



HORMIGONADO EN TIEMPO FRIO

(Adaptado de Diseño y Control de Mezclas de Concreto, 2004
y otra bibliografía de consulta)



HORMIGONADO EN TIEMPO FRIO

El hormigón se puede colocar de manera segura, sin daños debidos a la congelación, durante los meses de invierno, en climas fríos, si se toman ciertas precauciones. Neville (1998) explica que si se permite que el hormigón que aún no ha fraguado se congele, el agua de la mezcla se convertirá en hielo y aumentará el volumen total del hormigón. Debido a que ahora no queda agua disponible para las reacciones químicas, el fraguado y endurecimiento del hormigón se retrasan y queda poca pasta de cemento que pueda ser alterada por la formación de hielo. Cuando luego tiene lugar el deshielo, el hormigón fraguará y endurecerá en su estado expandido (con un gran contenido de poros) y en consecuencia con una resistencia baja.

El CIRSOC 201 (2002) define el tiempo frío como el periodo en que durante más de 3 días sucesivos el promedio de la temperatura del aire sea menor de 5°C o la temperatura ambiente permanece bajo 10°C durante más de la mitad de cualquier período de 24 horas. Bajo estas circunstancias, todos los materiales y equipos necesarios para la protección y el curado adecuados deben estar disponibles y listos para el uso antes del inicio de la colocación del hormigón. Se pueden reiniciar las prácticas normales de colocación cuando la temperatura ambiente sea mayor que 10°C por más de medio día.

Durante el tiempo frío, la mezcla de hormigón y su temperatura se deben adaptar a los procedimientos constructivos y a las condiciones del clima. Se deben hacer preparativos para proteger el hormigón. Los recintos, rompevientos, calentadores portátiles, encofrados aislantes y mantas deben estar listos para mantener la temperatura de hormigón. Los encofrados, el acero de refuerzo y los accesorios que se vayan a insertar deben estar libres de nieve e hielo en el momento que se coloque el hormigón. Deben estar disponibles termómetros e instalaciones de almacenamiento de probetas de prueba para verificar si estas precauciones son adecuadas.

EFFECTO DE LA CONGELACIÓN DEL HORMIGÓN FRESCO

El hormigón desarrolla muy poca resistencia a bajas temperaturas. Por lo tanto, se debe proteger contra los efectos perjudiciales de la congelación hasta que su grado de saturación se haya reducido suficientemente por el proceso de hidratación. El momento en que se logra esta reducción corresponde aproximadamente al tiempo necesario para que el hormigón desarrolle una resistencia de 3.5 MPa (Powers, 1962). Esto ocurre durante las primeras 24 horas después del colado, bajo temperaturas normales y relaciones agua-cemento menores que 0.60.

Pueden ocurrir reducciones significativas de la resistencia última, hasta cerca de 50%, si el hormigón se congela pocas horas después del colado o antes que se desarrolle una resistencia de 3.5 MPa. Sin embargo, Neville menciona que desafortunadamente no es fácil determinar la edad en la que el hormigón es lo suficientemente fuerte para resistir el congelamiento. El hormigón que se va a exponer a productos descongelantes debe desarrollar una resistencia de 28 MPa antes de los ciclos repetidos de congelación y deshielo.

Es posible recuperar la resistencia del hormigón que se haya congelado a edad temprana sólo una vez, aproximándose a la resistencia normal, a través del curado adecuado posterior. Sin



embargo este hormigón no va a ser tan resistente a la intemperie, ni va a ser tan estanco como uno que no se haya congelado, debido al aumento de su porosidad. El período crítico, después del cual el hormigón no se daña seriamente depende de los materiales componentes del hormigón y de las condiciones de mezclado, colocación, curado y posterior secado. Por ejemplo, el hormigón con aditivo incorporador de aire es menos susceptible a los daños causados por la congelación a edades tempranas que el hormigón sin aire incluido.

DESARROLLO DE RESISTENCIA A BAJAS TEMPERATURAS

La temperatura afecta la velocidad de hidratación del cemento; las bajas temperaturas retardan la hidratación y consecuentemente retardan el endurecimiento y el desarrollo de resistencia del hormigón.

Si el hormigón se congela y se mantiene congelado a una temperatura mayor que 10°C va a desarrollar resistencia lentamente. Abajo de esta temperatura, la hidratación del cemento y el desarrollo de la resistencia se paralizan. Las Fig. 1 y 2 muestran el efecto de las bajas temperaturas sobre el tiempo de fraguado y sobre el asentamiento, respectivamente.

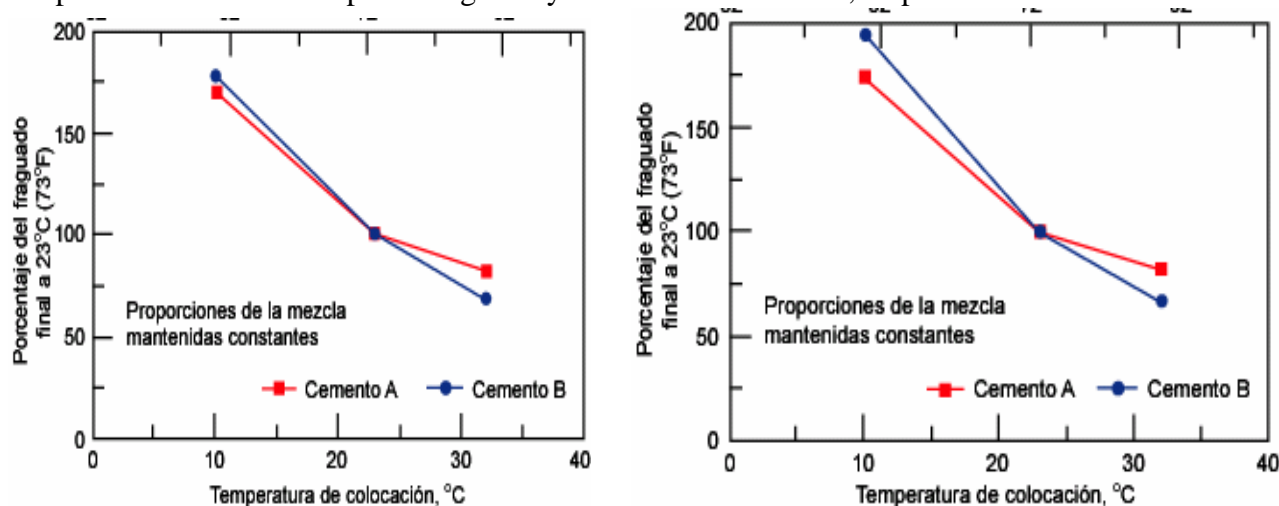


Figura 1: Efecto de las bajas temperaturas sobre el tiempo de fraguado del hormigón

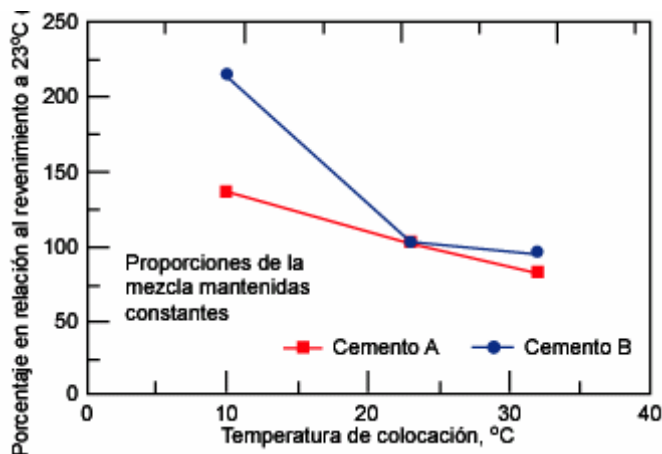


Figura 2: efecto de las bajas temperaturas sobre el asentamiento del hormigón



La Fig. 3 enseña el efecto de la temperatura en el desarrollo de la resistencia a compresión a lo largo del tiempo.

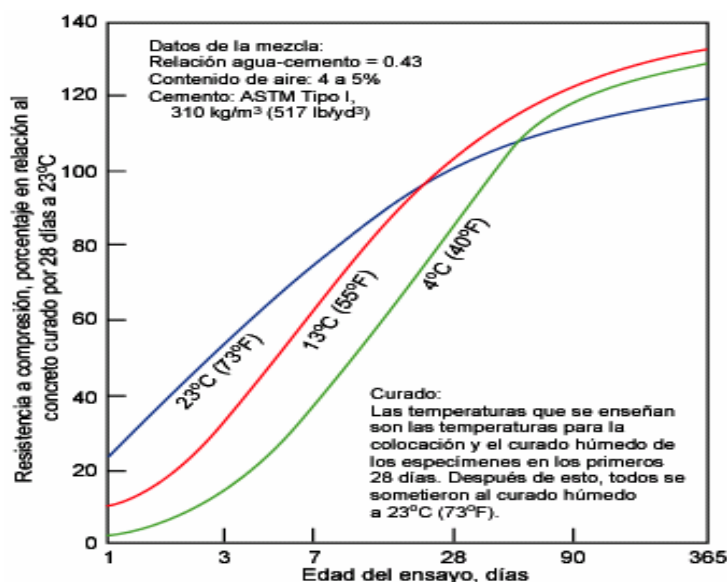


Figura 3: Efecto de la temperatura en el desarrollo de la resistencia a compresión

En la Fig. 4 los hormigones colados y curados a 4°C y a 13°C presentaron resistencias más bajas en la primera semana, pero después de 28 días, cuando las probetas se curaron a 23°C, sus resistencias crecieron más rápidamente que el hormigón colado y curado a 23°C y con un año sus resistencias se presentaron un poco mayores.

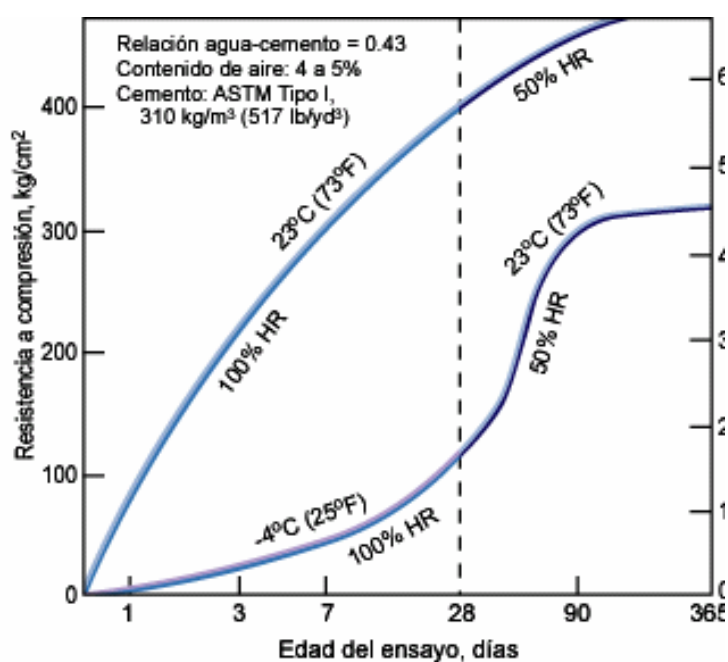


Figura 4: Influencia en el desarrollo de resistencia de temperatura baja a edades menores de 28 días



Se pueden lograr altas resistencias iniciales con el uso de cemento de alta resistencia inicial, como se puede observar en la Fig.5. Las principales ventajas se presentan en los primeros 7 días. A una temperatura de curado de 4°C, las ventajas del cemento de alta resistencia inicial son más marcadas y persisten por más tiempo que en altas temperaturas.

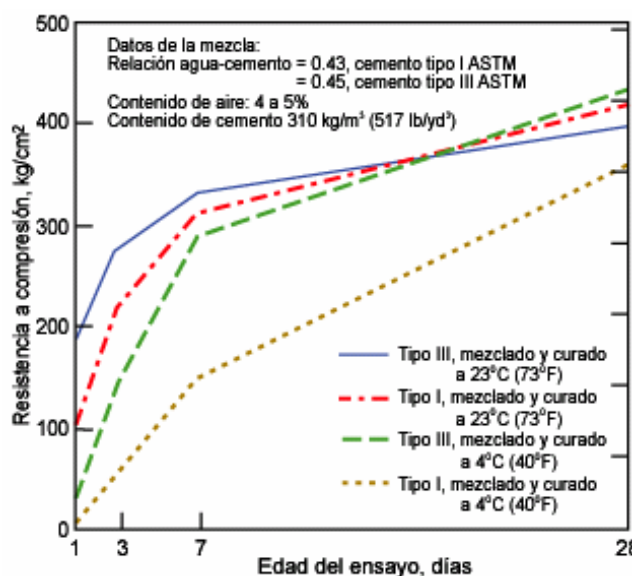


Figura 5: Desarrollo de resistencia con distintos tipos de cemento y temperaturas

CALOR DE HIDRATACIÓN

El hormigón genera calor durante su endurecimiento como consecuencia del proceso químico a través del cual el cemento reacciona con el agua para formar una pasta endurecida y estable. El calor generado se llama calor de hidratación y su cantidad y tasa de liberación varían con el tipo de cemento. Además de esto, las dimensiones del elemento de hormigón, la temperatura ambiente, la temperatura inicial del hormigón, la relación agua-cemento, los aditivos y la composición, finura y cantidad del material cementante también afectan el calor de hidratación.

El calor de hidratación es muy útil durante el clima frío, pues contribuye para que se logre una temperatura adecuada de curado, generalmente sin que sean necesarias otras fuentes temporarias de calor, principalmente en elementos de hormigón masivo.

El hormigón se debe entregar en una temperatura adecuada y se debe tener en cuenta la temperatura de los encofrados, acero de refuerzo, terreno u otro hormigón sobre el cual se colará el hormigón. No se debe colar el hormigón sobre un hormigón o terreno congelados.

Una precaución importante, por ejemplo, es la instalación de una lona sobre una base de fundación de hormigón después de la colocación del mismo. Normalmente son necesarias lonas y mantas aisladoras para retener el calor de hidratación de manera más eficiente y conservar el hormigón lo más caliente posible. Las lecturas de la temperatura del hormigón con el termómetro indicarán si la cubierta es adecuada o no. El calor liberado



durante la hidratación va a compensar, hasta un grado considerable, la pérdida de calor durante el colado, acabado y operaciones de curado temprano. A medida que la liberación de calor de hidratación disminuye, la necesidad de cubierta para el hormigón se vuelve más importante.

MEZCLAS ESPECIALES DE HORMIGÓN

En la construcción durante el invierno, es deseable obtener alta resistencia en edades tempranas para reducir el periodo de tiempo durante el cual se requiere una protección temporaria. El costo adicional del hormigón de alta resistencia normalmente se compensa por la posibilidad de reutilización de los encofrados y puntales más rápidamente, ahorro con la disminución del tiempo de calefacción temporal, fraguado más rápido que permite que se empiece el acabado más temprano y pronto uso de la estructura. El hormigón de alta resistencia inicial se puede obtener con el uso de uno o la combinación de varios de los siguientes puntos:

1. Cemento de alta resistencia inicial
2. Cemento portland adicional (60 a 120 kg/m³)
3. Aceleradores químicos

Se pueden emplear pequeñas cantidades de aceleradores, tales como cloruro de calcio (con una dosis máxima de 2% por masa de cemento portland, cuando no haya armaduras), para acelerar el fraguado y el desarrollo de la resistencia temprana del hormigón en clima frío. No se deben usar los aceleradores que contienen cloruro donde exista un potencial para la corrosión, tal como en elementos de hormigón que contienen acero de refuerzo o donde se vayan a usar insertos de aluminio o acero galvanizado. No se recomiendan los cloruros para hormigones expuestos a suelos o aguas que contengan sulfatos o para hormigones susceptibles a la reacción álcali-agregado. Tampoco se deben emplear los aceleradores como sustitutos de un curado adecuado o de la protección en contra de la congelación. Los aditivos aceleradores, especialmente diseñados, permiten que se coloque el hormigón a temperaturas menores que -7°C. El objetivo de estos aditivos es reducir el tiempo de fraguado inicial y final, pero no acelerarán, necesariamente, el desarrollo de resistencia.

La cubierta del hormigón para mantener la humedad afuera y para retener el calor de hidratación aún es necesaria. Además, nunca se deben utilizar las soluciones anticongelantes tradicionales, tales como las usados en automóviles. La cantidad de estos materiales necesaria para bajar apreciablemente el punto de congelación es tan grande que la resistencia y otras propiedades pueden ser seriamente afectadas.

Como el objetivo del uso de mezclas especiales durante la colocación de hormigón en clima frío, es la reducción del tiempo de fraguado, una relación agua/cemento baja y un bajo asentamiento son particularmente deseables, especialmente en superficies planas, pues las mezclas de hormigón con asentamiento alto normalmente tienen un fraguado más lento. Además, se minimiza la evaporación,

HORMIGÓN CON AIRE INCORPORADO

El aire incorporado es particularmente deseable en cualquier hormigón colado durante climas



fríos. Los hormigones sin aire incorporado pueden sufrir pérdida de resistencia y daños internos y de superficie, como resultado de los ciclos de congelación-deshielo. El aire incorporado proporciona la capacidad de absorber tensiones debidas a la formación del hielo en el hormigón.

La Fig. 6 muestra el porcentaje de resistencia a compresión de hormigones sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo bajo distintas condiciones climáticas. La incorporación de aire se debe usar siempre en construcciones durante los meses en que sea posible la congelación del agua, con excepción del hormigón producido bajo techo, donde no haya lluvia, nieve o agua de otras fuentes que puedan saturar el hormigón y donde no haya posibilidad de congelación.

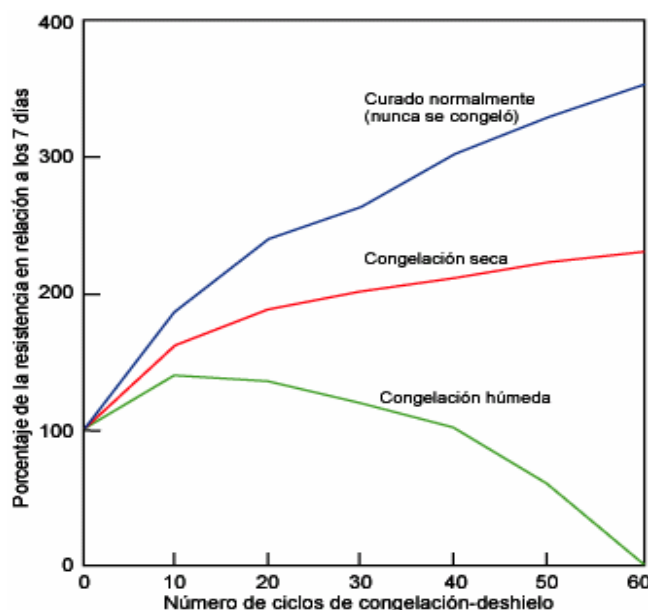


Figura 6: Porcentaje de resistencia a compresión en función del numero de ciclos de congelamiento y deshielo

La probabilidad de que el agua sature un piso de hormigón es muy alta. Un ejemplo es lo sucedido durante el invierno, del último piso de un edificio de departamentos. La nieve cayó sobre la cubierta superior. Cuando se usaron los calefactores debajo de la cubierta para calentarla, la nieve se derritió y el agua se escurrió, a través de las aberturas en el piso, hacia un nivel que no estaba siendo calentado. El hormigón saturado de agua se congeló, causando pérdida de resistencia, principalmente en la superficie de la losa. Esto también pudo dar como resultado una mayor deflexión de la losa y una superficie menos resistente al desgaste.

TEMPERATURA DEL HORMIGÓN

Temperatura del hormigón al mezclarse

La temperatura del hormigón durante el mezclado no debe ser menor que las líneas 1, 2 o 3 de la Tabla 1, para los respectivos espesores de sección. Observe que se recomiendan temperaturas de hormigón más bajas para el hormigón masivo porque el calor generado durante la hidratación se disipa más lentamente en secciones de mayor espesor. También se observa que, en temperaturas ambientes más bajas, se pierde más calor del hormigón durante



el transporte y la colocación y, por lo tanto, las temperaturas de mezclado recomendadas son más altas en climas fríos.

Tabla 1. Temperatura recomendada de hormigón (con aire incorporado) para la construcción en tiempo frío
(adaptado del ACI 306R-88)

Línea	Condición		Espesor de la sección (mm)			
			Menos de 300	300 a 900	900 a 1800	Más de 1800
1	Temperatura mínima del hormigón fresco cuando es mezclado durante el clima indicado	Mayor que 1°C	16°C	13°C	10°C	7°C
2		-18°C a -1°C	18°C	16°C	13°C	10°C
3		Menor que -18°C	21°C	18°C	16°C	13°C
4	Temperatura mínima del hormigón al colocarlo y para mantenerlo		13°C	10°C	7°C	5°C

Hay poca ventaja en usar el hormigón fresco a una temperatura mucho mayor que 21°C. Las temperaturas más elevadas del hormigón no garantizan una protección contra la congelación proporcionalmente mayor porque la tasa de pérdida de calor es mayor. Además, las temperaturas altas del hormigón no son deseables, pues aumentan la contracción (retracción) térmica después del endurecimiento, requieren más agua de mezclado para el mismo asentamiento y contribuyen para una posible fisuración por contracción plástica (causada por pérdida rápida de humedad a través de evaporación). Por lo tanto, la temperatura del hormigón durante su colocación no debe superar más que 5°C las temperaturas mínimas recomendadas en la Tabla 1.

Temperatura de los agregados.

La temperatura de los agregados varía con el clima y el tipo de almacenamiento. Los agregados normalmente contienen terrones congelados e hielo cuando la temperatura está por debajo de la temperatura de congelación. Los agregados congelados deben ser descongelados para evitar bolsones de agregados después de dosificar, mezclar y colocar el hormigón. Si el derretimiento ocurre en la mezcladora, se deben evitar contenidos de agua excesivamente altos y el efecto conjunto del enfriamiento debidos al derretimiento del hielo.

Cuando las temperaturas son mayores que la de congelación, raramente se hace necesario el calentamiento de los agregados y la temperatura deseada del hormigón se puede obtener con el calentamiento del agua de mezclado. Cuando las temperaturas son menores que la de congelación, además del calentamiento del agua, normalmente sólo se necesitan calentar los agregados finos para producir un hormigón con las temperaturas requeridas, siempre que el agregado grueso esté libre de terrones congelados.

Los tres métodos más comunes de calentamiento de agregados son:

- (1) almacenamiento en cubos o tolva de pesaje, calentados por espirales de vapor o vapor directo;
- (2) almacenamiento en silos calentados por aire caliente o espiral de vapor y
- (3) amontonamiento de agregados en pilas sobre losas o tuberías calentadas.



A pesar de que la calefacción del agregado almacenado en cubos o tolvas es el método más comúnmente usado, el volumen de agregado que se puede calentar normalmente es limitado y rápidamente consumido durante la producción del hormigón. La circulación de vapor a través de tuberías sobre las cuales los agregados están amontonados es un método recomendado para el calentamiento de los agregados. Las pilas se pueden cubrir con lonas para retener y distribuir el calor y prevenir la formación de hielo. El vapor vivo se puede inyectar directamente en la pila de agregados, preferiblemente a presiones de 500 a 900 kPa, pero promueve variaciones de la humedad del agregado, resultando un control irregular del agua de mezcla.

En pequeñas obras, los agregados se pueden calentar almacenándolos sobre tuberías de acero para alcantarillas, en las cuales se prende fuego. Se debe tener cuidado para no “quemar” el agregado.

Temperatura del agua de mezclado.

De todos los materiales usados para la producción del hormigón, el agua es el que más fácilmente se calienta. La masa de los agregados y cemento en el hormigón es mucho mayor que la masa del agua; sin embargo, el agua puede almacenar cinco veces más calor que el cemento y el agregado con la misma masa. Para el cemento y los agregados, el calor específico promedio (o sea, unidades de calor necesarias para aumentar la temperatura en 1°C por kg de material se puede asumir como 0.925 kJ, siendo que el del agua es 4.187 kJ.

La temperatura aproximada del hormigón se puede calcular con las temperaturas de los materiales componentes a través de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{0,22 (C.T_c + Gr.T_{gr} + F.T_f) + H_{gr}.T_{gr} + H_f.T_f + A.T_a}{0,22 (C + Gr + F) + H_{gr} + H_f + A}$$

Donde :

T = temperatura del hormigón fresco en $^{\circ}\text{C}$

T_{gr} , T_c , T_f y T_a = temperatura en $^{\circ}\text{C}$ de los agregados, cemento, agua de mezcla y humedad libre en los agregados, respectivamente

F , Gr , F , A , H_{gr} , H_f : masa en kg de los agregados, cemento, agua de mezcla y humedad libre en los agregados, respectivamente

Si el promedio ponderado de la temperatura de los agregados y cemento es mayor que 0°C , se puede seleccionar la temperatura adecuada para el agua de mezcla, para la obtención de la temperatura requerida del hormigón. El rango de las temperaturas del hormigón en el gráfico corresponde a los valores recomendados de las líneas 1, 2 y 3 de la Tabla 1.

Para evitar la posibilidad del fraguado rápido o relámpago del hormigón, cuando el agua o los agregados se calientan a una temperatura mayor que 38°C , debe combinárselos con agua antes de la adición del cemento. Si se sigue esta secuencia de carga en el mezclado, se pueden usar temperaturas de agua hasta el punto de ebullición, siempre que los agregados estén suficientemente fríos para reducir la temperatura final de la mezcla para menos de 38°C .

Se deben evitar las fluctuaciones en la temperatura del agua de un pastón al otro. La temperatura del agua de mezclado se puede ajustar con la mezcla de agua caliente y agua fría.



ENSAYOS DE CONTROL

Los termómetros son necesarios para la verificación de la temperatura del hormigón en la entrega, colado y mantenimiento. Después de que el hormigón se haya endurecido, las temperaturas se pueden verificar con termómetros de superficie especiales o con un termómetro común que se mantiene cubierto con cubierta aislante.

Las probetas para ensayo de hormigón se deben mantener a una temperatura entre 16°C y 27°C en la obra por 48 horas, hasta que sean llevadas al laboratorio para el curado (IRAM 1524,). Durante este período, las probetas se deben mantener en una caja de curado y se deben cubrir con una bolsa plástica impermeable o con una chapa no absorbente y no reactiva. La temperatura en la caja debe ser controlada con precisión.

BIBLIOGRAFIA DE CONSULTA

- ACI Committee 306, Cold-Weather Concreting, ACI 306R-88, reprobado en 1997, American Concrete Institute, Michigan. 1997. Concreto: Ensino, Pesquisa e realizações. Ed. G.C. Isaia. IBRACON. 2005.
- CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LOS REGLAMENTOS NACIONALES DE SEGURIDAD DE OBRAS CIVILES. 1982. **Reglamento CIRSOC 201**. Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de hormigón armado. INTI Editor. 1 y 2. Buenos Aires.
- Kosmatka, S. H. Kerkhoff, B. Panarese, W.C. Tanesi, J. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Portland Cement Association. 2004.
- Kumar Metha, P. Monteiro, P. Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais. Editora IBRACON. 2008.
- Neville, A.M. Brooks, J.J. Tecnología del Concreto. Editorial Trillas. 1998.