

Madurez y RESISTENCIA^{1*}

Los métodos de madurez pueden acelerar la construcción con concreto e incrementar la seguridad.

El concreto en un cilindro de pruebas o en una estructura rara vez curan a la misma temperatura. En clima frío, la estructura puede curar más lentamente, y puede curar más rápidamente cuando la hidratación del cemento calienta el concreto en

los moldes. Dado que no se conoce la resistencia en el lugar, es necesario esperar para asegurarse que el concreto haya alcanzado la resistencia antes de descimbrar, de esforzar los cables de postensado o de permitir el tráfico en una superficie de la carretera.

Cabe decir que es necesaria una manera confiable para determinar la resistencia real del concreto en la estructura; es allí en donde entra la prueba de madurez. Esta madurez del concreto puede indicar directamente la resistencia en el lugar y, puesto que la madurez puede leerse continuamente, se podrá conocer la resistencia en tiempo real, inclusive a una edad temprana.



Se espera que el proyecto de Cinco Intersecciones en la Altura, en Dallas, consuma aproximadamente 7000 registradores de madurez.

Figura 1

La temperatura del concreto en el lugar varía durante los primeros días de su vida.

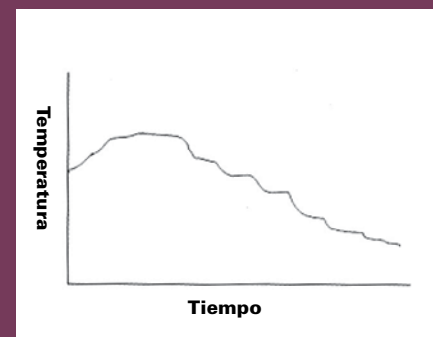
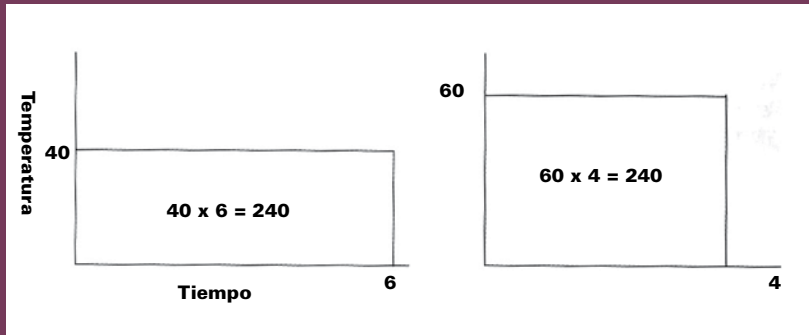


Figura 2

Los cilindros curados a temperaturas diferentes para tiempos diferentes pueden tener la misma madurez.



Las pruebas de madurez del concreto proporcionan muchos beneficios, por ejemplo:

- Pueden permitir el tráfico en las superficies de concreto tan pronto haya sido alcanzada la resistencia necesaria.
- Los cables de postensado pueden ser tensados más pronto.
- Los moldes pueden descimbrarse más rápido y con la confianza de una operación segura además de que las cimbras rentadas pueden ser devueltas pronto.
- Puede monitorearse la resistencia en el lugar en ubicaciones críticas y en el concreto más joven.
- Los efectos del clima frío sobre la ganancia de resistencia pueden ser monitoreados

y los sistemas de calentamiento detenidos más rápidamente.

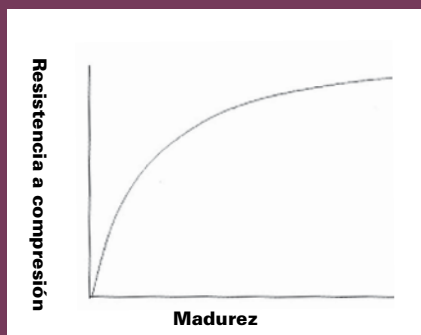
- Algunos de los sistemas ahora disponibles proporcionan datos a prueba de manipulaciones para demostrar que el concreto ha ganado la resistencia apropiada y que no fue sometido a temperaturas inusualmente altas o bajas.
- La reducción del tiempo de trabajo permite que los contratistas reciban su pago más rápidamente al tiempo que se reducen las horas de labores.
- El número de los cilindros de prueba o de vigas que tienen que hacerse y probarse se reduce en gran medida.
- La temperatura baja o alta —o un gradiente de temperatura demasiado grande— puede mandar una señal de alerta.

EL CONCEPTO

La madurez de un concreto hace referencia a la amplitud de la hidratación del cemento. Esta madurez se mide tomando el diferencial de la curva tiempo-temperatura. Cierto, eso es cálculo, pero no se sorprenda; si tuviera que poner un sensor de temperatura en un elemento de concreto y luego registrar la temperatura cada hora para después hacer una gráfica de esos datos, obtendría una curva parecida a la de la Figura 1. En la primera parte de la curva, la temperatura se eleva desde su temperatura inicial debido al calor generado por la hidratación del concreto. En la segunda parte de la curva, el concreto se enfría con la temperatura elevándose y disminuyendo, en gran medida dependiendo de la temperatura del

Figura 3

La curva de madurez-resistencia nos indica la resistencia para cualquier madurez, sin importar la temperatura de curado.



Los métodos de madurez se usaron para acelerar la construcción del puente Interstate-40, en Oklahoma, dañado por una colisión de una barcaza.



Cerca de 3100 segmentos de traveses en cajón para el Puente Sobre el Río Maumee en Toledo, Ohio, fueron colados con sondas de madurez empotradas para permitir la remoción más temprana de las cimbras.

aire. En esta figura, T_0 —la temperatura de referencia— es el punto teórico en el cual se detiene la hidratación. Generalmente se supone que ese valor es de 7.7°C . La madurez en cualquier momento es simplemente el área bajo la curva.

Pueden usarse dos fórmulas para calcular esta área para proporcionar un valor de madurez o un índice de madurez. La fórmula más simple, llamada la *Ecuación Nurse-Saul*, proporciona un valor llamado

Función Temperatura-Tiempo (TTF por sus siglas en inglés). Esta ecuación es efectiva dentro del rango de temperaturas de aproximadamente 5 a 30°C . Muchos fabricantes de medidores de madurez lo usan dada su simplicidad.

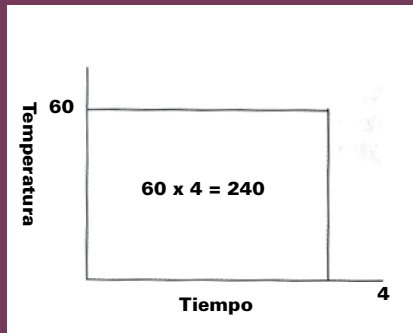
La segunda ecuación, la *Arrhenius*, proporciona un valor llamado *Edad equivalente*. Aunque un poco más compleja, esta ecuación proporciona resultados más precisos cuando la temperatura varía en forma importante. Un aspecto interesante es el concepto de edad equivalente. Un ejemplo: digamos que se tienen dos cilindros que curan a temperaturas constantes diferentes (Figura 2). El primero cura duran-

te 6 días a 4.4° C por encima de la temperatura de referencia, el cual supondremos que es de 4.4° C ($4.4 + 7.7 = 12.1^{\circ}\text{C}$). El segundo cura durante 3 días a 26.6° C por encima de la referencia ($26.6 + 7.7 = 34.3^{\circ}\text{C}$). Aunque hay una diferencia de 3 días en la edad real desde que los cilindros fueron colados, tienen la misma edad equivalente, la misma madurez.

¿Por qué tiene importancia la madurez? Las pruebas han demostrado que para una mezcla dada de concreto, la misma madurez es igual a la misma resistencia, sin importar la temperatura del curado. Esto significa que para los dos cilindros en la Figura 2 (suponiendo que están hechos de la misma mezcla de concreto) aun cuando uno tiene una edad de 3 días y el otro de 6, tendrán la misma resistencia. Ahora todo lo que tenemos que hacer es desarrollar una curva que muestre la resistencia a compresión (o a flexión) del

Figura 4

La curva de madurez-resistencia nos indica la resistencia para cualquier madurez, sin importar la temperatura de curado.



concreto a cualquier madurez (o edad equivalente), como se muestra en la Figura 3.

Esta relación de madurez ha sido conocida desde mediados de los años cincuenta, pero no se usó mucho fuera del laboratorio ya que no se contaba con un equipo de fácil manejo. En 1987, la *American Society for Testing and Materials (ASTM)* por primera vez aprobó la norma C 1074 que estandarizó el procedimiento para desarrollar relaciones de resistencia-madurez. Aunque existen maneras para resolver todo el procedimiento (más tarde), los pasos típicos consisten en desarrollar primero un diseño de mezcla que se planea usar en la estructura (o pavimento o losa). Luego, colar y curar 17 cilindros en el laboratorio usando esta mezcla, con sensores de tiempo-temperatura empotrados en el centro de dos de estos cilindros. Cabe subrayar que varios proveedores fabrican sensores que proporcionan lecturas de temperaturas a través de tiempo, o proporcionan directamente la *TTF* o valores de edad equivalente.

En varios momentos (1, 3, 7, 14, y 28 días, de acuerdo a C 1074), se toma un valor de madurez de los cilindros con los sensores, y los cilindros se truenan (dos cilindros por cada prueba) más uno extra en caso de una mala tronada para obtener valores de resistencia a compresión. Ahora tenemos una relación entre índice de madurez —realmente la edad equivalente o el factor de temperatura-tiempo— y la resistencia del concreto. Si se conoce el índice de madurez de este concreto en cualquier momento, entonces sabrá su resistencia.



Los datos de madurez pueden ser capturados por medio de alambres que salen, con sondas que se deslizan dentro de las camisas empotradas, o de manera inalámbrica, como se muestra aquí.

EQUIPO

En un nivel básico, todo lo que se necesita para determinar el índice de madurez dentro de una dosificación de concreto es un sensor de temperatura y una manera de registrar la temperatura con el tiempo. Esto puede ser tan simple como contar con una cinta que haga una gráfica de la temperatura con el tiempo. Entonces se puede usar la ecuación Nurse-Saul o la Arrhenius para calcular el índice de madurez. Sin embargo, los nuevos medidores de madurez calculan para usted y proporcionan el índice de madurez directamente. He aquí algunos de los sistemas comúnmente usados.

IntelliRock: Desarrollado por *Nomadics Construction Labs*. Este sistema utiliza registradores automáticos consumibles. Una vez activados, estos dispositivos continuamente registran la temperatura y la convierten, ya sea en una *TTF* o en una edad equivalente. Cuando se requieren los datos, simplemente hay que conectar un lector manual a dos conductores que se dejan sobresaliendo del concreto, y luego los descarga.

Con-Cure: Este sistema de madurez tiene sensores reutilizables que se introducen en una camisa de plástico empotrada en el concreto. El sensor se fija a un pequeño medidor de madurez que va montado en la parte exterior de las cimbras.

Onset: Esta compañía ha estado fabricando por muchos años registradores de datos en miniatura operados con baterías. El Departamento de Transportación de Nevada ha usado los registradores de datos Onset para monitorear la madurez.

International Road Dynamics: Este sistema usa una "etiqueta" de temperatura inalámbrica empotrada en el concreto y luego leída por una PC de bolsillo que recibe una señal de radio-frecuencia.

LIMITACIONES

Para que el sistema de madurez sea preciso, el concreto en la estructura debe poseer la misma mezcla que el concreto que está siendo utilizado para monitorear la madurez. Si se está obteniendo concreto desde diferentes productores con características

Ficha Técnica

Para mayor información sobre los fabricantes citados en este artículo:

Nomadics Construction Labs:

www.intellirock.com

Jim O'Daniel, jodaniel@engius.com

Tel.405-372-9535

Con-Cure:

www.con-cure.com info@*nospam*con-cure.com

866-386-4800.

Onset:

www.onsetcomp.com

sales@onsetcomp.com

1-800-564-4377, 508-759-9500

International Road Dynamics,

www.irdinc.com

En México:

Obed Gutiérrez obed.gutierrez@irdinc.com

Tel. 01 800 701 1433

info@irdinc.com

diferentes o si el diseño de la mezcla de concreto cambia durante el trabajo, es más difícil crear las curvas de correlación. Para asegurarse de que el concreto que se está obteniendo en la obra es el mismo que el usado para desarrollar la relación de madurez, deben hacerse cilindros de verificación tomando muestras de las cargas de camión. Para esto, es necesario hacer cuatro cilindros, empotrar un medidor de madurez en uno, y probar los otros a la misma madurez conocida. Si la resistencia está dentro del 10% pronosticado por la curva de correlación madurez-resistencia, entonces todo está bien, de otra manera, debe llevarse a cabo una investigación para encontrar qué es lo que ha cambiado en la mezcla. 🌐