Preparar un gráfico con la inversa de la resistencia como eje y, y la inversa de la edad como el eje x. Para cada temperatura de curado. Trazar la inversa del promedio de la resistencia de un cubo en el eje x. Un ejemplo se muestra en la figura 3. Luego se debe determinar la pendiente y la intersección de la mejor línea recta de ajuste a través de los datos para cada temperatura de curado. Para cada línea recta, dividir el valor de la intersección por el valor de la pendiente. Estos cocientes son los valores K que son usados para calcular la temperatura dato o la energía de activación.

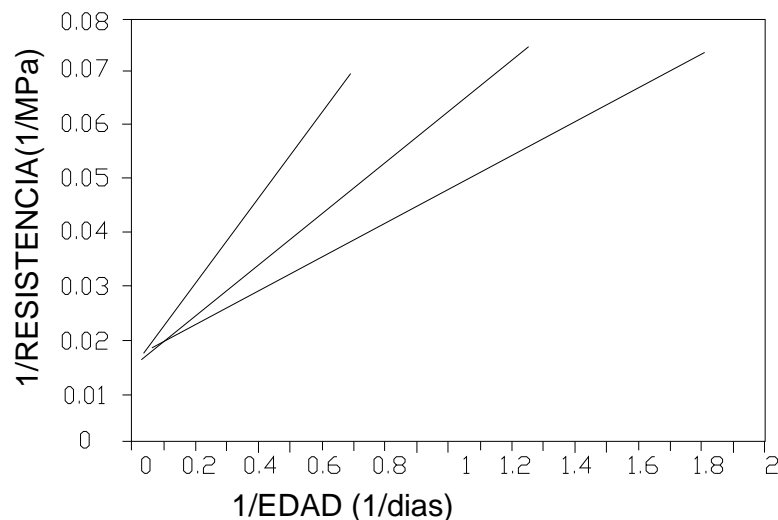


FIGURA 3. INVERSA DE LA RESISTENCIA - INVERSA DE LA EDAD

8. Como una alternativa para el procedimiento indicado en 7, los valores K pueden ser estimados por cualquiera de los siguientes métodos. En estos casos, los tiempos de fraguado final no tienen que ser medidos.

8.1. Si el usuario tiene acceso a un programa de computadora que permitirá el ajuste de una ecuación general para un conjunto de datos, determine los valores K

ajustando la siguiente ecuación para los datos resistencia edad para cada temperatura de curado:

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

Donde:

S= Resistencia a compresión promedio de un cubo a la edad t,

T= edad de ensayo,

S_u =Resistencia límite,

t_0 = Edad cuando se asume que comienza el desarrollo de resistencia,

K= Constante de proporción.

El programa de computadores calculará los valores más adecuados de S_u , t_0 y K.

8.2 Los valores K también pueden ser estimados por el siguiente método.

8.2.1 Usando los datos de edad-resistencia para las últimas cuatro edades de ensayo, trazar la inversa de la resistencia (eje y) y la inversa de la edad (eje x). Determinar la intersección con el eje y. La inversa de la intersección es la resistencia límite S_u . Repetir este procedimiento para cada temperatura de curado.

8.2.2 Para cada temperatura de curado, usar los datos edad-resistencia a las cuatro edades de ensayo más tempranas y el valor de S_u para calcular los valores de A para cada resistencia, donde A esta dada por la siguiente ecuación:

$$A = \frac{S}{(S_u - S)} \quad \text{ECUACION 4}$$

8.2.3 Para cada temperatura de curado, trazar los valores de A versus la edad. Determinar la pendiente de las mejores líneas rectas de ajuste para cada temperatura de curado. Éstas pendientes son los valores K.

3.4.2. Determinación de la temperatura dato

Trazar los valores K como una función de las temperaturas de los baños de agua (Fig. 4). Luego, determinar la mejor línea recta de ajuste por los tres puntos y la intersección de ésta línea con el eje de temperatura. Ésta intersección es la

temperatura dato, t_0 que es usada en el cálculo del factor tiempo-temperatura conforme la ecuación 1.

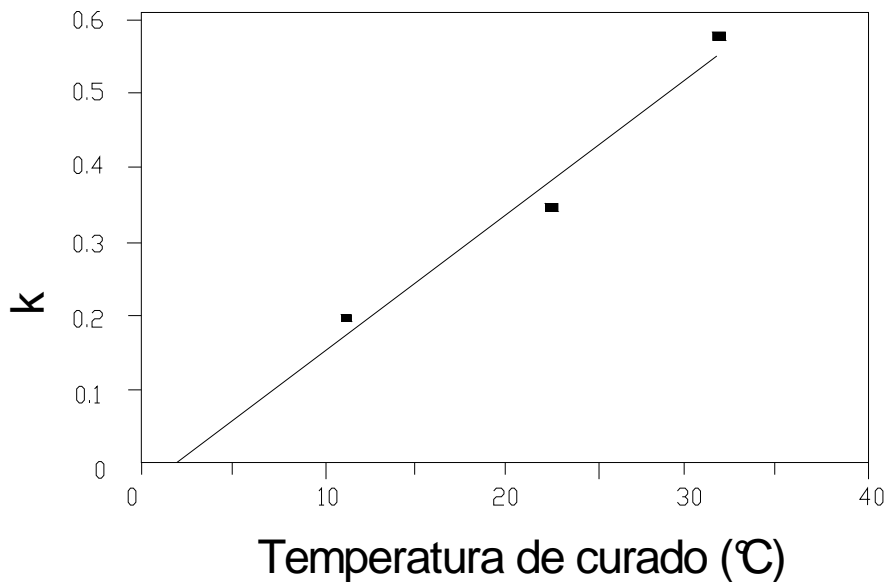


FIGURA 4 . EJEMPLO DE TRAZA DE VALORES K VERSUS TEMPERATURA DE CURADO PARA LA DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DATO.

3.4.3. Determinación de la energía de activación

Calcular los logaritmos naturales de los valores K, y determinar las temperaturas absolutas (en Kelvin) de los baños de agua ($\text{kelvin} = \text{Celsius} + 273$).

Luego, trazar el logaritmo natural de los valores k como una función de la inversa de la temperatura absoluta (Fig. 5), determinando la mejor línea recta de ajuste por los tres puntos. El negativo de la pendiente de la línea es el valor de la energía de activación dividido por la constante de los gases, Q, que se usa en el cálculo de la edad equivalente conforme la ecuación 2.

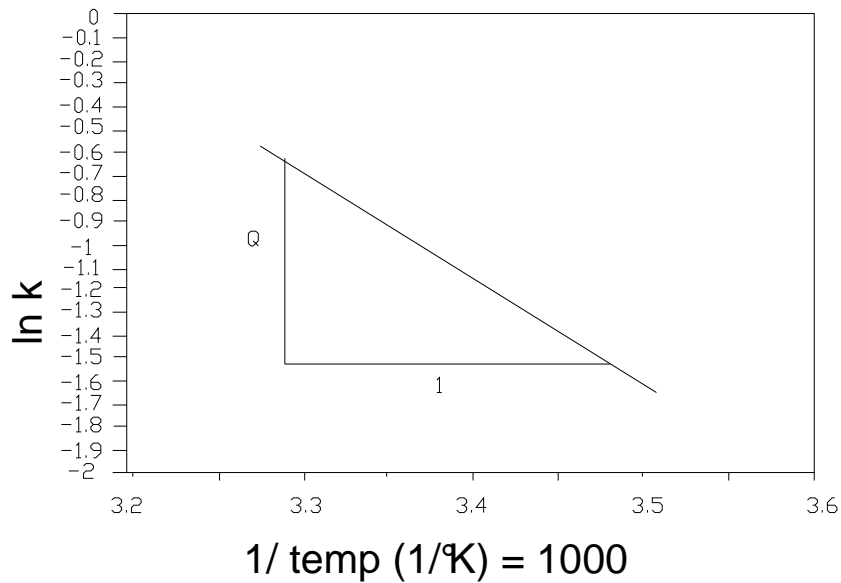


FIGURA 5. EJEMPLO DE TRAZA DEL LOGARITMO NATURAL DE LOS VALORES K VERSUS LA INVERSA DE LA TEMPERATURA ABSOLUTA PARA DETERMINAR EL VALOR DE Q USADO EN EL CALCULO DE LA EDAD EQUIVALENTE

4. EQUIPOS

Hay dos tipos principales de equipo de madurez:

- los sensores de temperatura (termistores o termocuplas) incluidos en el hormigón con equipo de registro fuera del hormigón, y
- el sensor de temperatura y el equipo de registro combinados en un solo paquete. Este equipo puede ser cableado o inalámbrico.



Sin tener en cuenta el tipo de equipo usado, los sensores de temperatura deben ponerse en las ubicaciones críticas dentro del hormigón.

Las ubicaciones de los sensores (termocuplas o microprocesadores) para las aplicaciones de madurez de pavimentos de hormigón dependen de cómo se usaran los datos. Se presentan a continuación algunas pautas de las ubicaciones generales:

- Los sensores colocados en la mitad de la losa son útiles para determinar la resistencia promedio de la losa y los tiempos apropiados por abrir el tránsito.
- Los sensores colocados dentro de 1" (2.5 centímetros) de la superficie puede usarse para determinar el tiempo de cerrado de juntas.
- Los sensores deben ser colocados por lo menos 2 pies (0.6 m) fuera del borde de la losa.
- Los sensores deben ser colocados en intervalos entre 500 y 1000 pies (150 y 300 m) a lo largo de la longitud del pavimento para responder a las variaciones en tiempo de la colocación y proporcionar estimaciones de los tiempos óptimos de cerrado de juntas en cada intervalo o sección.
- Los sensores se pegan a menudo a estacas que están conducidas en la base previa para operaciones de pavimento permitiendo la colocación del sensor a la profundidad deseada.

5. PROCESO DE PRUEBA DE MADUREZ

Los procesos de prueba de madurez consisten esencialmente en dos pasos: Desarrollar la curva de madurez y medir la madurez del hormigón colocado. Con ésta información, puede ser monitoreada y evaluada la resistencia del hormigón colocado.

5.1. Desarrollo de la curva de calibración de madurez

El desarrollo de la curva de calibración de madurez para cualquier mezcla de hormigón dada puede hacerse en el laboratorio antes de la construcción del pavimento actual; alternativamente, puede ser realizada en el campo al principio de la construcción del pavimento. En cualquier caso, deben usarse los materiales específicos del proyecto porque las curvas de la calibración son dependientes de las características de la mezcla específica; cualquier cambio en el material origen, en las proporciones de la mezcla, o en el equipo de mezclado requiere el desarrollo de una nueva curva de la calibración.

Los pasos generales en el desarrollo de una curva de madurez se describen a continuación:

1. Moldear como mínimo 15 probetas de vigas o cilindros, estando seguro de ensayar el contenido de aire y el asentamiento. Generalmente se prefieren los cilindros porque ellos son más fáciles manejar y porque hay menos variabilidad asociada con los resultados de ensayos de resistencia a compresión comparados a los resultados de ensayos de resistencia a flexión.
2. Embeber los sensores de temperatura dentro de ± 15 mm. del centro de por lo menos 2 probetas. Conectar los sensores a los instrumentos de madurez o a los equipos de registro de temperatura. Estas probetas no se ensayarán pero se usarán para evaluar la madurez de las mismas.

Un método para ayudar en el posicionamiento propio del sensor es insertar una barra rígida de pequeño espesor en el centro del cilindro fresco. La barra empujará a un lado interfiriendo a las partículas de agregado. Luego de que la barra y el sensor se

insertan en el cilindro, la cara del cilindro moldeado deberá ser golpeada con un martillo de goma o barra de compactar asegurándose de que el hormigón entre en contacto con el sensor.

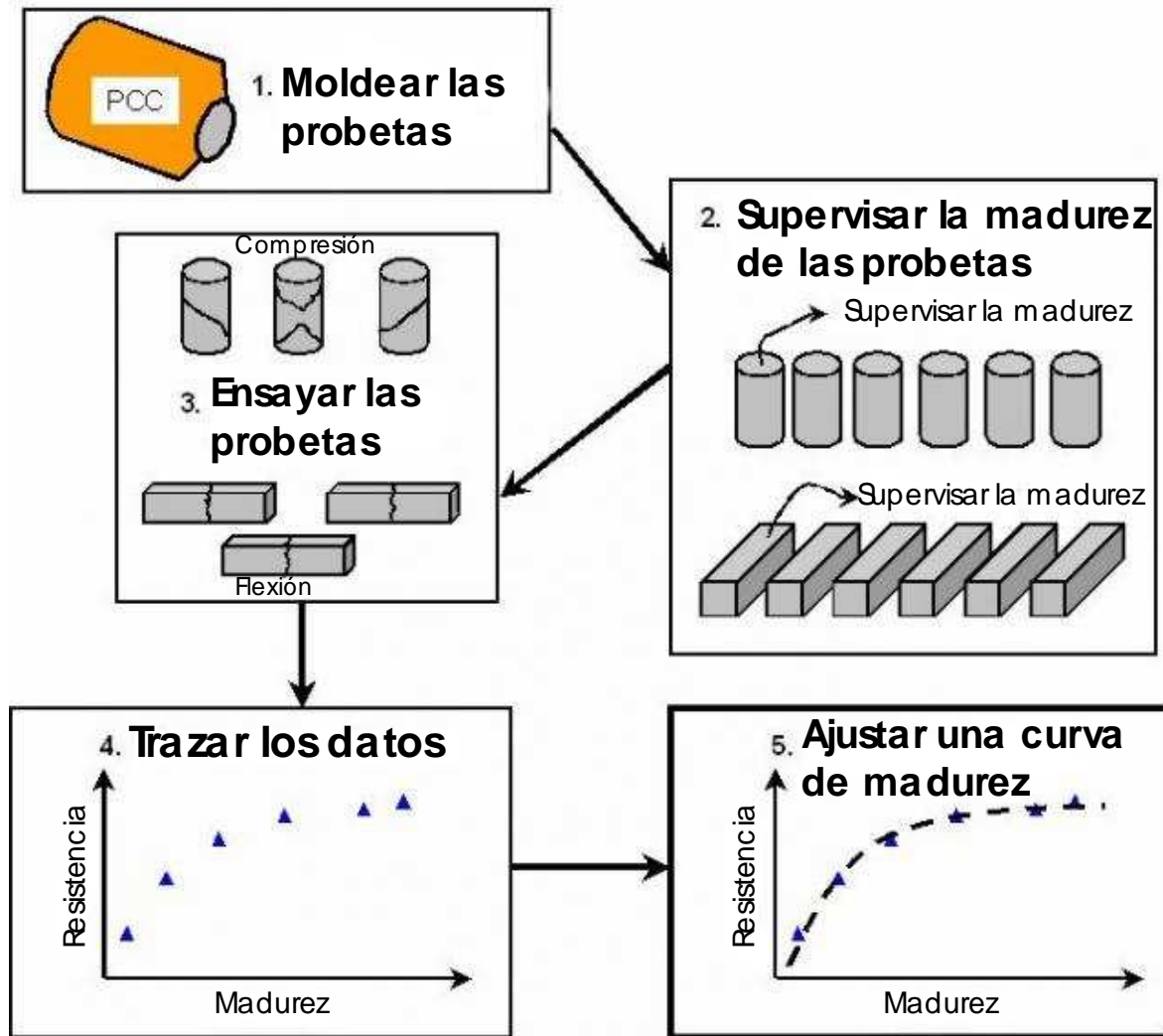
3. Se realizará el curado de las probetas

4. Realizar ensayos de compresión a edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días. Ensayar 2 probetas a edad temprana y computar la resistencia promedio. Si el rango de resistencia a compresión de las 2 probetas excede el 10 % de su resistencia promedio, ensayar otro cilindro y computar el promedio de los tres ensayos. Si el resultado del ensayo bajo es debido a una probeta defectuosa, desecharlo.

A edades tempranas de ensayo, registrar el índice de madurez para las muestras instrumentadas.

- Si se usan instrumentos de madurez, registre el promedio de los valores exhibidos.
- Si se usan registros de temperatura. Evalúe la madurez de acuerdo a la ecuación 1 o a la ecuación 2. Use un intervalo de tiempo de $\frac{1}{2}$ hora o menos de las primeras 48 horas del registro de la temperatura.

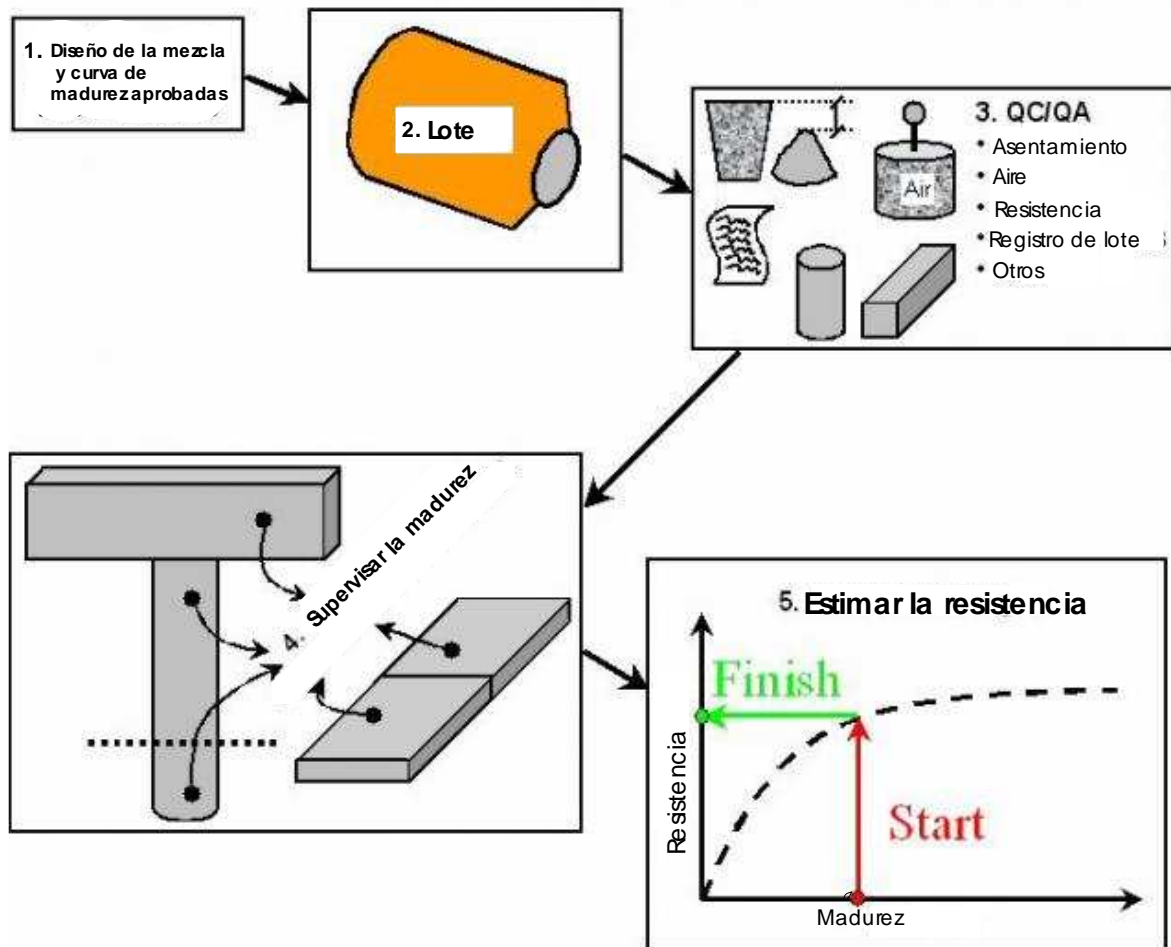
5. Sobre papel gráfico, trazar la resistencia a compresión promedio como una función del valor promedio del índice de madurez. Dibujar la curva mas adecuada con los datos. La curva resultante es la relación madurez-resistencia a ser usada para estimar la resistencia de la mezcla de hormigón curada bajo otras condiciones de temperatura.



5.2. Estimación de la resistencia in-situ

Cuando sea posible, luego de colocado el hormigón, embeber los sensores de temperatura en el hormigón fresco y conectar inmediatamente a un dispositivo de madurez apropiado. Se deben tener en cuenta las ubicaciones críticas en la estructura en términos de condiciones expuestas y requerimientos estructurales.

Posteriormente se toman las medidas de madurez a intervalos regulares. La resistencia del hormigón in-situ puede ser estimada utilizando la curva de calibración previamente desarrollada.

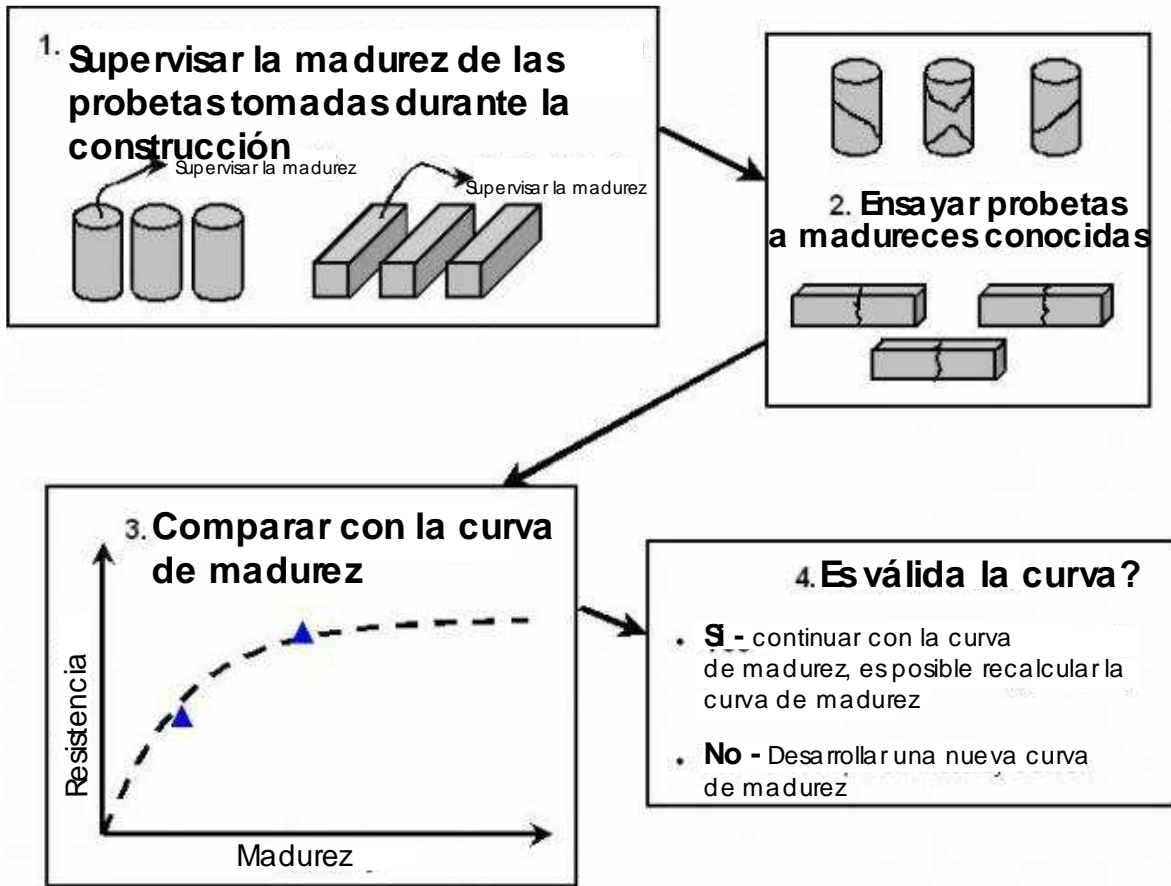


5.3. Verificar la curva de madurez

Puesto que los materiales, el rendimiento de los equipos de mezclado, y las condiciones de la construcción pueden variar con el tiempo, es importante verificar la relación de la resistencia-madurez. La curva de madurez debe verificarse periódicamente a lo largo de la duración de un proyecto, antes de realizar las operaciones de seguridad críticas, y siempre que exista cualquier duda sobre la curva. Hay dos métodos para verificar la curva de madurez:

- Supervisar la madurez de las probetas moldeadas durante la construcción y comparar estas resistencias con la curva de madurez, o
- Estimar la resistencia in-situ usando otros métodos

La comprobación de la curva de madurez debe ser un componente del plan de calidad global para cualquier proyecto. Este proceso asegura que la relación es actual y viable. Muchas característica técnicas usarán este paso para revisar o recalcular la curva de madurez.



6. USO DEL METODO DE MADUREZ

Algunas de las aplicaciones típicas para usar la madurez en un proyecto de pavimento de hormigón son determinar los tiempos apropiados para abrir el tránsito, para aserrar las juntas, entre otras cosas. La determinación del tiempo de la apertura para el tránsito es uno de los más grandes beneficios, especialmente porque crece continuamente la cantidad de pavimentos de hormigón que se construyen bajo condiciones aceleradas ("fast-track"). Como el desarrollo de la resistencia efectiva del hormigón es sensible a las condiciones de curado locales (por ejemplo, la temperatura ambiente y la humedad), la apertura de proyectos fast-track para el tránsito debe estar basada en la resistencia del hormigón colocado en vez del tiempo de curado. Las resistencias mínimas de apertura variarán, dependiendo del diseño de la losa, las condiciones de apoyo, y las cargas del tránsito esperadas, pero las resistencias de flexión mínimas son típicamente de 2067 kPa (300 lbf/in²).

Para probar el método de madurez, utilizamos un hormigón fast track con la siguiente dosificación:

Materiales	Peso (kg/m ³)	Densidad	Volumen (m ³)
 cemento	430	3,15	0,137
 Agregado grueso	927	2,67	0,347

Agregado fino	956	2,65	0,361
agua	139	1,00	0,139
aditivo	2,15	1,00	0,002
aire			0,015
			1,000

a/c: 0,32

Luego de supervisar la madurez y la edad equivalente, y realizando los ensayos de compresión a determinadas edades obtuvimos los siguientes resultados:

Tiempo (hs)	Resistencia (Mpa)	Temperatura (°C)	Factor tiempo-temperatura (°C.hs)	Edad equivalente (hs)
19	37,2	23	646	24
19	36,6	23	646	24
24,5	43,9	24	829	30,7
24,5	40,3	24	833	30,9
43	61,9	21	1441	52,8
43	58	21	1444	53
48	55,3	22	1598	58
48	65,2	22	1601	58

Madurez - Resistencia

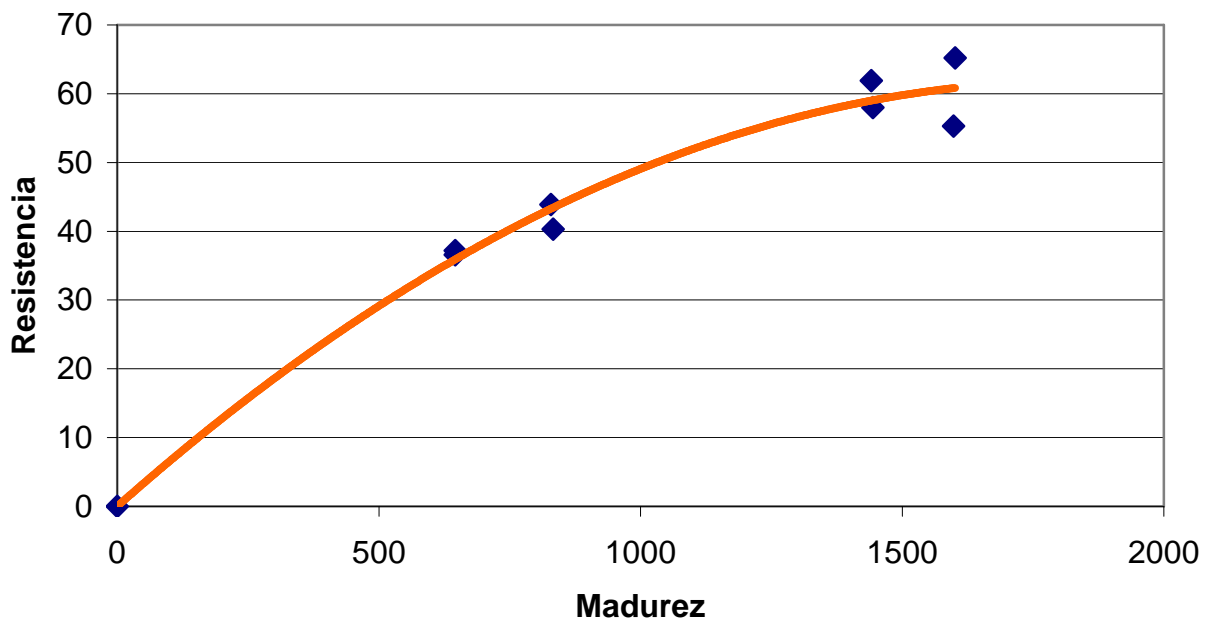
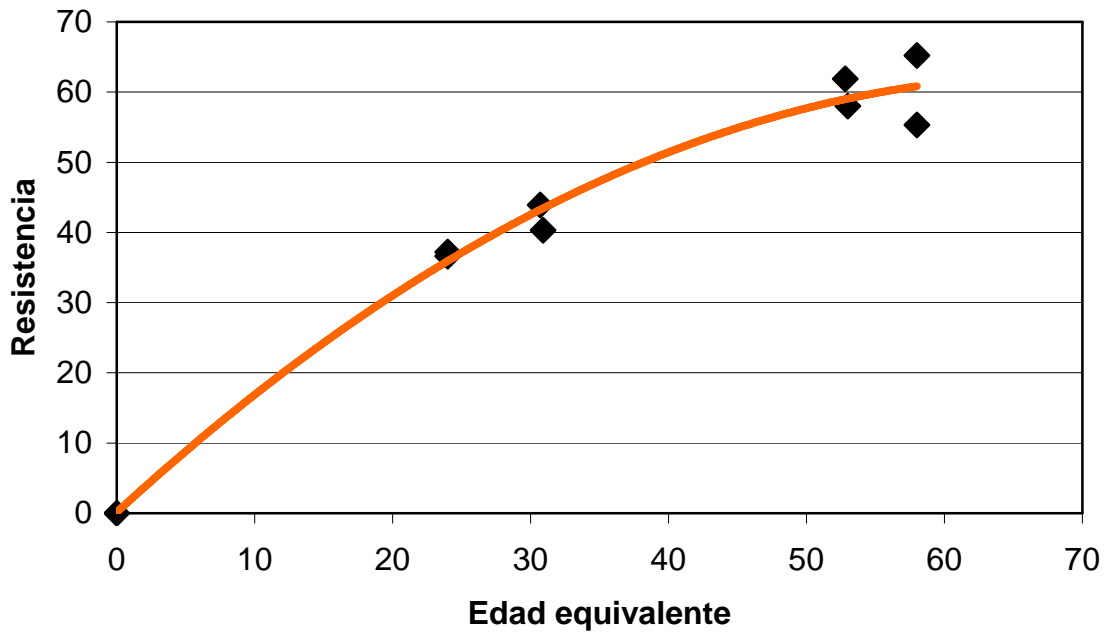


FIGURA 6. CURVA DE MADUREZ: RESISTENCIA-MADUREZ

Edad equivalente - Resistencia



CURVA 7. RESISTENCIA - EDAD EQUIVALENTE

Luego, durante el tiempo de colocación del hormigón en obra, se insertan los sensores de madurez en el hormigón fresco, teniendo en cuenta las ubicaciones críticas ya mencionadas. Se verifican las medidas de madurez periódicamente.

7. REGLAMENTACION Y NORMATIVA EXISTENTE

Actualmente no hay normativa existente en el país sobre madurez, la norma que se puede revisar para consultas es ASTM C 1074 – 98.

7.1. CIRSOC

Aplicación de la madurez del hormigón

Como alternativa a lo especificado en el Ensayo de probetas moldeadas –CIRSOC se puede utilizar la madurez del hormigón.

El endurecimiento alcanzado aplicando el criterio de madurez se puede evaluar comparando la madurez desarrollada por el hormigón colocado en la estructura con la madurez correspondiente al hormigón curado en condiciones de laboratorio. La madurez del hormigón se calcula aplicando la siguiente expresión:

$$M = \sum (T - T_0) \cdot \Delta t \quad (1)$$

Donde:

M = Madurez en grados centígrados por hora o grados centígrados por día.

T = La temperatura en el interior del hormigón en grados centígrados.

Δt = La duración del curado a la temperatura T, expresada en horas o días.

Este reglamento considera que el **hormigón colocado en la estructura ha desarrollado la resistencia requerida** o tiene el **curado especificado**, cuando su madurez (en el sitio) sea igual a alguna de las indicadas a continuación, según corresponda:

- La madurez necesaria para alcanzar la resistencia requerida en condiciones de curado de laboratorio.
- La madurez del hormigón curado en condiciones de laboratorio hasta la edad especificada.

7.2. ASTM C 1074 – 98

Contenidos básicos de la norma

- Terminología.
- Funciones de madurez.
- Procedimiento para desarrollar relaciones resistencia madurez.
- Procedimiento para estimar la resistencia del hormigón in-situ.
- Determinación de la temperatura dato y de la energía de activación.

8. CONCLUSIONES

La prueba de madurez es un efectivo medio para supervisar la ganancia de resistencia temprana de pavimentos de hormigón. El principal beneficio de usar este método es que proporciona un medio no destructivo relativamente rápido para supervisar continuamente la resistencia del hormigón permitiendo evaluar la resistencia efectiva del pavimento. Esta valiosa información puede usarse para ayudar a determinar el tiempo apropiado para:

- habilitar un pavimento al tránsito,
- aserrar las juntas,
- retirar los encofrados, o
- cesar el aislamiento durante el tiempo frío.
- puede supervisarse la resistencia in-situ en las ubicaciones críticas del hormigón a edad temprana.
- permite una programación de construcción acelerada.

Este método, logra así, una relación directa entre los hormigones de laboratorio con los hormigones de obra ya que ambos llevan un control a una misma temperatura dando así similares valores de madurez.

Las principales desventajas son:

- Deben desarrollarse curvas de calibración basadas en los materiales específicos del proyecto. Cualquier cambio en el diseño de la mezcla de hormigón requerirá una nueva curva de calibración.
- El costo es un factor importante. Debe tenerse en cuenta el estudio del uso de los medidores para poder interpretar los resultados correctamente.
- Pueden no caracterizarse totalmente los efectos de la temperatura del hormigón a edad temprana sobre la resistencia a largo plazo. En algunos casos, cuando se cura el hormigón a altas temperaturas, puede desarrollar mayor resistencia a edad temprana pero reducida resistencia a largo plazo.
- Algunos factores que afectan la resistencia del hormigón, por ej. la compactación, no puede reflejarse en las medidas de madurez.

GLOSARIO

Temperatura dato. La temperatura que es sustraída de la temperatura medida en el hormigón para calcular el factor tiempo-temperatura de acuerdo a la Ecuación de Nurse-Saúl.

Edad equivalente. El número de días u horas a una temperatura especificada requerida para producir una madurez igual a la madurez lograda por un periodo de curado diferente de la temperatura especificada.

Madurez. La extensión del desarrollo de una propiedad de una mezcla cementícea. Mientras el término es usado para describir la extensión del desarrollo de la resistencia relativa, también puede ser aplicada a la evolución de otras propiedades que son dependientes de las reacciones químicas que ocurren en una mezcla cementícea. En cualquier momento la madurez depende de la historia del curado.

Función de madurez. Una expresión matemática que usa el historial de temperatura medida de una muestra cementícea durante el periodo de curado para calcular un índice que es indicativo de la madurez al final del periodo.

Índice de madurez. Un indicador de madurez que es calculado del historial de temperatura de la mezcla cementícea usando una función de madurez. El índice computado es indicativo de la madurez siempre y cuando haya habido suficiente abastecimiento de agua para la hidratación o para una reacción puzolánica de los materiales cementíceos durante el tiempo usado en el cálculo. Dos índices de madurez ampliamente usados son el *factor tiempo-temperatura* y la *edad equivalente*.

Método de madurez. Una técnica para estimar la resistencia del hormigón que está basada en la suposición de que muestras de una mezcla de hormigón dada consiguen la misma resistencia si consiguen mismos valores de índice de madurez.

Relación madurez- resistencia. Una relación empírica entre la resistencia a compresión y el índice de madurez se obtiene mediante probetas de ensayo cuyas historias de temperatura llegan hasta el momento en que la prueba ha sido registrada.

Factor tiempo - temperatura. Índice de madurez computado para la ecuación de Nurse-Saúl.

BIBLIOGRAFÍA

Federal Highway Administration

Techbrief: **Maturity** Testing for Concrete Pavement Applications
<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/pccp/pubs/06004/06004.pdf>

Temperature meters & Maturity meters
<http://www.maturitycentral.com/>

IMPLEMENTATION OF CONCRETE MATURITY METERS
http://www.transportation.njit.edu/NCTIP/final_report/IMPLEMENTATION_OF_CONCRETE_MATURITY_METERS.pdf

MATURITY METHOD IN PRESTRESSED CONCRETE APPLICATIONS
http://www.transportation.njit.edu/nctip/final_report/MaturityMethodPrestressedConcreteApplications.pdf

XVI JORNADAS CHILENAS DEL HORMIGON
Evaluación del grado de madurez con cementos nacionales

CONCRETE CONSTRUCTION MAGAZINE
Using the maturity method to predict concrete strength. October 1, 1987

Maturity and strength. January 15, 2004
www.concreteconstructiononline.com

<http://courses.washington.edu/cm420/lec8/sld011.htm>