

# TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

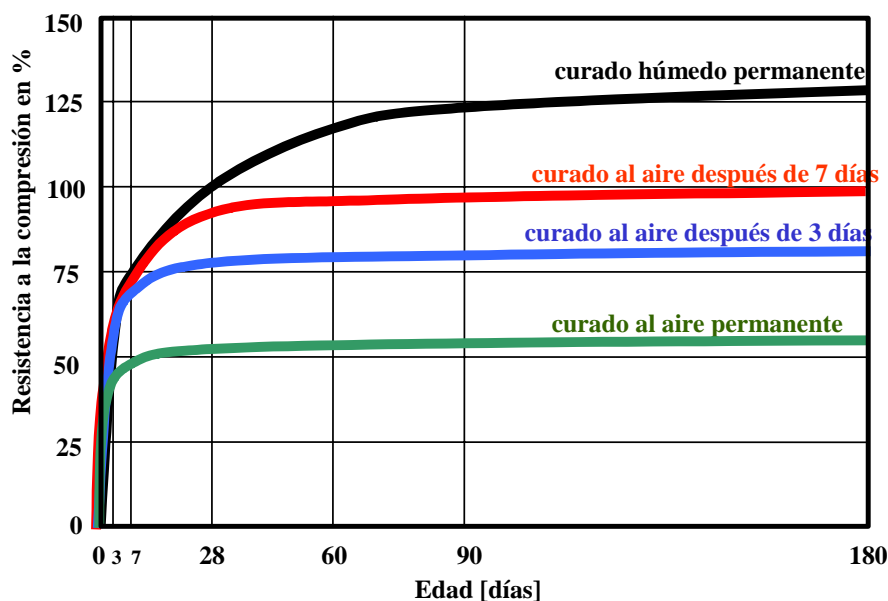
## PARA CONSTRUIR CON CALIDAD

### Módulo 2: Curado del Hormigón – Influencia sobre la resistencia y durabilidad

*Ing. Edgardo Becker*  
Líder de Asesoría Técnica  
LOMA NEGRA C.I.A.S.A.

Se conoce como “curado del hormigón” al proceso que asegura el mantenimiento de adecuadas condiciones de humedad y temperatura que favorecen la hidratación del cemento. Una pasta cementicia bien hidratada logra desarrollar todo su potencial logrando las mayores resistencias y condiciones de durabilidad de la que la mezcla de hormigón sea capaz de obtener en función de la relación a/c (agua/cemento, en masa) y las características de los materiales empleados en su elaboración.

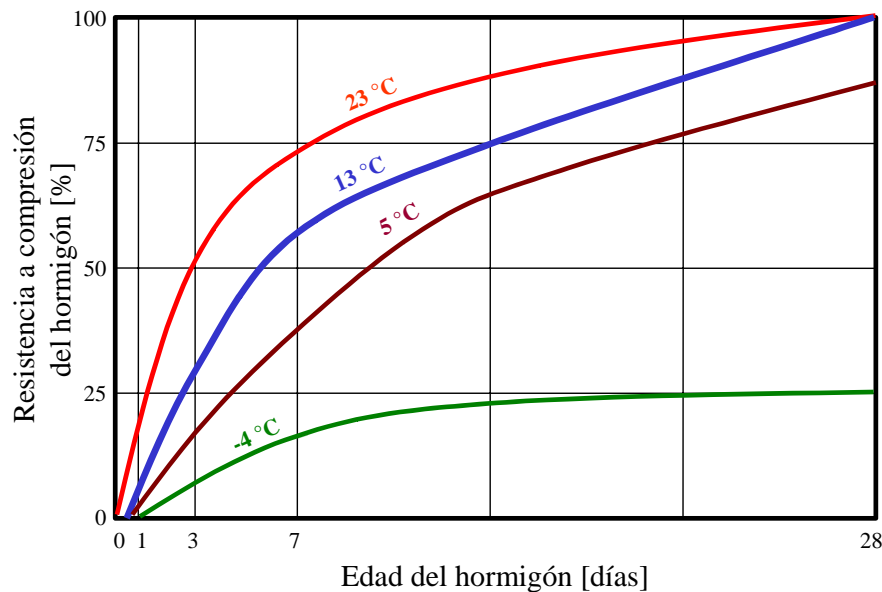
En la figura 1 se muestra la influencia que puede tener el mantenimiento de las condiciones de humedad sobre la resistencia del hormigón y en la figura 2 el efecto de la temperatura. Como puede observarse, ambas condiciones presentan un efecto muy importante sobre el desarrollo de resistencia que se da como consecuencia del grado de hidratación de la pasta cementicia logrado a cada instante. Consecuentemente, es muy importante asegurar en obra las condiciones de curado que permitan lograr el grado de hidratación necesario para cumplir los requerimientos resistentes y de durabilidad que necesita cada proyecto y/o elemento estructural de acuerdo al diseño de la mezcla desarrollado previamente en laboratorio.



**Figura 1:** Efecto del tiempo de mantenimiento de humedad sobre el desarrollo de resistencia de probetas de hormigón que permanecen a temperatura de laboratorio.

Obviamente, en obras convencionales generalmente resulta mucho más sencillo lograr mantener saturado en agua al hormigón y la temperatura se mantiene naturalmente cercana a la ambiente. Dentro de límites razonables donde la temperatura ambiente se mantiene por encima de los 5°C, esa condición resulta aceptable y sólo deberá tenerse en consideración que el desarrollo de resistencia del hormigón será más “lento” hasta lograr la madurez necesaria. Una buena ayuda que nos permite estimar el desarrollo de resistencia que presenta un hormigón en obra es el concepto de madurez utilizando la fórmula de Nurse-Saul que -si bien no brinda información precisa en muchos casos ya que no considera la influencia del tipo de

cemento y sus particularidades- resulta útil a la hora de hacer estimaciones preliminares del tipo “regla del dedo gordo”.



**Figura 2:** Efecto de la temperatura de curado sobre el desarrollo de resistencia de probetas de hormigón que permanecen saturadas.

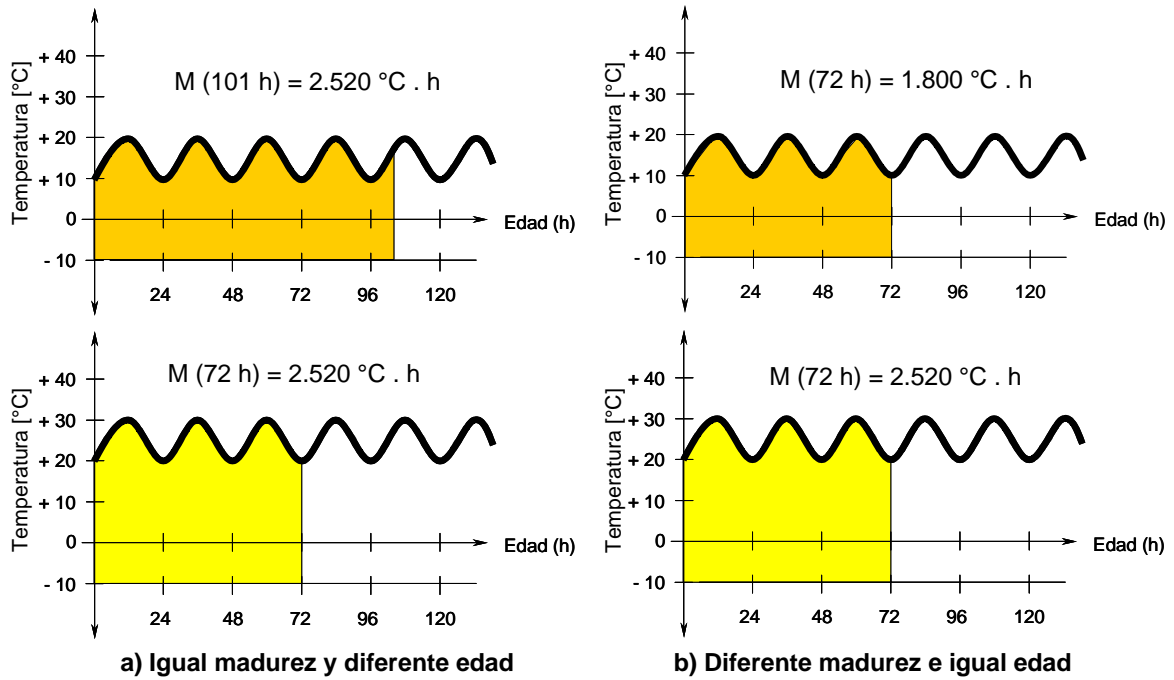
El concepto de madurez indica que si dos hormigones de idéntica composición (igual fórmula y materiales componentes) presentan iguales resistencias al momento que tienen la misma madurez. La fórmula de Nurse-Saul dice que:

$$M = \sum (T+10^{\circ}\text{C}) \cdot \Delta t$$

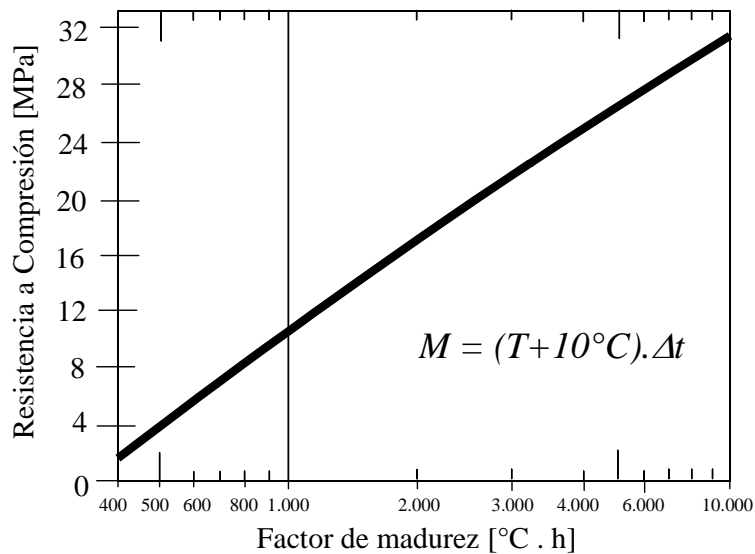
donde : M : madurez  
T: temperatura  
 $\Delta t$  : período de tiempo

En la figura 3 se muestran ejemplos donde el área sombreada equivale a la madurez obtenida en el período de tiempo indicado. En el caso a) se muestra que hormigones curados a diferentes temperaturas alcanzan la misma madurez a edades diferentes. En el caso b) se muestra que a la misma edad, ambos hormigones presentan diferente madurez debido a que tuvieron diferente historia térmica. En la figura 4 se muestra una posible relación entre resistencia del hormigón y madurez. Es importante dejar en claro que cada mezcla presenta una relación entre la madurez y la resistencia diferente por lo que es necesario, antes intentar esta relación en la práctica, tener correlaciones de estudios específicos sobre la mezcla de trabajo. No obstante, como el concepto es siempre válido, tener noción de la historia térmica del hormigón nos permite siempre conocer la madurez relativa aunque no lo asociemos directamente a un valor de resistencia.

Este concepto de madurez es utilizado en los procesos de producción de piezas prefabricadas donde suelen acelerarse los tiempos de desarrollo de resistencia mediante sistemas de curados que aportan en forma sistematizada temperatura y humedad, de manera de obtener piezas terminadas o, al menos, con los niveles de resistencia necesarios para el desmolde y/o que permitan mover la pieza y aprovechar espacios para realizar nuevos ciclos de producción.



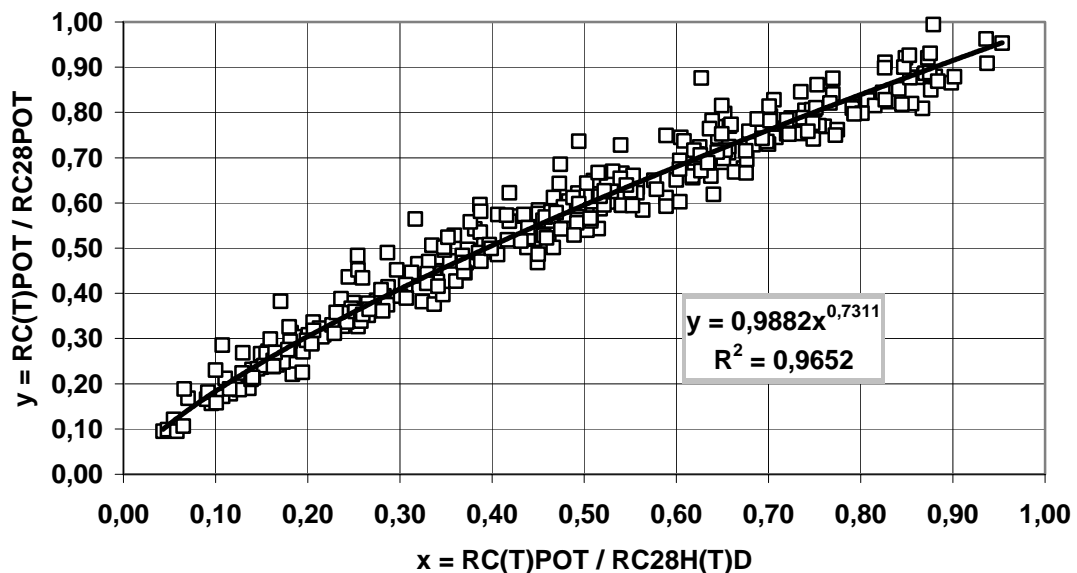
**Figura 3:** Nociones del concepto de madurez. En el caso a) se muestra la cantidad de horas necesarias para obtener una misma madurez de  $2.520^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$  con una determinada historia térmica y en el caso b) se muestra claramente que con las mismas historias térmicas se obtienen diferentes grados de madurez si se analiza a la edad de 72 hs.



**Figura 4:** Relación entre madurez y resistencia obtenida para un cierto conjunto de materiales.

En cualquier caso, asegurar un alto grado de hidratación del cemento resulta siempre muy importante sobre todo pensando que el hormigón que resulta más sensible a una interrupción del curado es el de recubrimiento ya que es el primero en secarse e interrumpir la hidratación de su pasta cementicia. Justamente este hormigón, que es el que naturalmente resulta más débil, es el que está más expuesto a las condiciones medioambientales que tienden a deteriorarlo. Es por ello que los reglamentos y recomendaciones establecen períodos mínimos de mantenimiento del curado con la intención de lograr una calidad en el hormigón que resulte suficientemente parecida a las condiciones de diseño establecida en los estudios específicos realizados y en las experiencias locales previas. Sin embargo, hemos notado que estas

recomendaciones, en general, resultan insuficientes ya que no consideran o tienden a subestimar la influencia de la temperatura, el desarrollo de resistencia de la mezcla, la relación a/c utilizada, el tipo de cemento o el efecto de los aditivos entre otras variables. Estudios de investigación desarrollados por mi colega el Ing. Patricio Corallo a quien he podido el gusto de aconsejar y guiar profesionalmente demuestran que independientemente de algunas de las mencionadas variables aquellos hormigones que desarrollan más rápidamente sus reacciones de hidratación necesitan menor tiempo de curado. Si bien esta afirmación resulta casi una obviedad, lo interesante del trabajo donde se relacionaron más de 300 resultados de resistencia sobre hormigones con 4 diferentes CUCs (contenidos unitarios de cemento, en  $\text{kg/m}^3$ ) y más de 20 tipos de cemento comercializados en el mercado nacional estableciéndose una relación entre las resistencias potenciales y efectivas al momento de interrumpir el curado y las resistencia a 28 días que se cumple para cualquier condición de las mencionadas independientemente del tipo y clase resistente del cemento, CUC o relación a/c utilizada. En la figura 5 se muestra la correlación entre el cociente de la resistencia potencial a una cierta edad T y la resistencia potencial a 28 días de esa misma mezcla indicado sobre las ordenadas con la razón entre la resistencia potencial a esa misma edad T con la resistencia efectiva a 28 días de la mezcla habiéndose interrumpido el curado a la edad T.



**Figura 5:** relación que correlaciona los valores de resistencia potencial a las edades de interrupción del curado y a 28 días con la resistencia efectiva a 28 días del hormigón independientemente del tipo y categoría resistente del cemento y la relación a/c utilizada.

La utilización de esta herramienta permite estimar la resistencia efectiva a 28 días que tendrá un hormigón conociendo los valores de resistencia potencial a las edades de interrupción del curado y a 28 días o conocer el tiempo mínimo de curado necesario que permite obtener la resistencia efectiva deseada. Por otro lado, conociendo algo más sobre la mezcla como por ejemplo la influencia de la relación a/c sobre la resistencia potencial a 28 días (ley de Abrams) se puede estimar la relación a/c a utilizar si se dispone de un tiempo de curado limitado (para mayor información se recomienda la lectura del artículo).

Antes de continuar, creo que convendría informar al lector las diferencias conceptuales entre a) resistencia potencial, b) resistencia efectiva y c) resistencia especificada:

- a) *Resistencia potencial:* es la resistencia a rotura medida sobre probetas de hormigón que son elaboradas, protegidas, curadas y ensayadas en forma normalizada.

- b) *Resistencia efectiva*: es la resistencia a rotura medida sobre testigos calados directamente del elemento estructural y ensayadas en forma normalizada. Las mismas en general resultan inferiores al valor potencial porque las condiciones de compactación y curado difieren de las probetas normalizadas encontrándose a 28 días de edad que resultan aceptables diferencias relativas de resistencia respecto de la potencial de hasta un 15%.
- c) *Resistencia especificada*: es la resistencia utilizada por el proyectista al momento de dimensionar el elemento estructural y al considerar las acciones agresivas del medioambiente en el que trabajará la estructura a fin de asegurar la durabilidad de la misma.

Si bien los reglamentos establecen como aceptable que la resistencia efectiva resulte del orden de hasta un 85% de la potencial debido a “defectos” en el curado o a la compactación, resultaría muy útil que los constructores y la inspección de obra aseguren que –además de utilizar adecuadas prácticas de colocación y compactación- se realice un buen curado. Para ello resulta recomendable tomar la recomendación que ha realizado el Dr. Adam Neville en su conferencia sobre creep dado en Buenos Aires hace unos cuantos años en el marco del Congreso de la Ingeniería 2000 donde comentó la necesidad de poner al curado como un ítem de obra que se pague por separado al constructor y de esa manera estimular al constructor a realizar el trabajo y al inspector a controlarlo. Obviamente, algún lector estará pensando que la inclusión de otro ítem de obra tenderá a aumentar su costo, sin embargo, en mi opinión, esto no debería ser así ya que el curado forma parte del trabajo del constructor y está incluido actualmente en el rubro hormigón (que incluye su elaboración, transporte, colocación, terminación y curado) por lo cual hoy por hoy se está cobrando pero no realizando perjudicando la calidad del trabajo. Creo que el poner el ítem por separado tiende a asegurar el “no olvido” que en muchas obras se está observando estos días.

### **Métodos de curado**

Como ya se ha mencionado, el curado es un proceso a través del cual el constructor intenta brindar adecuadas condiciones de humedad y temperatura que permiten lograr el grado de hidratación necesario que permita al hormigón desarrollar las propiedades de resistencia, estabilidad dimensional y durabilidad para las que ha sido diseñado.

Para ello, en general se utilizan diferentes técnicas que tienden a:

1. Mantener saturado el hormigón, evitando la pérdida y/o reparando las pérdidas de agua que pudiesen producirse durante los primeros días desde el hormigonado.
2. Reducir la pérdida por evaporación superficial del agua de mezclado.
3. Acelerar el desarrollo de resistencia suministrando calor y humedad sobre la pieza de hormigón.

La elección del método de curado depende de múltiples factores entre los que se destacan la disponibilidad, practicidad, necesidad y el análisis de costo-beneficio que realiza el profesional a cargo de la ejecución. Cualquiera sea el método de curado elegido debe adaptarse a las necesidades del proyecto, sin olvidar las consideraciones estéticas, prácticas y resistentes que debe cumplir cada uno de los elementos estructurales sometidos al tratamiento.

#### 1) Métodos para mantener saturado el hormigón:

- 1.1) *Mantener los encofrados colocados*. Uno de los métodos más prácticos para el curado de estructuras de hormigón armado es la de mantener laterales de viga y columnas evitando la pérdida de agua a través de las superficies encofradas. En el caso de utilizar encofrados de madera resulta necesario asegurar que las mismas se encuentren permanentemente saturadas, mientras que los metálicos y otros no absorbentes pueden

dejarse en su lugar sin mayores cuidados especiales. Este método necesita ser complementado con otro para tratar la superficie superior de las losas que no son encofradas y se encuentran desprotegidas.

- 1.2) *Cubrir la superficie.* Las losas, pisos y pavimentos pueden ser curados utilizando arpillera húmeda o cubiertas con film de polietileno u otro material no absorbente de manera de evitar la pérdida de humedad del hormigón. Estos métodos presentan la limitación que tienden a marcar la superficie del hormigón cuando se los coloca en estado fresco inmediatamente después de terminar la superficie. En caso que la terminación superficial sea una condición de proyecto, este método puede ser utilizado luego de que el hormigón haya endurecido lo suficiente, sin embargo requerirá de algún método de protección temprana en estado fresco del material para evitar una rápida evaporación superficial que provoque la fisuración plástica del hormigón. Este método requiere regar algunas veces al día para mantener saturada la arpillera o asegurar el perímetro para evitar la evaporación y levantar el film y regar para asegurar que la superficie del hormigón se mantenga saturada.
- 1.3) *Riego superficial.* El riego por aspersion en forma permanente permite mantener saturado el hormigón evitando su secado superficial. Cuando se trata de grandes superficies expuestas este puede ser un método muy eficiente y económico, sólo debe cuidarse de aplicar un riego muy fino tipo neblina cuando el hormigón se encuentra en estado fresco para evitar su deterioro superficial.
- 1.4) *Curado por inundación.* El método de mantener un pelo de agua sobre la superficie de hormigón en forma permanente es uno de los métodos más antiguos y efectivos conocidos, sin embargo en muchos casos no resulta práctico debido a que las superficies no son perfectamente horizontales y no permiten trabajar sobre la superficie mientras dure el tratamiento.

## 2) Reducir la evaporación

- 2.1) *Uso de compuesto líquido capaz de formar membrana.* Existen en el mercado compuestos líquidos a base de resinas, parafinas, hules y otros materiales que se mantienen líquidos por la acción de solventes. Al ser aplicados sobre la superficie del hormigón en forma de pintura a través de la ayuda de un equipo con aspersores, a medida que el solvente se evapora naturalmente, se forma una membrana elástica de muy baja permeabilidad que intenta evitar el secado superficial del hormigón. Es importante asegurar que los compuestos aplicados sean capaces de retener una humedad no inferior al 80% en la superficie del hormigón luego de 7 días de tratamiento.
- 2.2) *Cubrir la superficie.* Muchas veces se utilizan mantas de arpillera humedecida o mantas impermeables como reductores de evaporación. Hay que tener en cuenta que estos métodos no resultan tan eficientes cuando no hay una continua preocupación del contratista para reponer la humedad perdida en la superficie del hormigón.
- 2.3) *Compuestos selladores.* En general no se aplican con el objeto específico de curar al hormigón ya que incluso en general se los aplica sobre hormigones “secos” con el objeto de proteger al hormigón del ingreso de humedad y/u otros compuestos agresivos. Algunos selladores hidro-repelentes dejan respirar al hormigón.

## 3) Curado acelerado

- 3.1) *Curado a vapor.* Es uno de los métodos más antiguos y conocidos de curado acelerado. En general es utilizado por la industria del hormigón prefabricado o premoldeado con el objeto de obtener mejor rendimiento del espacio disponible. Este método sólo resulta suficientemente eficiente cuando se respetan las 4 etapas necesarias. La primera es el denominado período de espera o prefragüe donde la pieza de hormigón se mantiene en reposo a temperatura ambiente por 2 a 5 hs, la segunda es el período de elevación de temperatura donde se incrementa paulatinamente la temperatura hasta llegar a la

denominada temperatura de tratamiento que generalmente se encuentra entre 65 y 80°C. Es muy importante que este incremento de temperatura se realice con un gradiente no mayor a los 20°C/h. La tercer etapa es la de tratamiento donde la pieza permanece a la temperatura definida sin variaciones durante 6 a 10 hs (estos tiempos pueden variar en función de las necesidades) y la última etapa es la de descenso de temperatura hasta llevar a la pieza a temperatura ambiente. Es muy importante evitar un choque térmico por lo que el gradiente de descenso no puede superar los 15°C/h. En la figura 6 se muestra esquemáticamente un caso de tratamiento por curado a vapor.

- 3.2) *Curado por temperatura.* Además del curado a vapor existen otros métodos de calentamiento del hormigón a través de resistencias eléctricas externas o internas u otros métodos de calentamiento con el objeto de acelerar las reacciones de hidratación.
- 3.3) *Curado por carbonatación.* Este método suele ser utilizado en la producción de pequeñas piezas de hormigón y, fundamentalmente para bloques. Este método se basa en lograr que el  $\text{Ca(OH)}_2$  (hidróxido de calcio) formado como subproducto de hidratación del cemento se combine con en  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono) presente en alta concentración en la cámara de curado para formar  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de calcio) que produce una leve contracción de la pasta cementicia y una mayor dureza. Hay que tener en cuenta que este método no debe utilizarse para piezas de hormigón armado o pretensado debido a que la formación de  $\text{CaCO}_3$  produce una reducción de la alcalinidad de la pasta que disminuye la protección del acero debido a la posible pérdida de la capa pasiva.
- 3.4) *Curado por secado.* Este método también utilizado en la producción de bloques con la finalidad de lograr que las piezas tengan rápidamente una baja humedad para que puedan ser comercializadas y utilizadas en obra. Este método en general se combina con el de carbonatación utilizándose las mismas cámaras de curado. Este método sólo es aplicable para mezclas sin asentamiento donde la mayor parte de la resistencia está dada por la compacidad no por un alto grado de hidratación de la pasta.

Algunas definiciones:

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
Adición mineral	Compuesto mineral, generalmente sólido y finamente dividido, utilizado con el fin de producir efectos favorables sobre la pasta cementicia.
Aditivo	Compuesto químico, generalmente líquido, que incorporado al mortero u hormigón en pequeñas proporciones tiende a modificar cierta propiedad en forma controlada sin producir efectos adversos.
Curado acelerado	Método de curado a través del cual se intenta lograr un alto grado de hidratación y, consecuentemente, nivel de resistencia en un corto período de tiempo.
Reglas del arte	Formas correctas de realizar una actividad de acuerdo a prácticas reconocidas y de probada efectividad.
Resistencia potencial	Resistencia obtenida sobre probetas de dimensiones, prácticas de llenado, compactación, curado y encabezado normalizadas.
Resistencia efectiva	Resistencia obtenida sobre testigos extraídos directamente de la estructura.
Resistencia especificada	Resistencia utilizada por el proyectista en el diseño de la estructura.

Reglas del “dedo gordo” para módulo 2:

1. El hormigón de recubrimiento, aún cuando se ha curado de acuerdo a las reglas del arte, suele mostrar un menor grado de hidratación con una resistencia del orden del 10-15% inferior al hormigón de masa.
2. Aquellos hormigones que no han sido curados pueden mostrar una resistencia de hasta un 50% menor respecto de aquel que ha sido curado adecuadamente, pudiéndose verificar en el recubrimiento valores aún menores.
3. Si no se dispone de mayor información puede tomarse como referencia que aquellos días donde la temperatura media fue inferior a los 10°C no deben ser considerados como días efectivos de curado, debiendo aumentarse el tiempo real de curado tantos días como días con menos de 10°C de temperatura media se hayan registrado en el período de curado.
4. La utilización de métodos de curado por reducción de la evaporación suelen presentar menores resistencias en el hormigón que pueden variar entre 3 y 15% siendo aceptables diferencias menores del 10%.
5. Los métodos acelerados de curado tienden a desarrollar una menor resistencia final debido a una distribución algo desordenada de los productos de hidratación, este hecho debe ser considerado en el diseño para lograr la resistencia y durabilidad necesarios. Resulta habitual que aquellos hormigones curados a vapor logren resistencias finales del orden de un 15% inferiores que las que se obtendrían manteniendo saturadas las piezas, no obstante, cuando los elementos estructurales estarán expuestos a condiciones severas de durabilidad como puede ser el caso de ambiente marino, se deberán hacer los estudios necesarios.
6. El uso de aditivos plastificantes y sobre todo superfluidificantes puede generar cierto retardo en los tiempos de fraguado.
7. El tiempo de inicio de fraguado varía fuertemente con la temperatura. Si bien esta variación resulta muy sensible al tipo, características fisicoquímicas y composición del cemento utilizado y la relación a/c del hormigón resulta posible hacer una primera aproximación modificando el tiempo de inicio de fraguado en el orden 10 minutos por cada °C de temperatura.