

¿Romper cilindros, la única opción?

Ing. Germán E. Arbeláez R.

Gerente Tecnología en Obra & Asociados SAS, Gerente Técnico de EcOre Group, LLC, Colombia



Introducción

En proyectos de construcción —ya sean de infraestructura o de edificaciones— la calidad en la ejecución es el aspecto más importante para asegurar el buen desempeño del producto resultante en términos de estabilidad estructural y acabado, y en últimas, para garantizar el cumplimiento de la vida útil considerada.

Por esto, y para el caso de edificaciones, las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-10) expresan claramente la obligatoriedad de la supervisión técnica con el fin de asegurar “la verificación de la sujeción de la construcción de la estructura de la edificación a los planos, diseños y especificaciones realizadas por el diseñador estructural”. El supervisor técnico no sólo debe tener el conocimiento y la experiencia indispensables para desempeñar su función, sino el

↑ Una acertada ejecución de los ensayos de desempeño del concreto, especialmente la resistencia, es un aspecto fundamental para asegurar su calidad.

FLICKR – US ARMY CORPS OF ENGINEERS

criterio necesario para detectar anomalías y recomendar tanto correctivos como acciones dirigidas a eliminar las causas de problemas reales o potenciales que puedan ocasionar detrimento en la calidad de la ejecución del proyecto.

En el caso del concreto, no sólo es importante la calidad del material en sí mismo —la cual depende, a su vez, del uso de materias primas competentes y de la idoneidad de los procesos de diseño de mezcla, dosificación, mezclado y transporte— sino la eficacia del usuario (contratista, constructor) durante las actividades de recepción, colocación, compactación, acabado, protección y curado. En este punto cabe anotar que una acertada ejecución de los ensayos de desempeño del material, especialmente la resistencia, también es un aspecto fundamental para asegurar la calidad del pro-

ducto. Nada se obtiene realizando apropiadamente los procesos mencionados (tanto los relativos a la calidad del material como los que tienen que ver con su manejo), si no se es capaz de realizar las pruebas de calidad de manera igualmente correcta, utilizando información probablemente errónea para la toma de decisiones, generando confusión con ello.

La gerencia, es decir la alta dirección de la compañía constructora y la dirección del proyecto, suelen tener como objetivo primordial el cumplimiento de los programas y presupuestos de obra, lo cual es perfectamente entendible en un mundo tan competitivo como el de hoy. Sin embargo, es común que tales programas y presupuestos sean elaborados bajo un criterio que no necesariamente considera, o no le da la debida prioridad, a la calidad de la ejecución. Por tal motivo, en ocasiones se presentan deficiencias constructivas o se toman decisiones que atentan contra el logro de los resultados deseados en términos de estabilidad estructural y garantía de la vida útil.

Evaluación de resistencias por medio de cilindros

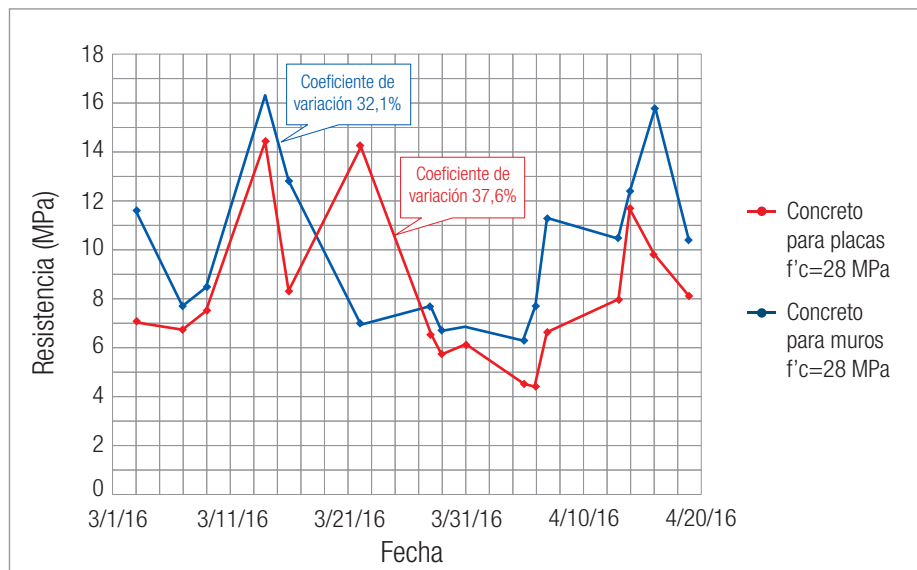
La NSR-10 especifica en su Sección C.5.6 como único criterio de evaluación y aceptación del concreto, la elaboración y ensayo de cilindros. Esta es la ley y, por lo tanto, en todo proyecto de construcción que se desarrolle en nuestro medio bajo los lineamientos de la NSR-10 (directa o indirectamente), se deben tomar cilindros para fallar a la edad de especificación de la resistencia del concreto (28 días usualmente) y, preferiblemente, a edades inferiores (por ejemplo 1 día, 3 días, 7 días, 14 días) para verificar si la evolución de resistencia es adecuada.

La elaboración de cilindros, así como su almacenamiento y protección durante las primeras horas, el transporte entre la obra y el laboratorio (incluyendo las actividades de manipulación, cargue y descargue asociadas al transporte), el curado y el ensayo, son actividades que fácilmente se ven impactadas por múltiples factores externos. ¿Es posible controlarlo? Desde luego que sí. ¿Es fácil controlarlo? No siempre es fácil, especialmente porque a partir de un momento dado, las probetas de ensayo (cilindros, viguetas, entre otros) dejan de estar bajo la custodia del proyecto. Por esto –siempre, así cueste un poco más– deben seleccionarse laboratorios que se hayan destacado en el mercado por su independencia y buen desempeño en cuanto a la calidad de sus procesos operativos y de gestión de información. Sin embargo, haciendo de abogado del diablo, en una ciudad como Bogotá, con el mal estado de las vías que tanto sufrimos sus habitantes, ¿quién puede asegurar que es fácil proteger adecuadamente los cilindros de concreto que han sido elaborados en obra con tanto cuidado y siguiendo al pie de la letra, en la mayoría de los casos, los lineamientos normativos? Difícil responder, ¿cierto?

Hablando del uso de probetas para verificar la resistencia del concreto, no solo es importante aplicar con acierto los lineamientos normativos para su elaboración, protección, curado y ensayo. Lo realmente fundamental es someter los resultados a un proceso de evaluación apropiado, basado en técnicas estadísticas como las descritas en la NTC 2275 – Procedimiento recomendado para la evaluación de los resultados de los ensayos de resistencia del concreto, cuyo documento de referencia es el ACI 214 – *Guide to evaluation of Strength Test Result of Concrete* del Instituto Americano del Concreto. Infortunadamente, en nuestro medio es común que la evaluación de resultados se limite a comprobar si cada muestra individual cumple o no con la resistencia especificada, y es normal que se elaboren y ensayen probetas a edades anteriores a la especificación pero no que se verifique oportunamente si la resistencia del concreto está evolucionando correctamente y de acuerdo con los porcentajes especificados por el proveedor de concreto para cada edad. ¿Tienen solución estas deficiencias? Claro que sí, la gerencia de toda compañía constructora está obligada a suministrar a los directores y residentes de obra la capacitación, las herramientas y la asesoría adecuadas para poner en práctica una evaluación estadística de resultados basada en criterios probabilísticos.

Dentro del gran abanico de tipos de proyectos de infraestructura y de edificaciones, hay muchos que exigen tomar decisiones críticas de obra unas pocas horas después de vaciado el concreto de ciertos elementos. Tal es el caso de la construcción de vivienda industrializada, de la construcción de puentes con elementos pre-esforzados, del vaciado de mástiles en puentes atirantados, de aquellos proyectos con un componente importante de elementos prefabricados, de obras de reparación acelerada de pavimentos (*fast track*); la lista es larga y podría continuar.

Una alternativa para disponer de elementos de juicio en la toma de estas decisiones críticas de obra (desencofrar, tensionar, izar o “trepas” la formaleta deslizante, descimbrar e instalar elementos prefabricados, hincar, poner en servicio, etc.), es la rotura de cilindros a muy temprana edad (por ejemplo 8, 12, 18, 24 horas). Muchos constructores lo hacen, algunos sin consideración alguna de protección térmica. En este caso el inconveniente es que, en tan pocas horas, el concreto está aún muy joven, poco maduro y muy vulnerable. Por tal motivo, los múltiples factores externos ya mencionados pueden afectar de manera dramática el resultado y conducir, en consecuencia, a errores y/o equivocaciones en la toma de decisiones. ¿Y quién sale perjudicado? La estabilidad estructural del proyecto y, por supuesto, su vida útil. La figura 1 muestra la alta variabilidad de cilindros curados de manera convencional y fallados a 24 horas de dos tipos diferentes de concreto.



Para minimizar la vulnerabilidad de los cilindros elaborados para ensayos a muy temprana edad es posible aplicar mecanismos de curado acelerado como los mencionados en la sección C.5.11.3 de la NSR-10, entre otros. En este caso, las probetas deben ser sometidas a una combinación de alta temperatura y humedad entre las que se destacan vapor a alta presión, vapor a presión atmosférica, agua hirviendo, entre otras. Para conocer o proyectar la resistencia potencial del concreto con base en métodos de curado acelerado, es necesario construir una gráfica y/o ecuación, estadísticamente robusta, que correlacione la resistencia de los cilindros aceleradamente curados con la resistencia de cilindros convencionalmente curados y ensayados a la edad especificada.

Metodologías alternativas

Pero, ¿es la elaboración y ensayo de especímenes/probetas la única opción para controlar la calidad del concreto? La respuesta es no.

Desde hace años es frecuente aplicar metodologías de control de calidad basadas en la medición de la cantidad de calor de hidratación generado por el material cementante presente en la mezcla, durante las primeras 12 a 24 horas contadas a partir del momento de la dosificación y mezclado de los ingredientes, debido a que en este intervalo de tiempo la reacción alcanza su máxima intensidad.

En un sector de la construcción cada vez más dinámico e industrializado, y con programas de obra cada vez más rigurosos, la medición sistemática de los efectos combinados de temperatura y tiempo del concreto se ha vuelto popular y necesaria ya que, como se dijo, permite estimar su resistencia a una edad determinada y con buen nivel de confianza.

Una gran ventaja de aplicar estos métodos es que se establece la calidad intrínseca del concreto. Esto quiere decir que, una vez iniciado el proceso de hidratación, se hace la medición mientras las propiedades del material evolucionan sin alteraciones y con una influencia mínima

o nula de factores externos. En otras palabras, se determina lo que está pasando en las “entrañas” del concreto.

Entre los métodos basados en la medición de la generación de calor de hidratación del material cementante presente en la mezcla se destacan el Método de Madurez y el Método de Generación de Huellas Adiabáticas.

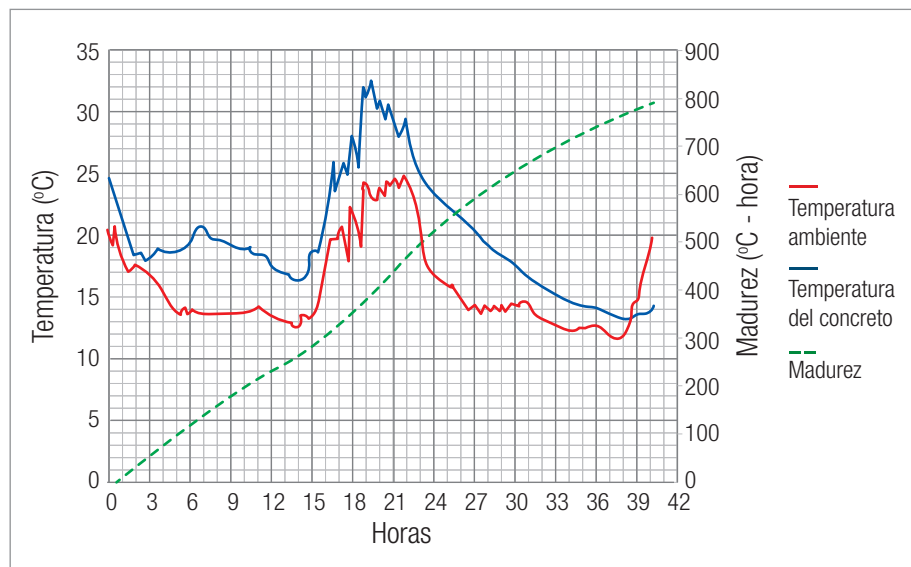
Método de Madurez

La madurez se puede definir como el grado de hidratación del cemento presente en una mezcla de concreto el cual es, a su vez, uno de los factores de mayor incidencia en la evolución de resistencia mecánica. 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 se puede expresar de dos maneras:

1. *Factor temperatura-tiempo.* Así se conoce la primera expresión de madurez, la cual corresponde al área bajo la curva que describe el perfil térmico del concreto colocado en la estructura. Cuando se utiliza esta expresión, la resistencia se considera una función lineal del desarrollo de temperatura en el tiempo.

↑ **Figura 1.** Alta variabilidad de cilindros curados de manera convencional y fallados a 24 horas de dos tipos diferentes de concreto.

CORTESÍA GERMÁN ARBELÁEZ



↑ **Figura 2.** Temperatura del concreto colocado & madurez calculada como factor temperatura-tiempo.

CORTESÍA GERMÁN ARBELÁEZ

2. *Edad equivalente,* como se conoce la segunda expresión de madurez. Esta se define como el tiempo de curado equivalente a una temperatura estándar de referencia de 20 °C. Cuando el concreto colocado se cura a temperaturas mayores a la de referencia, la edad equivalente es mayor que el tiempo de reloj; lo contrario ocurre cuando el curado se da a temperaturas inferiores a la de referencia. La función matemática que soporta esta expresión no solo utiliza 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.



Existe una relación de proporcionalidad directa entre la madurez del concreto y su resistencia a determinada edad. Por tal motivo es posible construir un modelo de correlación entre las dos propiedades, el cual permitirá estimar la competencia mecánica del concreto en un momento dado. Este modelo debe existir para cada tipo de concreto de cada proveedor. Sería irresponsable implementar el método si no se dispone del modelo específico para el tipo de concreto a monitorear.

Cualquier método de ensayo tiene ventajas y limitaciones. A continuación se enumeran las más relevantes para el caso del control de calidad del concreto vía madurez:

Ventajas

- Es posible evaluar de manera confiable las propiedades del concreto colocado.
- Se puede establecer el impacto de factores externos tales como bajas temperaturas nocturnas o la influencia los procesos de protección y curado (o la ausencia de ellos).
- Con base en el modelo de correlación resistencia-madurez, se puede estimar la resistencia y tomar decisiones críticas de obra.
- Es útil en concretos cuya resistencia se especifica a muy corta edad (industria de prefabricados).

Limitaciones

- Hay que mantener la medición de temperatura de la mezcla hasta el momento en que se alcanza la madurez correspondiente a la resistencia que se pretende obtener para tomar la decisión crítica de obra. Por tal motivo, si se aplica para estimar resistencias especificadas a edades superiores a 24 ó 48 horas, se debe mantener la instrumentación por un tiempo prolongado, lo cual supone un desperdicio de recursos que puede ser costoso y a veces innecesario.
- Los equipos de medición (registradores digitales de temperatura) corren alto riesgo de pérdida o daño.
- Los termopares (cables que unen el equipo de medición con los puntos de la estructura instru-

↑ Instrumentación de una losa de concreto para sistemas industrializados con el fin de determinar la madurez. En la foto se observan los termopares y el registrador digital de temperaturas. CORTESÍA GERMÁN ARBELÁEZ

mentados) pueden ser fácilmente desconectados o desgarrados por el tránsito continuo o por descuido del personal de obra; en este caso se arriesga perder la totalidad del ensayo y, si no se cuenta con lecturas de temperatura durante todo el periodo de ensayo, es imposible calcular la madurez.

Método de Generación de Huellas Adiabáticas

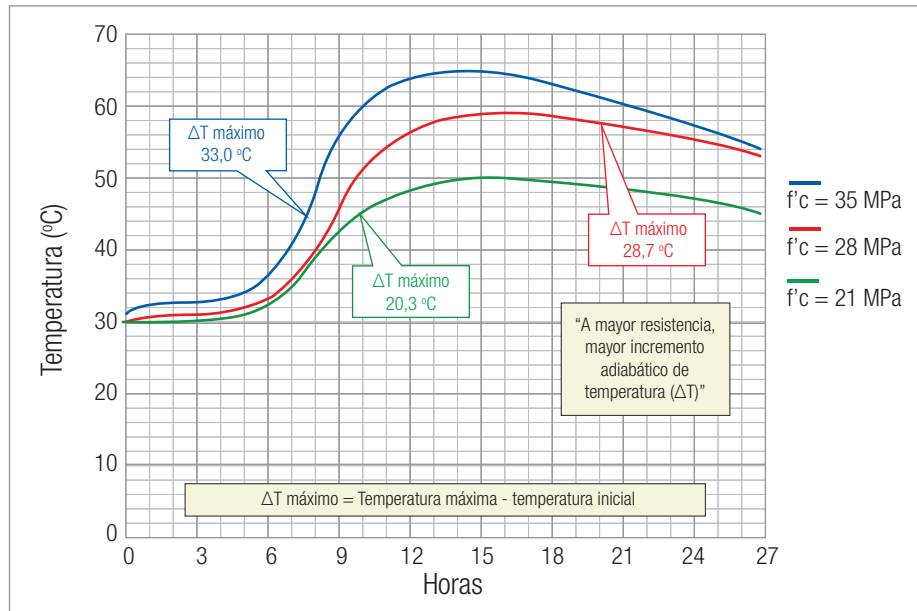
Cuando se aísla térmicamente una muestra de concreto fresco de masa constante, y se mide su evolución de temperatura desde el momento del mezclado hasta un instante posterior a aquel en que se alcanza la temperatura máxima, se genera un perfil térmico (en mucho menos de 24 horas normalmente) cuyas propiedades son directamente proporcionales a la calidad del concreto en términos de su resistencia mecánica. Este perfil térmico se conoce como la Huella Adiabática.

Este método se basa en la relación de proporcionalidad directa que existe entre la cantidad de calor de hidratación generado por un concreto y su resistencia a una edad determinada. Por tal motivo, al igual que con el método de madurez descrito, es posible construir un modelo de correlación entre las propiedades térmicas y las propiedades mecánicas del material, el cual permitirá estimar de manera confiable y precisa, y en menos de 24 horas, el desempeño potencial del concreto, especialmente la resistencia a la edad especificada.

Los principios físicos de la correlación referenciada en el párrafo anterior son muy sencillos: por una parte, la evolución de resistencia es función de la hidratación del cemento (que se evidencia a través del incremento de calor de hidratación); y por otra, el aumento de temperatura es función del incremento de calor para una muestra de masa constante preparada con un material que tiene un calor específico dado. Combinando los dos principios ya descritos brevemente (uno tomado de la tecnología del cemento y el concreto, y el otro tomado de la termodinámica), es posible decir que la evolución de resistencia del concreto es función del incremento de temperatura en un medio adiabático sin pérdidas ni ganancias de calor. Esta correlación ha sido ampliamente probada en nuestro medio –por 20 años aproximadamente– a través del control de calidad en múltiples proyectos de construcción cuyo volumen de concreto suma varios millones de metros cúbicos.

Cada tipo de concreto tiene su propia Huella Adiabática. Esta es como su ADN porque el perfil térmico se genera durante un periodo de gestación que corresponde a la transición entre el estado fresco y el estado endurecido, y de él dependen buena parte de sus propiedades mecánicas durante su vida útil.

Al igual que para el Método de Madurez, a continuación se enumeran las principales ventajas y limitaciones del control de calidad del concreto por medio de la generación de huellas adiabáticas:



Ventajas

- Con base en el modelo de correlación Resistencia - ΔT máximo, se puede estimar la resistencia (a cualquier edad previamente considerada en el modelo) y tomar decisiones críticas de obra. Agrega mucho valor conocer el desempeño potencial del concreto a largo plazo en menos de 24 horas (generalmente entre 10 y 16 horas).
- Los recursos requeridos son de fácil consecución.
- El procedimiento operativo del ensayo es sencillo y de fácil aplicación.
- Los equipos y muestras pueden mantenerse en un lugar que ofrezca seguridad (el campamento o el laboratorio de la obra, por ejemplo).
- En caso de algún imprevisto durante las mediciones (corte del suministro eléctrico, por ejemplo), es fácil recuperar las variables críticas del ensayo si se ha implementado previamente un plan de contingencia.
- Una interpretación acertada de los perfiles térmicos permite hacer seguimiento a los tiempos de manejabilidad y tiempos de fraguado. En caso de problemas de retardo de fraguado o fraguado muy rápido, es fácil identificar las causas (usualmente asociadas al clima, a errores de dosificación o a la aceptación de viajes de concreto reubicados) y establecer cuáles acciones adoptar.
- Cuando se desarrollan y evalúan nuevos productos de concreto a nivel de laboratorio, la aplicación de este método es de gran ayuda para validar resultados a muy corto plazo, especialmente cuando se están ensayando nuevos aditivos, diferentes tipos de cemento y materiales cementantes suplementarios.
- Es el método ideal para hacer control de calidad diario y sistemático, en múltiples proyectos simultáneamente, otorgando al personal de la obra cierta autonomía aunque éste no tenga alto nivel de calificación. En tal caso es muy importante que un experto supervise y haga monitoreo permanente.

↑ **Figura 3.** Perfiles térmicos de concretos de diferentes niveles de resistencia obtenidos sobre muestras estándar en condiciones de aislamiento térmico.
CORTESÍA GERMÁN ARBELÁEZ

- Es útil tanto en concretos cuya resistencia se especifica a muy poca edad (industria de prefabricados) como en concretos con resistencia especificada a 28 días o más (56, 90 días).

Limitaciones

- Se determina el potencial que tiene el concreto utilizado en la estructura. En caso de presencia de factores externos que afecten dramáticamente las propiedades del concreto colocado hay que aplicar mecanismos paralelos, incluyendo la inspección visual y el tanteo físico (rayado). Para minimizar el impacto de factores externos siempre es recomendable aplicar la protección adecuada del concreto en la estructura.
- Cuando no se siguen rigurosamente los sencillos pasos del procedimiento de muestreo y ensayo, los resultados obtenidos pueden generar confusión. Por fortuna, un experto puede identificar esta situación con facilidad.

Consideraciones finales

Cabe mencionar que las técnicas descritas se deben considerar alternativas y discrecionales:

- Son alternativas porque, dado el carácter mandatorio de la NSR-10 respecto a la elaboración y ensayo de cilindros, la información que proporcionan se considera complementaria. En definitiva, ayudan a tomar decisiones críticas de obra de manera oportuna y confiable; pero, desde el punto de vista legal, el concreto debe ser aceptado única y exclusivamente con base en los resultados de resistencia de cilindros normalizados.
- Son discrecionales porque no son obligatorias. Son métodos cuya implementación es voluntaria o eventualmente recomendada por el diseñador estructural. La gerencia de la compañía constructora acepta invertir recursos adicionales para poner en práctica estas técnicas por el valor que pueden agregar a sus proyectos en términos de oportunidad y confiabilidad en la toma de decisiones.

Una reflexión final: en los proyectos de construcción siempre nos preocupamos por la resistencia del concreto. ¿Y la durabilidad? La gerencia de la compañía constructora y la dirección de obra están obligadas a considerar esta propiedad, pues de ella también dependen la estabilidad estructural y la vida útil, especialmente cuando hay condiciones de exposición, como las descritas en la NSR-10 (Capítulo C.4) y en la NTC 5551- Durabilidad de Estructuras en Concreto, que pueden agredir el concreto y el acero de refuerzo colocados en la estructura.