

APARTES DE CHARLA SOBRE ENFRIAMIENTO DE CONCRETO

Charla dictada por:

Ing. José Miguel Zeledón

Dic. 2005

Costa Rica

SOBRE EL CONCRETO:

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: pasta y agregados.

La pasta formada por el cemento y el agua une a los agregados (gruesos y finos) creando una masa que se endurece como consecuencia de la reacción química del cemento con el agua. Aire a muy pequeñas proporciones también se encuentra atrapado en el concreto.

La cantidad de agua adicionada para formar la pasta influye fuertemente en la calidad del concreto.

En un concreto adecuadamente confeccionado, cada partícula del agregado es completamente cubierta por la pasta y todos los espacios entre las partículas de agregados se llenan completamente con pasta.

ENTONCES: La calidad del concreto depende tanto de la cantidad como de la calidad de la pasta y de los agregados que se utilicen así como también de la completa unión entre ellos.

El Incremento de temperatura del concreto una vez colocado se debe básicamente al calor de hidratación del cemento.

Este incremento de temperatura varía directamente con el contenido de cemento por unidad de volumen y más significativamente con el tipo de cemento utilizado, por ejemplo: cemento Portland tipo I genera cerca de 180 Btu/lb (la mitad de este el primer día después de colocado el concreto). El tipo II genera menos calor y así sucesivamente.

Algunas mezclas de materiales se usan para disminuir el uso de cemento pero también generan cerca de la mitad del calor generado por el cemento.

Debido a la ausencia de enfriamiento por el aire ambiente, el calor de hidratación puede causar una subida de temperatura de la masa de concreto entre 20 a 30 °C y todo cambio de temperatura conlleva un cambio de volumen. Estos cambios de temperatura y volumen diferentes en diferentes partes de la “chorrea o colada” generarán esfuerzos internos que pueden terminar en grietas.

Asimismo, un enfriamiento rápido en la superficie de la construcción (debido al aire ambiente) respecto a una masa interna con lento enfriamiento puede provocar grietas superficiales las cuales en una presa alta pueden generar inestabilidad estructural ante la presión del agua.

ENTONCES: La diferente variación (elevación) de la temperatura del concreto en diferentes partes de la “chorrea” genera grietas internas y superficiales debilitando estructuralmente la obra.

También, el incremento de la temperatura del concreto durante el calor de hidratación provoca una mayor demanda de agua de la mezcla para mantener el revenimiento (asentamiento) constante. Este

adicional de agua provoca una pasta más diluida y por lo tanto disminuye la resistencia en todas las edades del concreto.

TEMPERATURA DEL CONCRETO

La temperatura deseada para el concreto varía para cada obra de acuerdo a la especificación seleccionada. Según PORTLAND CEMENT ASSOCIATION , en términos generales una temperatura entre los 10 y 15 °C es deseable para aprovechar al máximo las propiedades de la mezcla.

Temperaturas bajas en el concreto agiliza el desarrollo de las obras y en el caso de obras de gran tamaño este ahorro de tiempo puede representar meses o años de trabajo.

Para estimar la temperatura de una mezcla, como lo es el concreto, es necesario conocer las cantidades y temperaturas de cada uno de los componentes de la mezcla. También es necesario conocer el **calor específico** de cada componente (capacidad calorífica o energía que cede o absorbe un kilogramo (libra) del componente para disminuir o aumentar su temperatura en un grado centígrado (° F)).

Algunos valores típicos de calor específicos de los componentes del concreto son : arena, agregados y cemento entre 0.20 y 0.23, hielo = 0.50 y el agua = 1.0 .

Conociendo los datos anteriores, la temperatura del concreto **a la hora de la mezcla** se puede calcular por medio de la siguiente formula:

$$T_c = \frac{(M_a \times C_{pa} \times T_a + M_w \times C_{pw} \times T_w + M_c \times C_{pc} \times T_c + M_{aa} \times C_{paa} \times T_{aa})}{(M_a \times C_{pa} + M_{ag} \times C_{pag} + M_c \times C_{pc} + M_{aa} \times C_{paa})}$$

donde :

M_a, C_{pa} y T_a = masa, calor específico y temperatura, respectivamente, de los agregados.

M_w, C_{pw} y T_w = masa, calor específico y temperatura, respectivamente, del agua.

M_c, C_{pc} y T_c = masa, calor específico y temperatura, respectivamente, del cemento.

M_{aa}, C_{paa} y T_{aa} = masa, calor específico y temperatura, respectivamente, del agua libre en los agregados.

Dependiendo del método de traslado desde la mezcladora hasta el sitio de colada el aumento de temperatura en el concreto puede ser estimado alrededor de 1 a 3 °C.

También debe considerarse que luego de su mezclado inicial, en el concreto se inicia la reacción química del cemento con el agua generando el calor de hidratación. Este calor puede calcularse considerando el dato teórico suministrado por el suplidor del cemento el cuál será dependiente del tipo de cemento seleccionado para utilizar en la mezcla.

De esta forma una vez generado todo el calor de hidratación, el incremento en la temperatura del concreto podría estimarse bajo la siguiente fórmula:

$$DT = \frac{M_c \times \text{Calor Hidratación}}{(M_a \times C_{pa} + M_{ag} \times C_{pag} + M_c \times C_{pc} + M_{aa} \times C_{paa})}$$

Conociendo entonces la temperatura del concreto recién mezclado y también el calor de hidratación se puede estimar la temperatura necesaria de cada componente para lograr obtener una temperatura adecuada en la mezcla y también definir cuales sistemas de enfriamiento son necesarios para lograrlo.

METODOS DE ENFRIAMIENTO DEL CONCRETO

Cuando se piensa en bajar la temperatura del concreto, se debe entonces pensar en disminuir la temperatura de cualquiera de sus tres componentes principales: agua, agregados y cemento. En algunas obras que se realizan en condiciones cálidas es necesario inclusive bajar la temperatura de los tres componentes para lograr obtener una buena temperatura en la mezcla.

A) Enfriamiento por agua fría.

El primer componente en el que se piensa en disminuir la temperatura es el agua ya que los sistemas de refrigeración para lograrlo son relativamente simples. Mediante un sistema de recirculación de agua a través de un intercambiador de calor se puede mantener fría el agua que va a ser dosificada hasta una temperatura de 1 °C inclusive.

La cantidad de calor que puede extraer el agua fría aplicada a una determinada mezcla de concreto se puede calcular por la siguiente fórmula:

$$Q = Ma \times Cpa \times (Tc - Tf)$$

Donde ;

Ma = masa de agua fría incorporada a la mezcla.

Cpa = calor específico del agua

Tc = Temperatura deseada del concreto.

Tf = Temperatura agua fría (tal y como llega a la mezcladora)

El agua fría se almacena en recipientes aislados para evitar su calentamiento y se transporta hasta las mezcladoras mediante bombas centrífugas y redes de tuberías aisladas con retornos al tanque principal.

El inconveniente del uso del agua fría es que en algunas aplicaciones donde el concreto adquiere una alta temperatura, la cantidad de agua a aplicar a la mezcla para lograr enfriarla excedería la cantidad especificada para obtener una resistencia determinada. Cuando se dan estas condiciones es cuando se hace necesario la incorporación de agua en estado sólido (hielo) dentro de la mezcla.

B) Enfriamiento por hielo

El agua en estado sólido (hielo) tiene la característica de poder suministrar más enfriamiento a la mezcla por cada unidad de masa aplicada, esto es debido al calor latente de fusión. De esta forma, un kilo de hielo tiene una capacidad de enfriamiento alrededor de 5 veces más grande que un kilo (un litro) de agua fría. Esta característica del hielo es la que le permite producir gran enfriamiento de la mezcla de concreto sin sobrepasar la máxima cantidad de agua permitida.

La cantidad de calor que puede extraer el hielo aplicado a una determinada mezcla de concreto se puede calcular por la siguiente fórmula:

$$Q = (M_h \times C_{lf}) + M_h \times C_p_a \times (T_c - T_{fu})$$

Donde ;

M_h = masa de hielo incorporada a la mezcla.

C_{lf} = Calor latente de fusión o congelación del agua.

C_p_a = calor específico del agua.

T_c = Temperatura deseada del concreto.

T_{fu} = Temperatura de fusión del hielo.

También se puede estimar la temperatura de una mezcla de concreto enfriada por hielo mediante la siguiente fórmula:

$$T_c = \frac{ ((M_a \times C_{pa} \times T_a + M_w \times C_{pw} \times T_w + M_c \times C_{pc} \times T_c + M_{aa} \times C_{paa} \times T_{aa}) - F_1 \times M_i) }{ (M_a \times C_{pa} + M_w \times C_{pw} + M_c \times C_{pc} + M_{aa} \times C_{paa} + M_i \times C_{pa}) }$$

donde :

M_a, C_{pa} y T_a = masa, calor específico y temperatura, respectivamente, de los agregados.

M_w, C_{pw} y T_w = masa, calor específico y temperatura, respectivamente, del agua.

M_c, C_{pc} y T_c = masa, calor específico y temperatura, respectivamente, del cemento.

M_{aa}, C_{paa} y T_{aa} = masa, calor específico y temperatura, respectivamente, del agua libre en los agregados.

F_1 = 80 para °C y 112 para °F

M_i = masa de hielo incorporada.

Debido a la tendencia del hielo a compactarse o unirse entre sí una vez producido, este debe ser almacenado en un silo refrigerado para asegurar la disponibilidad del mismo en todo momento que se necesite.

La capacidad de almacenaje de este silo debe dimensionarse pensando en varios factores (incluyendo disponibilidad de espacio físico) pero probablemente el más importante a considerar es el tiempo de respuesta para resolver alguna situación de emergencia relacionada con la producción de hielo y que permita continuar con la preparación de mezclas de concreto. Otro aspecto a considerar en el dimensionado del silo es la cantidad de horas diarias que se deseen operar las máquinas generadoras de hielo.

La tendencia del hielo a unirse entre sí hace que los silos convencionales como los de pared alta, fondo en V o fondo cónico no sean prácticos para almacenaje de hielo, por eso los silos diseñados para almacenar y entregar hielo automáticamente llevan un sistema de rastillos que continuamente está distribuyendo y almacenando el hielo en el espacio destinado para eso y en el momento deseado el mismo rastillo se encarga de descargarlo a una serie de transportadores tipo tornillo los cuales lo llevan hasta el sitio donde será dosificado.

Cuando las distancias entre el silo de almacenamiento y la tolva dosificadora es grande se recurre al uso de sistemas de transporte neumático.

C) Enfriamiento de los agregados

Debido a que existe un límite máximo de agua, líquida o sólida , a aplicar a la mezcla de concreto, en algunas obras no es suficiente el enfriamiento aplicado por el agua fría y/o el hielo como para lograr llevar el concreto a la temperatura deseada. Cuando esta situación se presenta es cuando se piensa en disminuir la temperatura de los agregados.

El enfriamiento de los agregados se da básicamente por dos métodos:

- 1) por aplicación de agua fría a los agregados directamente cuando ellos viajan en las bandas transportadoras desde donde se encuentran a granel hasta el sitio donde está la mezcladora y
- 2) por aplicación de aire frío inyectado uniformemente en los silos donde se almacenen antes de ser dosificados a la mezcladora. En ambos casos se logra enfriar tanto el agregado en sí como la humedad (agua) que este lleva. Con el segundo método se tiene la ventaja de que se pueden enfriar los agregados a una temperatura menor de 0 °C.

A pesar de que al bajar la temperatura de los agregados se logra un efecto significativo en la temperatura del concreto (debido a que los agregados representan un alto porcentaje de la masa del concreto), normalmente se prefiere recurrir al hielo por su facilidad de producción, almacenaje y distribución.

Como la cantidad de cemento es relativamente poca (por peso) y su calor específico muy bajo, normalmente no es interesante enfriarlo, pero se podría realizar sin ningún inconveniente en caso de que fuese necesario.

PORQUE USAR HIELO EN ESCAMAS?

El hielo en escamas North Star es la elección más eficaz y económica para sus requerimientos de enfriamiento:

Enfriamiento más rápido:

El hielo en escamas North Star proporciona más de 17,000 pies cuadrados de área de superficie por tonelada de hielo, brindando mayor eficacia en el enfriamiento que cualquier otro hielo. Otros tipos de hielo, tales como tubo, en placas, tipo shell o triturado, ofrecen solamente 4,250 a 13,500 pies cuadrados de superficie de enfriamiento por tonelada de hielo.

En el enfriamiento del concreto, el espesor de las hojuelas es importante porque es necesario que el hielo esté completamente derretido antes que el concreto sea vaciado de la mezcladora para asegurarse una homogénea distribución del agua y de la temperatura dentro de la mezcla. Si el hielo se derrite antes de terminar el mezclado entonces durante el tiempo restante se asegura una adecuada consistencia de la mezcla

La gran superficie expuesta del hielo en escamas ocasiona un rápido proceso de enfriamiento del concreto y de fusión del hielo lo cuál favorece la calidad de la mezcla.

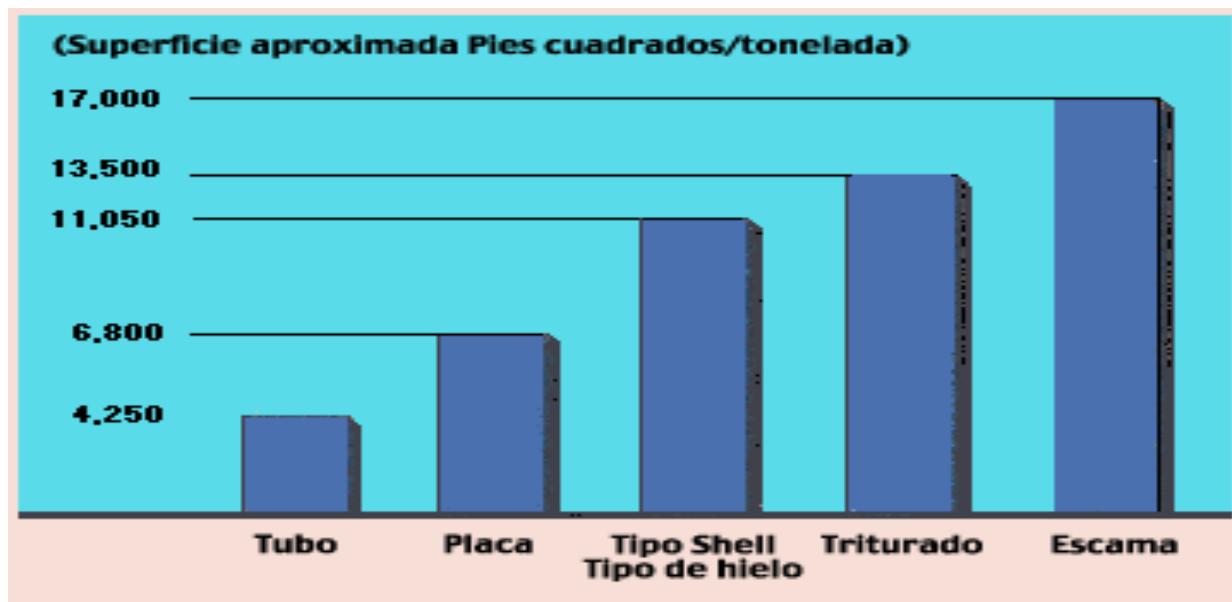
Mayor facilidad de almacenamiento y distribución:

El hielo en escamas North Star es completamente seco, de manera que tardará en compactarse dentro de un silo de almacenamiento de baja temperatura y no obstruirá los sistemas de entrega neumático o de tipo tornillo.

Producción económica:

El hielo en escamas es el hielo más económico que se produce, requiriendo solamente 1.3 toneladas de refrigeración por tonelada de hielo, a partir de agua a 60°F (16° C) de temperatura.

Área de superficie de enfriamiento por tonelada de hielo



El concreto es una mezcla donde sus componentes van en suspensión. Debido a su tamaño pequeño y delgado, el hielo en escamas puede llegar a todas la partes de esa mezcla y enfriarla a la temperatura deseada en forma uniforme y rápida. Los otros tipos de hielo se compactan y no producen enfriamiento homogéneo así como también no facilitan el acceso del agua (al derretirse el hielo) a todas las partes de la mezcla.. Recordar que un gramo de silicato de calcio hidratado (el corazón del concreto) tiene una área superficial de 300 metros cuadrados y se requiere por lo tanto de un hielo que también tenga una gran área superficial.

Importante es considerar que por razones de control en la dosificación del agua en la mezcla de concreto, el volumen del hielo adicionado no debe ser mayor al 75 a 80 % del agua total de la mezcla requerida para una determinada especificación. El restante 25 a 20 % será suministrado en forma de agua fría.

SISTEMAS DE REFRIGERACION

Interesa hacer una breve descripción de cada uno de los componentes principales del sistema de refrigeración necesario para enfriamiento de agua o producción de hielo.

Compresor : es el elemento mecánico que se encarga de mantener en movimiento al refrigerante dentro del circuito de refrigeración. Es donde se realiza el proceso de compresión del gas refrigerante. Los compresores se pueden clasificar en herméticos, semiherméticos y abiertos. Otra especificación los puede dividir en reciprocantes y en tornillos.

Evaporador: es el elemento intercambiador de calor donde se le produce el enfriamiento al producto que se desea enfriar. Es el componente dentro del ciclo de refrigeración donde se absorbe el calor. En el evaporador es donde se produce el enfriamiento del agua o bien la formación del hielo.

Condensador: es el elemento intercambiador donde se le transmite al medio ambiente el calor que se le extrajo al producto enfriado. Los condensadores pueden transmitir el calor al agua, aire o bien una mezcla de aire y agua.

Válvula de expansión: es el elemento que regula la cantidad de refrigerante que pasa a través del evaporador para producir mayor o menor enfriamiento al producto. También se encarga de obstruir el paso de refrigerante para lograr la presión necesaria en el evaporador para obtener la temperatura deseada.

Máquinas para hacer hielo en escamas:

Consiste básicamente de un cilindro de doble pared donde por el interior (dentro de la doble pared) se hace circular un refrigerante el cuál provoca el enfriamiento y congelación del agua que se recircula por una de las caras exteriores.

En el centro del cilindro y mediante un sistema de transmisión de potencia se hace girar, en forma circular, unas cuchillas raspadoras que se encargan de despegar el hielo formado en las paredes frías del cilindro. Mediante el uso de una bomba centrífuga para recirculación de agua se suministra agua nuevamente a la pared donde se eliminó el hielo.

En el exterior del cilindro de doble pared se coloca aislamiento de poliuretano para evitar la condensación y las pérdidas de frío al medio ambiente donde está ubicada la máquina. La parte exterior es cubierta con una capa gruesa y hermética de fibra de vidrio que le da gran belleza y evita que los aislamientos se humedezcan.

El hielo producido por estos equipos tiene un espesor que oscila entre los 1.5 y 2.0 mm de espesor y una temperatura aproximada a los – 5 °C. Como se despega de la superficie mediante una acción mecánica se obtiene un hielo seco que es fácil de almacenar y transportar.

En resumen se puede mencionar que algunas de las grandes **ventajas de usar hielo en escamas** para el enfriamiento del concreto son:

- 1) Evita la formación de grietas internas y externas** provocadas por las variaciones de volumen del concreto durante la etapa de curado y provocadas por el calentamiento originado del calor de hidratación.
- 2) Se obtiene la máxima resistencia para el concreto** especificado.
- 3) Disminuye el tiempo de ejecución de la obra.**
- 4) Se logra una represa de muy alta calidad y de excelente acabado.**

Realizado por :

**Ing. José Miguel Zeledón
Dic. 2005**