

# Madurez predictiva: una nueva era en el curado del hormigón

■ Bertrand Delforge, JB Concrete, Francia  
April Kraft, Kraft Curing Systems, Kraft Curing Systems GmbH, Alemania

Desde hace décadas, Kraft Curing está a la vanguardia de la innovación en el ámbito del curado del hormigón. La introducción de nuevos cementos - con diversos fillers (hidráulicos latentes e inertes) que sustituyen parcialmente al clinker portland para reducir la huella de CO<sub>2</sub> del cemento - está llevando a los fabricantes de elementos prefabricados y pretensados de hormigón a preguntarse cuándo se pueden desencofrar sus productos o liberar el pretensado sin poner en riesgo la calidad del producto. Como respuesta a estos desafíos, la introducción de la tecnología Match-Cure por parte de Kraft Curing el año pasado marcó otro hito en el control de calidad para la producción de elementos prefabricados y pretensados de hormigón.

El sistema está diseñado como un sistema integral de supervisión de la resistencia inicial. Match-Cure permite a los fabricantes asegurarse de que el elemento de hormigón recién hormigonado ha alcanzado la resistencia requerida antes de proceder al desencofrado o a la liberación del pretensado. La detección del momento más temprano posible reduce los

costes energéticos y de mano de obra, asegurando al mismo tiempo la seguridad y la calidad del producto.

Los cilindros o cubos de ensayo, que se fabrican al mismo tiempo que un elemento prefabricado o pretensado se colocan en una cámara climática Match-Cure aislada. Esta permite una medición y control precisos de la temperatura de la probeta, que corresponde a la temperatura interna del elemento real de hormigón.

Si la temperatura del elemento de hormigón aumenta (por hidratación o mediante un sistema de curado acelerado), una unidad de calefacción en el interior del módulo Match-Cure calienta la probeta. Si la temperatura del elemento de hormigón desciende (por ejemplo, debido al viento o a una cubierta dañada), un ventilador enfría la probeta hasta alcanzar al menos hasta la temperatura ambiente. Para regiones con inviernos rigurosos, se encuentra opcionalmente a disposición un sistema de refrigeración.

Sensores de temperatura, opcionalmente cableados o inalámbricos, miden de forma continua las condiciones de cu-



Integración de Match-Cure en el ecosistema AutoCure de Kraft Curing para evitar sistemas de control y supervisión redundantes y reducir costes.



Cámaras climáticas Match-Cure para un total de cinco zonas de producción/lechos/moldes/mesas.

rado tanto del elemento de hormigón como de la probeta. Estos datos son transmitidos al sistema de control Auto-Cure®. Si la temperatura del elemento es superior a la de la probeta, se activa el sistema de calefacción para igualarla. Si la temperatura del elemento desciende, el sistema reacciona con refrigeración o ventilación.

Para el aseguramiento de la calidad, el sistema VaporWare V2® registra de forma independiente todos los datos climáticos – incluidos los números de lote, las descripciones de los elementos y las marcas de tiempo – y genera un protocolo completo y verificable del elemento de hormigón y de las probetas en la cámara Match-Cure.

Con Match-Cure, los fabricantes obtienen una simulación precisa de las condiciones reales de curado de sus elementos. Antes de desencofrar o liberar el pretensado del elemento real de hormigón, la probeta puede extraerse de la cámara Match-Cure y someterse a un ensayo de resistencia a la compresión para verificar si el hormigón ha alcanzado la resistencia requerida.

### Match-Cure Ultra

Kraft Curing ha perfeccionado su tecnología y ha desarrollado Match-Cure Ultra, un sistema para el control predictivo de la madurez del hormigón.

En lugar de esperar a ver cómo se comporta el hormigón prefabricado o pretensado bajo determinadas condiciones,



Un monitor de gran tamaño muestra el grado de finalización actual (%) y el tiempo de finalización estimado para cada mesa de producción o molde. Bordes de colores verde, amarillo o rojo indican el estado actual de curado de cada zona de producción.

los fabricantes pueden ahora predecir y controlar de forma precisa cuándo el producto alcanza la resistencia requerida. Con Match-Cure Ultra de Kraft Curing, los fabricantes de hormigón pueden definir parámetros de curado (como la temperatura, la duración del precalentamiento, las fases de



MASTERS OF BLENDING  
**KNIELE**

THE ART OF MIXING

Made in Germany

*Supply the best*

THE KNIELE KKM

Web:



Catalogue:



Movie:





calentamiento y de mantenimiento) con el fin de alcanzar la resistencia a la compresión objetivo que permita un desencofrado o destensado seguro. Esto significa la transición de una supervisión reactiva a un control de la producción proactivo y basado en datos.

Match-Cure Ultra se basa en la medición predictiva de la madurez, un método para evaluar el avance de la hidratación en el hormigón. Durante la hidratación del cemento se libera calor. Mediante la medición de la temperatura con termopares instalados en el interior del elemento de hormigón, se cuantifica el grado de hidratación y se convierte en un índice de madurez.

Este índice refleja la «edad equivalente» del hormigón, es decir, el tiempo que el material habría necesitado para alcanzar la misma resistencia bajo condiciones estándar (normalmente 20 °C). Utilizando la ley de Arrhenius, el sistema tiene en cuenta la aceleración de la hidratación a temperaturas más altas y su ralentización a temperaturas más bajas. El resultado es una representación continua del desarrollo de la resistencia en el interior del elemento de hormigón, sin necesidad de destruir una probeta en cada fase. La madurez predictiva es especialmente valiosa en fase inicial del curado y requiere un equipamiento específico: sensores para registrar los datos de temperatura, dispositivos de al-

macenamiento para el registro y software para el cálculo del desarrollo de la resistencia.

### De la medición a la predicción

Mientras que la medición tradicional de la madurez indica el estado actual de la resistencia, Kraft Curing la ha transformado en una herramienta de predicción.

El primer paso es crear una curva de calibración: probetas cúbicas o cilíndricas de una mezcla de hormigón específica se curan a 20 °C en condiciones estándar y se ensayan periódicamente para determinar su resistencia a la compresión. Los resultados forman un perfil resistencia-tiempo.

Durante la producción, sensores situados en el elemento de hormigón miden la evolución real de la temperatura. Mediante la conversión del historial de curado en edad equivalente, el sistema puede determinar la posición actual en la curva de calibración y predecir la resistencia en cada momento.

De este modo, los fabricantes ya no necesitan esperar los resultados de los ensayos de hormigón, sino que saben de antemano cuándo el material alcanzará las propiedades deseadas.



*Transmisor de temperatura robusto, magnético e inalámbrico (carcasa gris) con cable de termopar tipo K para medir la temperatura interna del hormigón.*



*Repetidor inalámbrico, colocado en toda la planta o en las instalaciones de la fábrica para asegurar una intensidad de señal suficiente en una zona amplia. Cable de termopar para medir la temperatura interna del hormigón.*



### Así funciona la madurez predictiva en la práctica

El proceso de trabajo es sencillo, pero eficaz. Se preparan una serie de probetas de calibración con la mezcla exacta utilizada en producción y se almacenan a 20 °C. A las pocas horas se realizan ensayos periódicos de la resistencia a la compresión, y los resultados se introducen en la tabla de Match-Cure Ultra. Tras 24 horas se dispone de un perfil de madurez completo.

Este perfil pasa a formar parte de la «biblioteca de madurez», una base de datos con curvas de resistencia específicas para cada mezcla. Para todos los futuros lotes con la misma fórmula, el programa utiliza la curva almacenada y la combina con las mediciones de temperatura en tiempo real para predecir el desarrollo de la resistencia.

Al mismo tiempo, las probetas en la cámara Match-Cure validan estas previsiones, ya que se curan bajo las mismas condiciones. Cuando el programa indica que se ha alcanzado la madurez objetivo, se realiza un sencillo ensayo de compresión de las probetas para confirmar la resistencia prevista.

### Control de la instalación de curado mediante control predictivo

La combinación de Match-Cure y AutoCure convierte la predicción de la madurez en un sistema de planta controlable.



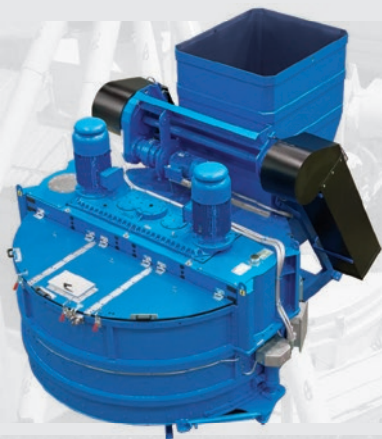
*Cámara climática Match-Cure aislada con probetas y medición de la temperatura interna del hormigón.*

Los operarios pueden seguir la evolución de la resistencia en tiempo real y recibir alertas si el proceso de curado se desvía de lo previsto, por ejemplo, debido al frío, una distribución térmica desigual o fallos en el sistema.

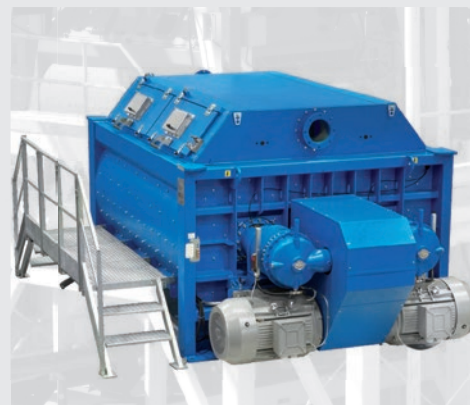


**Líder en MIXING TECHNOLOGY**  
Para producción de Hormigón,  
Morteros, Procesos industriales  
y Tratamiento de desechos

**THE  
MIXING  
SOLUTION**



**MP**  
Mezcladora planetaria  
hasta 4 m³ de hormigón  
vibrado



**MAO**  
Mezcladora de doble  
eje horizontal hasta 9 m³  
de hormigón vibrado



**MAO C**  
Mezcladoras de doble eje  
horizontal continuo  
desde 80 litros  
hasta 500 m³/h



Amplia gama de  
accesorios





*Producción de hormigón pretensado con cámaras climáticas Match-Cure*

Esto hace que la planificación de la producción sea más fiable: los equipos saben con exactitud cuándo se puede desencofrar o liberar elementos pretensados, y pueden organizar al personal en consecuencia.

El sistema también puede optimizar el propio proceso de curado ajustando automáticamente los perfiles. De esta forma, se evita tanto un curado insuficiente, que comprometería la seguridad estructural, como un curado excesivo, que implicaría pérdidas de tiempo y energía. El resultado: menor consumo energético, ciclos más cortos y menos errores de planificación.

Para mayor seguridad, una vez alcanzada la madurez prevista, se puede ensayar una probeta. Esto aporta puntos de datos adicionales a la base de datos de la madurez, lo que permite aumentar aún más la precisión de las predicciones futuras.

### Las ventajas de la madurez predictiva

Las ventajas pueden apreciarse a lo largo de toda la cadena de producción. La calidad puede aumentar, ya que cada elemento es comprobado. Se ahorra tiempo porque ya no son necesarios márgenes de seguridad: se actúa exactamente cuando el hormigón está listo.

También se mejora la eficiencia energética, ya que los sistemas de calefacción o los generadores de vapor solo funcionan el tiempo estrictamente necesario.

Desde el punto de vista de la gestión, la madurez predictiva permite una planificación y coordinación más eficaces. Si se conoce de antemano cuándo estarán listos los productos, los procesos de personal y logística pueden coordinarse de forma óptima minimizando tiempos muertos y cuellos de botella. El resultado: un flujo de trabajo más fluido, menores costes y plazos de entrega más fiables.

### Conclusión: Seguridad en lugar de incertidumbre

La madurez predictiva no es solo una innovación técnica: tiene el potencial de transformar por completo el control y la gestión de la producción. Al permitir a los fabricantes determinar con precisión cuándo sus productos están listos y ajustar automáticamente las condiciones de curado, Kraft Curing hace que el control pase de ser una incertidumbre a una certeza. Este desarrollo no solo representa ciclos de producción más rápidos o menores costes energéticos, sino que convierte el curado del hormigón en una ciencia basada en datos, en lugar de una práctica basada únicamente en la experiencia.



Kraft Curing patrocinó la posibilidad de descarga gratuita del archivo pdf de este artículo para todos los lectores de PHI. Visite la página web [www.cpi-worldwide.com/channels/kraft\\_curing](http://www.cpi-worldwide.com/channels/kraft_curing) o escanee el código QR con su smartphone para acceder directamente a esta página web.



### MÁS INFORMACIÓN



[www.jbconcrete.fr](http://www.jbconcrete.fr)



Kraft Curing Systems GmbH  
Mühlenberg 2, 49699 Lindern, Alemania  
T +49 5957 96120  
[info@kraftcuring.com](mailto:info@kraftcuring.com), [www.kraftcuring.com](http://www.kraftcuring.com)