

Calorimetría del concreto: Valiosa herramienta para la construcción industrializada

Noticreto
LA REVISTA DE LA TÉCNICA Y LA CONSTRUCCIÓN





La construcción, especialmente la de vivienda de interés social, impone un gran desafío a la industria: mejorar la calidad del producto final al tiempo que se reducen los tiempos de construcción y se optimizan los costos asociados. La creciente utilización de sistemas industrializados de construcción hace necesario el uso de concretos especiales, con cierto nivel de desempeño en términos de reología y desarrollo de resistencia inicial, y disponer de sistemas de evaluación confiables para establecer la calidad potencial del concreto a edad temprana. Estos sistemas son ahora comunes y hoy no es extraño encontrar en nuestro medio importantes proyectos de vivienda con edificios que superan los 20 pisos.

Ing. Germán E. Arbeláez Rodríguez
Gerente Tecnología en Obra & Asociados SAS

Fotos y esquemas: Cortesía Germán Arbeláez
LA REVISTA DE LA TÉCNICA Y LA CONSTRUCCIÓN

Medición de la calorimetría del concreto

Desde hace décadas se estudia la madurez del concreto, un concepto que está ligado al incremento de temperatura que experimenta el material como resultado del calor que se genera durante el proceso de hidratación del cemento. Tal aumento de temperatura es especialmente perceptible durante las primeras 24 horas después de producido el concreto, periodo en el cual es alta la intensidad de la reacción de hidratación.

En un sector de la construcción cada vez más industrializado y con programas de obra cada día más rigurosos, la aplicación del concepto madurez y, en general, la medición sistemática de los cambios de temperatura del concreto se ha hecho más necesaria y popular ya que permite estimar, con buen grado de confiabilidad, la resistencia a una edad determinada. De acuerdo con la NTC 3756 (*Procedimiento para estimar la resistencia del concreto por el método de la madurez*) cuyo antecedente es la norma ASTM C-1074, la madurez puede expresarse de dos maneras:

- La primera expresión de madurez se conoce como *Factor temperatura-tiempo*. Este corresponde al área bajo la curva que describe el perfil térmico del concreto. Cuando se utiliza esta expresión, *la resistencia se considera una función lineal del desarrollo de temperatura* en el tiempo.
- La segunda y más conveniente expresión de la madurez se conoce como *Edad equivalente*. Se refiere al tiempo de curado equivalente a una temperatura estándar de referencia de 20 °C. Cuando el concreto se cura a temperaturas mayores a la de

← Edificio en construcción mediante sistemas industrializados.

referencia, la edad equivalente es mayor al tiempo de reloj, y lo contrario ocurre cuando el curado se da a temperaturas inferiores a la de referencia.

La función matemática que soporta esta expresión utiliza no solo la temperatura estándar de referencia, sino además algunas constantes termodinámicas entre las que cabe destacar la energía de activación del cemento y la constante de los gases. Por este motivo, cuando se utiliza la Edad equivalente para expresar la madurez del concreto, la resistencia se considera una función no-lineal del desarrollo de temperatura en el tiempo.

Cuando se mide la madurez en términos de *Edad equivalente* es posible construir una *Curva resistencia-madurez*. Esta curva tiene una forma muy similar (por no decir igual) a la de la *Curva resistencia-tiempo*. En otras palabras, así como la evolución de resistencia tiene una proporcionalidad directa con el logaritmo natural de la edad del concreto (expresada en días o en horas), también la tiene con el logaritmo natural de la madurez (expresada en días o en horas equivalentes de curado).

Aunque la medición de la madurez es un mecanismo confiable para conocer el desempeño mecánico del concreto (ver Figura 1), está limitada por la necesidad de mantener la medición de temperatura de la mezcla hasta el momento en que el tiempo equivalente de curado (o edad equivalente) corresponde con la resistencia que estamos esperando para tomar decisiones críticas de obra: desencofrar, cortar o tensionar cables de pre-esfuerzo, elevar un pre-fabricado, validar el cumplimiento de f_c , etc. Es por esto que, en concretos normales de resistencia especificada a 28 días, sería necesario mantener una instrumentación por varias semanas lo cual supondría un desperdicio de recursos costoso y a veces innecesario.

Por otra parte, la temperatura que experimenta un elemento de concreto es consecuencia no solo del desarrollo de calor de hidratación del cemento que contiene la mezcla; también lo es de su tamaño, geometría y de la



↑ Muros y losas construidos con sistemas industrializados.

protección a la que es sometido después del vaciado (grado de confinamiento de la formaleta y/o conductividad térmica del material con el que está fabricada, implementación de cámaras de curado autógeno, entre otras).

La temperatura ambiente tendrá una influencia significativa en elementos delgados y/o pequeños, y poca influencia en elementos masivos (especialmente en su interior). En este orden de ideas, es posible afirmar que la madurez a una edad determinada no depende única y exclusivamente de las principales características intrínsecas del concreto que influyen en el desarrollo del calor de hidratación (contenido, tipo, composición química y finura del cemento; tipo y contenido de materiales cementantes suplementarios, relación agua-cementante; contenido y tipo de aditivos).

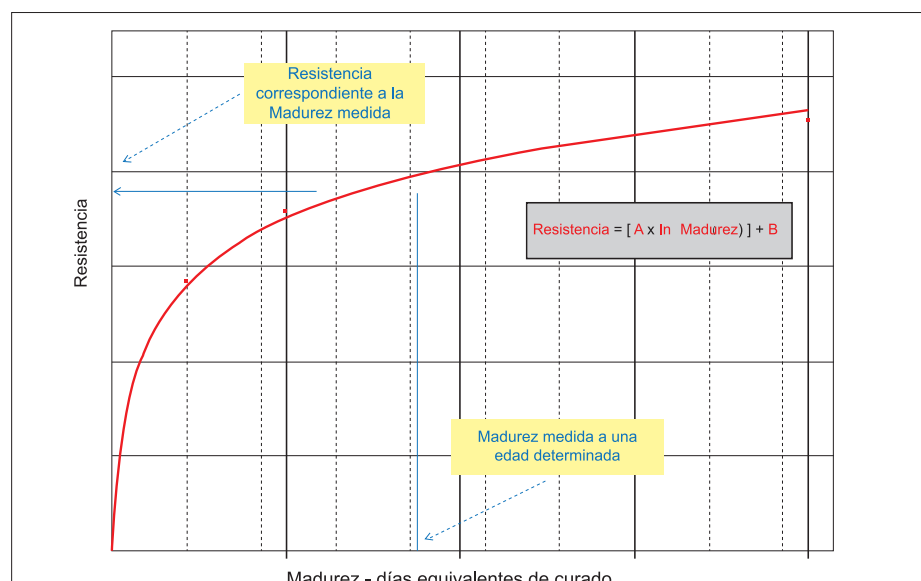
Por lo explicado arriba, la aplicación del método de la madurez tiene sentido en operaciones de prefabricación, donde los requerimientos de resistencia deben cumplirse a edad muy temprana, el tamaño y geometría de los elementos suele ser estándar, y las condiciones de temperatura y humedad son controladas durante el colado y el proceso de fraguado (o por los menos tienden a ser estables).

Las limitaciones del método de madurez se pueden superar construyendo un perfil térmico del concreto en condiciones adiabáticas, es decir, sin pérdida ni ganancia de calor. O en términos más prácticos: si se aísla una muestra de concreto de la influencia de la temperatura ambiente, se generará un perfil térmico como el que muestra la Figura 2. Sobre el perfil térmico es posible identificar fácilmente una serie de variables que definen el real potencial del concreto sin influencia de factores externos.

El perfil térmico

Cuando una muestra de concreto se aísla térmicamente, se genera un perfil térmico que depende única y exclusivamente de los cambios de temperatura que experimenta el material. En otras palabras, el incremento de temperatura es ocasionado por la generación de calor de hidratación.

↓ Figura 1. Resistencia como función de la madurez del concreto.



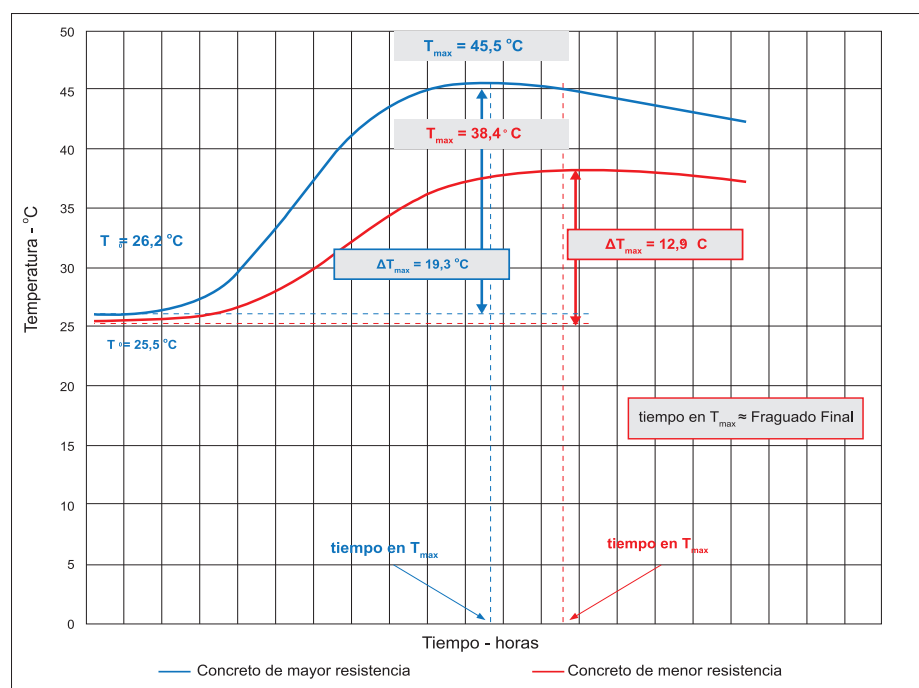
ción del cementante, y el descenso de la misma se debe a que la reacción de hidratación pierde la intensidad de las primeras horas de curado permitiendo que el calor generado se disipe.

El perfil de temperatura que describe una muestra de concreto instrumentada en condiciones de aislamiento térmico es proporcional a la huella adiabática de calor la cual –por considerarse semejante a la “huella digital” de un concreto producido con ciertos materiales dosificados de acuerdo con un diseño de mezcla específico– determina la reproducibilidad del tipo de concreto que se está instrumentando. La variable del perfil térmico que permite establecer tal reproducibilidad es el **Diferencial máximo de temperatura** (ΔT_{max}), el cual corresponde a la diferencia entre la Temperatura inicial (T_0) y la Temperatura máxima (T_{max}). (Ver Figura 2.)

En el perfil térmico, obtenido en condiciones adiabáticas, es posible identificar fácilmente varias zonas:

- Zona de estabilidad térmica, en la cual la temperatura del concreto es estable. Esta zona corresponde al tiempo de manejabilidad del concreto. Cuando el perfil térmico no muestra esta zona, quiere decir que el tiempo de manejabilidad es muy breve o que ha pasado mucho tiempo entre la fabricación del concreto y el inicio de las lecturas de temperatura (atribuible a una demora del viaje de concreto a la obra o al retraso en la toma de la muestra de calorimetría).
- Zona de fraguado, en la cual la temperatura del concreto se incrementa significativamente hasta llegar a un valor máximo. En un punto intermedio de esta zona se presenta el fraguado inicial. El fraguado final se presenta en un tiempo muy cercano al momento en el que se presenta la temperatura máxima (tiempo en T_{max}). La identificación y entendimiento de esta zona permite disminuir la incertidumbre cuando los

Figura 2. Perfil Térmico de dos concretos diferentes.



elementos estructurales presentan retardos de fraguado imputables a bajas temperaturas de curado (en la noche especialmente) o a errores de dosificación.

- Zona de disipación de temperatura, en la cual las temperaturas que desarrolla el concreto disminuyen progresivamente debido a que la reacción de hidratación del cementante pierde intensidad respecto a la que presentó en las primeras horas.

El **Diferencial máximo de temperatura** (ΔT_{max}) es directamente proporcional a la resistencia mecánica de un tipo específico de concreto producido con ciertos y determinados materiales. En otras palabras, a mayor ΔT_{max} hay mayor resistencia, y viceversa. Esta correlación ha sido comprobada a través del control de decenas de miles de metros cúbicos de concreto durante más de una década. La gran ventaja de utilizar el ΔT_{max} es que en la mayoría de los casos se puede obtener dentro de las primeras 24 horas posteriores a la producción del concreto, permitiendo así establecer el desempeño potencial del mismo. Esta condición hace de la medición calorimétrica un sistema oportuno para la construcción de edificios con sistemas industrializados, en los que se requiere alto grado de certidumbre para avanzar a los ritmos esperados, pues unos pocos días después de vaciados los muros y losas de un apartamento, la estructura ha avanzado varios pisos.

Cabe mencionar que –a diferencia de los especímenes que se toman y ensayan para conocer la resistencia mecánica– cuando se controla el concreto a través de los parámetros del perfil térmico se está estableciendo su “calidad intrínseca”. Esto quiere decir que hay una mínima influencia de factores externos que, de no controlarse adecuadamente, pueden conducir a resultados poco representativos de la calidad real del material. Para asegurar la medición de la “calidad intrínseca” del concreto basta con utilizar equipos de medición adecuadamente calibrados y asegurar la aplicación de valores constantes en cuanto a grado de aislamiento de la muestra, tamaño de la misma y localización del punto de toma de lecturas de temperatura.

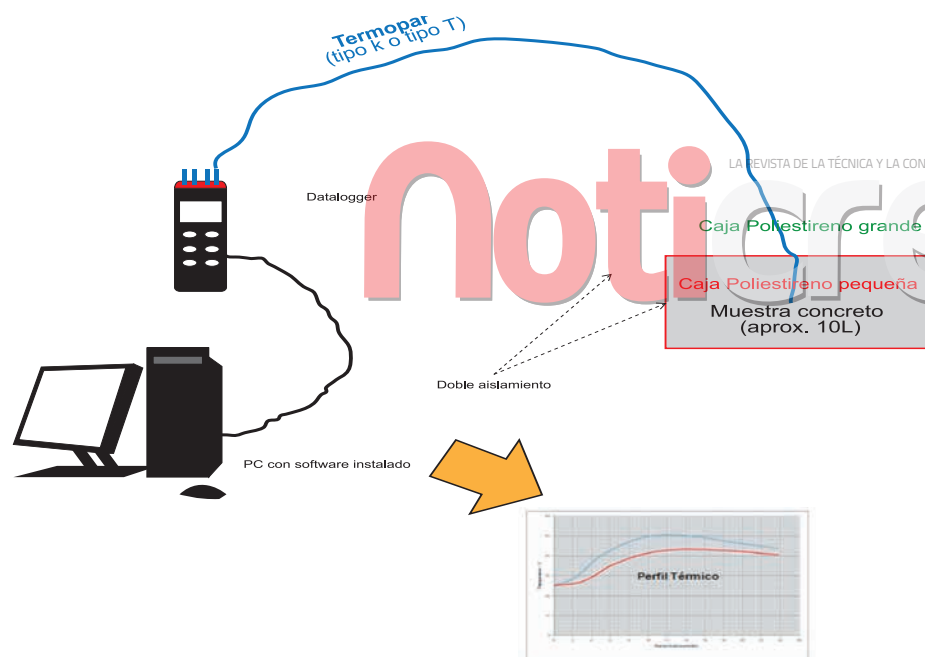
Recursos necesarios para obtener el perfil térmico

Los siguientes son los recursos necesarios para establecer el perfil térmico del concreto en condiciones adiabáticas.

- Registrador digital de datos (*datalogger*). Es un equipo dotado de uno o varios canales para realizar lecturas de temperatura con una frecuencia determinada, el cual puede ser conectado a un computador para que un software procese la información.
- Termopares (o termocuplas). Estos elementos se conectan al *datalogger* y a la muestra para realizar las lecturas de temperatura.
- Contenedores que proveen el aislamiento térmico requerido. En este caso se pueden utilizar desde calorímetros altamente sofisticados y costosos, hasta re-

cipientes sencillos y económicos, fabricados con materiales aislantes como el poliestireno. En este último caso se recomienda suministrar a la muestra un doble aislamiento como mínimo, y garantizar un cierre adecuado que evite cualquier contacto con la temperatura ambiente. Es importante que el recipiente que contiene la muestra siempre sea del mismo volumen para que los ensayos sean reproducibles.

- Manejo de información. Se requiere contar con la habilidad para recuperar la información del *datalogger* y gestionarla de manera organizada y estructurada. Como en cualquier tipo de ensayo, los resultados tendrán validez y utilidad en la medida en que la información se registre en formatos de fácil manejo e interpretación, se dé a conocer a los interesados de manera ágil y oportuna, y se cuente con los criterios apropiados para su aceptación/rechazo.



↑ Figura 3. Esquema típico de instrumentación para establecer el perfil térmico del concreto.

← Instrumentación de muestras de concreto en el campamento de una obra.

Adicionalmente, es necesario disponer de las competencias necesarias para procesar altos volúmenes de información con técnicas estadísticas procedentes, que permitan generar modelos de correlación con un nivel de confianza adecuado.

- Conocimiento de la tecnología del concreto como material, especialmente de su comportamiento térmico. En muchos casos se piensa que disponer de los equipos es suficiente para un adecuado control de calidad del concreto por calorimetría. Infortunadamente hay en nuestro medio empresas que poseen los equipos pero no disponen del conocimiento y experiencia idóneos para la prestación del servicio.

La Figura 3 presenta el esquema de instrumentación típico para establecer la calidad potencial del concreto a través de su perfil térmico.

Calidad característica del concreto

Con el fin de que la calorimetría del concreto pueda utilizarse como mecanismo para estimar el desempeño potencial del concreto, es necesario contar con un número estadísticamente adecuado de muestras, y realizar sobre ellas paralelamente los siguientes ensayos:

- Pruebas para establecer el perfil térmico en condiciones adiabáticas, y de éste obtener el Diferencial máximo de temperatura (ΔT_{max}).
- Ensayos representativos de resistencia, basados en la NTC 550 (Elaboración y curado de especímenes en obra) y la NTC 673 (Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto).

Al aplicar una serie de técnicas estadísticas apropiadas sobre los datos de calorimetría y resistencia, se obtiene un modelo de Calidad Característica que no es otra cosa que una correlación entre Diferencial máximo de temperatura (ΔT_{max}) y la Resistencia a diferentes edades.

En la Figura 4 se observa que en el punto donde se intersecta la línea azul correspondiente a la resistencia mínima esperada (a 28 días en el ejemplo de la gráfica) con la línea negra que representa la resistencia especificada (f'_c), se halla el ΔT crítico que constituye el criterio de aceptación o rechazo del ensayo de calorimetría. Cabe resaltar que la resistencia mínima esperada es el valor de resistencia correspondiente al décimo percentil más bajo del conjunto de datos que se están empleando para generar el modelo.

Es importante dejar claro que cada tipo de concreto –cuyo diseño de mezcla se ha realizado con unos materiales específicos– debe tener un modelo de calidad característica para que pueda ser controlado por calorimetría.

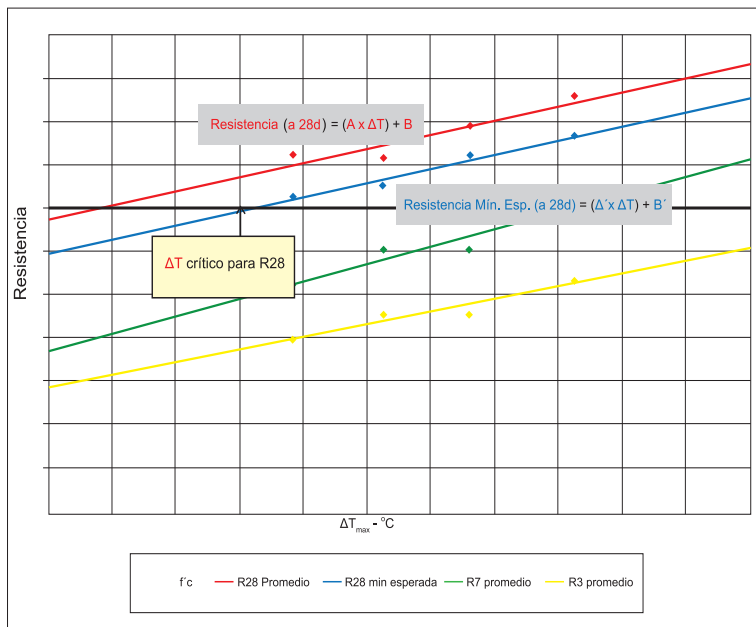


Figura 4. Modelo típico de calidad característica (Resistencia vs. ΔT).

Aplicaciones de la calorimetría

Gracias a los atributos mencionados, la calorimetría del concreto es de gran utilidad en múltiples aplicaciones como las que se mencionan a continuación:

- Control de resistencias y tiempos de descimbre en edificaciones construidas mediante sistemas industrializados.
- Monitoreo de resistencias y tiempos de corte de juntas en construcción de pavimentos de concreto convencional y en pavimentos que requieren apertura rápida al tráfico (*fast-track*).
- Supervisión de actividades críticas en operaciones de prefabricación tales como desencofrado, corte de cables de pre-tensionamiento, movimiento y/o elevación de elementos, transporte de elementos, hincado (en el caso pilotes prefabricados), entre otros.
- Validación de tiempos de tensionamiento en vigas fundidas in-situ para la construcción de puentes y viaductos.
- Instrumentación de elementos masivos de concreto (losas de cimentación, presas) para minimizar riesgos de agrietamiento ocasionados por altos gradientes térmicos.
- Estimación de la calidad potencial del cemento utilizado en compañías que lo utilizan como materia prima en la producción de concreto para su propio uso (prefabricadores, megaproyectos) o para ser comercializado y distribuido (concreteras).
- Determinación del mejor momento para retirar los moldes de elementos de concreto a la vista (concreto arquitectónico) con el fin de evitar la aparición de fisuras. En este caso, el punto óptimo corresponde al momento en el que se alcanza el gradiente mínimo entre la temperatura del concreto colocado y la temperatura ambiente.
- Resolución de problemas de retardo de fraguado en elementos estructurales, ocasionados por bajas temperaturas de curado (especialmente en la noche) o errores de dosificación.

El autor resalta el mérito de los ingenieros Juan Pablo Ortega y Charles De Wilde; dos incomparables amigos y profesionales que infortunadamente ya no están entre nosotros. Gracias a su creatividad, conocimiento y tesón, el monitoreo de concreto por calorimetría es hoy una práctica común y muy valorada en ciertos sectores de la industria de la construcción en nuestro país.

Building **Green** with Grace



ADITIVOS PARA CONCRETO Y CEMENTO
PROTECCIÓN CONTRA EL FUEGO
IMPERMEABILIZANTES
INHIBIDORES DE CORROSIÓN
REDUCTORES DE CONTRACCIÓN
FIBRAS SINTÉTICAS DE REFUERZO

GRACE Colombia

Calle 17A No. 69-39

Tel.: (1) 425 1600

Bogotá, D.C.

Km. 6 Mamonal Parquiamérica

Bodegas 4 y 5

Tel.: (5) 693 0230

Cartagena, D. T. y C.

lily.diaz@grace.com

320 301 2741

juliana.casas@grace.com

312 450 4276

amaury.garcia@grace.com

320 211 5772

www.graceconstruction.com