

NOTA IMPORTANTE:

La entidad sólo puede hacer uso de esta norma para si misma, por lo que este documento NO puede ser reproducido, ni almacenado, ni transmitido, en forma electrónica, fotocopia, grabación o cualquier otra tecnología, fuera de su propio marco.

ININ/ Oficina Nacional de Normalización

NORMA CUBANA

NC

368: 2005

**CÓDIGO DE BUENAS PRÁCTICAS PARA EL HORMIGONADO
EN CLIMA CALIENTE**

Code of good practices for hot weather concreting

ICS: 91.100.30

1. Edición Diciembre 2005
REPRODUCCIÓN PROHIBIDA

Oficina Nacional de Normalización (NC) Calle E No. 261 Vedado, Ciudad de La Habana. Cuba. Teléfono: 830-0835 Fax: (537) 836-8048; Correo electrónico: nc@ncnorma.cu; Sitio Web: www.nc.cubaindustria.cu



Cuban National Bureau of Standards

NC 368: 2005

Prefacio

La Oficina Nacional de Normalización (NC), es el Organismo Nacional de Normalización de la República de Cuba que representa al país ante las Organizaciones Internacionales y Regionales de Normalización.

La elaboración de las Normas Cubanas y otros documentos se realiza generalmente a través de los Comités Técnicos de Normalización. Su aprobación es competencia de la Oficina Nacional de Normalización y se basa en las evidencias del consenso.

Esta Norma Cubana:

- Ha sido elaborada por el NC/CTN 37 de “Hormigón Reforzado y Morteros” en el que están representadas las instituciones siguientes:
 - Ministerio de la Construcción
 - Oficina del Historiador de la Ciudad de La Habana
 - Instituto Superior Politécnico “José A. Echeverría”
 - Ministerio del Azúcar
 - Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias
 - Oficina Nacional de Normalización
- Es una adopción idéntica por el método de traducción de la versión en inglés del Código de Buena Práctica ACI 305R-99 “Hot Weather Concreting” del American Concrete Institute.
- Los cambios editoriales que se han hecho al texto original han sido indicados en recuadros dentro del texto normal, con letras cursivas y se refieren esencialmente a aspectos relativos a la referencia directa a Normas Cubanas existentes, así como a otros aspectos de actualización de la problemática y de la experiencia cubana en general.
- Consta de dos anexos, uno de ellos de carácter obligatorio.

© NC, 2005

Todos los derechos reservados. A menos que se especifique, ninguna parte de esta publicación podrá ser reproducida o utilizada en alguna forma o por medios electrónicos o mecánicos, incluyendo las fotocopias, fotografías y microfilmes, sin el permiso escrito previo de:

Oficina Nacional de Normalización (NC)

Calle E No. 261, Vedado, Ciudad de La Habana, Habana 4, Cuba.

Impreso en Cuba

CÓDIGO DE BUENAS PRÁCTICAS PARA EL HORMIGONADO EN CLIMA CALIENTE**Reporte del Comité 305 del ACI**

El hormigón mezclado, transportado y vertido bajo las condiciones de alta temperatura ambiental, baja humedad relativa, radiación solar directa o viento, requiere de una comprensión de los efectos que estos factores medioambientales tienen sobre las propiedades del hormigón y los trabajos de construcción.

Se pueden tomar medidas para eliminar o minimizar los efectos indeseables de estos factores medioambientales.

La experiencia del trabajo en la construcción en clima caliente reducirá la posibilidad de tener problemas más serios.

Este Reporte del Comité 305 del Instituto Americano del Hormigón (ACI), resume los problemas potenciales y presenta las mejores prácticas dirigidas a minimizarlos. Entre esas prácticas están medidas tan importantes como la selección y proporción de la materia primas del hormigón, el pre-enfriamiento de los ingredientes, las dosificaciones especiales, las distancias de transporte, la consideración de la temperatura del hormigón en el momento de su vertido, las facilidades para la manipulación del hormigón en el lugar y durante el período de curado a edades tempranas, el vertido, las técnicas de curado y de ensayos apropiadas y los procedimientos para la inspección en condiciones de clima caliente. Se incluye una selección de la bibliografía.

Estas revisiones abarcan una revisión editorial del documento. Los focos de las revisiones se centran particularmente en los efectos del clima caliente sobre las propiedades del hormigón y el empleo de aditivos químicos reductores de agua de mediano rango y retardadores del fraguado en el clima caliente.

Palabras claves: Aire incorporado; enfriamiento; curado; evaporación; Alta temperatura; Construcción en clima cálido; retracción plástica; métodos de producción, retempering, ensayo de asentamiento; contenido de agua.

CONTENIDOS**Capítulo 1 – Introducción**

- 1.1 Generalidades
- 1.2 Definición de clima caliente
- 1.3 Problemas potenciales en el clima caliente
- 1.4 Problemas potenciales relativos a otros factores
- 1.5 Prácticas para el hormigonado en clima caliente

Capítulo 2 – Efectos del clima caliente sobre las propiedades del hormigón

- 2.1 Generalidades
- 2.2 La temperatura del hormigón
- 2.3 Condiciones ambientales
- 2.4 Requerimientos de agua
- 2.5 Efecto del cemento
- 2.6 Materiales cementicios suplementarios
- 2.7 Los aditivos químicos
- 2.8 Los áridos
- 2.9 Diseño de la mezcla

Capítulo 3 – Producción y entrega

- 3.1 Generalidades
- 3.2 Control de la temperatura del hormigón
- 3.3 Dosificación y mezclado
- 3.4 Entrega
- 3.5 Ajuste del asentamiento
- 3.6 Propiedades de las mezclas de hormigón
- 3.7 Retempering

Capítulo 4 – Vertido y curado

- 4.1 Generalidades
- 4.2 Preparación para el vertido y el curado
- 4.3 Vertido y acabado
- 4.4 Curado y protección

Capítulo 5 – Ensayos e Inspección

- 5.1 Ensayos
- 5.2 La inspección

Capítulo 6 – Referencias

- 6.1 Normas y reportes de referencia
- 6.2 Referencias citadas

Anexo A – Estimación de la temperatura del hormigón (Obligatorio)**Anexo B – Métodos de enfriamiento del hormigón fresco (Informativo)****CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN****1.1 – Generalidades**

El clima cálido puede generar problemas en el mezclado, vertido y curado del hormigón hidráulico o de cemento Portland. Estos problemas pueden afectar las propiedades y la prestación de servicios del hormigón. La mayoría de estos problemas está relacionado con el incremento del ritmo de evaporación de la humedad del hormigón fresco. El ritmo de hidratación del cemento depende de la temperatura del hormigón, de la composición y finura del cemento y de los aditivos utilizados.

Este reporte identificará los problemas creados por el hormigonado en clima cálido y describe las buenas prácticas que aliviarán estos efectos potencialmente adversos. Estas buenas prácticas incluyen las actividades de preparación y los procedimientos sugeridos para ser empleados en los tipos generales de construcción en climas cálidos, tales como pavimentos, puentes y edificaciones. La temperatura, los cambios de volumen y los problemas de fisuración que están asociados al hormigón masivo son tratados más profundamente en el ACI 207.1R y en el ACI 224R.

Frecuentemente se emplea una temperatura máxima del hormigón que es colocado, como un esfuerzo para controlar la resistencia, la durabilidad, la fisuración por retracción plástica, la fisuración térmica y la retracción por secado. El vertido del hormigón en clima caliente, sin embargo es demasiado complejo para ser resuelto estableciendo una temperatura máxima del hormigón al ser colocado o al ser transportado.

Esta última aseveración es realmente correcta, pero en el caso concreto de Cuba, se ha podido demostrar que con nuestros materiales y en nuestras condiciones temperaturas del hormigón superiores a los 35°C crean dificultades muy serias para la preparación, manipulación, el transporte y el vertido del hormigón en clima cálido, por lo que este criterio práctico, sin negar los importantes aspectos que se indican en este Código, es absolutamente válido para limitar la temperatura de la mezcla fresca.

La durabilidad del hormigón es un término general que es difícil de cuantificar, pero que se percibe como la resistencia principal del hormigón al intemperismo (ACI 201.2R). Generalmente si las resistencias de los hormigones son satisfactorias y las prácticas de curado son buenas y suficientes para evitar el secado indeseable de las superficies, la durabilidad del hormigón en clima cálido no diferirá grandemente de la del hormigón similar colocado a temperaturas normales.

La presencia de un sistema deseable de pequeñísimas burbujas de aire (aire incorporado), es necesaria si el hormigón va a ser expuesto a ciclos de congelación.

Si no existe un registro aceptable de ensayos de campo, el diseño de la mezcla de hormigón puede ser determinado mediante mezclas de prueba (NC 120:2004). Las mezclas de prueba se harán a la temperatura de trabajo real y se ajustará siguiendo el procedimiento establecido en la NC 320:2003.

Se ha eliminado la nota en la que hace referencia al empleo de los procedimientos según el apartado 2.9 y se ha incluido la norma cubana de referencia.

De acuerdo con la Norma Cubana NC 221:2002 y la ASTM C31/C31M las probetas de ensayo del hormigón elaboradas en el campo, que se emplean para chequear la adecuación del diseño de mezcla en el laboratorio por resistencia, o como base para la aceptación o el Control de Calidad, deben ser curadas inicialmente entre 16 y 27°C. Si las primeras 24 horas de curado ocurren a 38°C, la resistencia a compresión de las probetas de ensayo pueden ser de un 10 a un 15% más bajas que las que se curan en condiciones normativas (Gaynor et al. 1985).

Si se permite que las probetas se sequen a edades tempranas, las resistencias se reducirán aún más (Cebec 1987). Por lo tanto una adecuada fabricación, curado y ensayo de las probetas durante el clima caliente es un aspecto crítico y se deben dar los pasos necesarios para que se cumplan los procedimientos especificados.

1.2 - Definición de clima caliente

1.2.1 Con el propósito de esta norma, clima caliente es cualquier combinación de las siguientes condiciones que tiendan a afectar la calidad del hormigón fresco o endurecido, acelerando el ritmo de pérdida de humedad y de hidratación del cemento, o provocando resultados negativos:

- Alta temperatura ambiental
- Elevada temperatura del hormigón
- Baja humedad relativa
- Velocidad del viento; y
- Radiación solar

1.2.2 Los efectos de una elevada temperatura del aire, radiación solar y baja humedad relativa pueden ser más pronunciados con el incremento de la velocidad del viento (figura 2.1.5). Los problemas potenciales del hormigonado en clima caliente pueden aparecer en cualquier época del año en un clima cálido tropical o en un clima árido y ocurren generalmente en la estación del verano en los otros climas.

La fisuración temprana debido a retracción térmica es generalmente más severa en la primavera y en el otoño, debido a que el diferencial de temperatura para cada período de 24 horas es más alto durante estas estaciones del año. Las medidas de precaución requeridas en días soleados y con viento serán más estrictas que las requeridas en días calmos y húmedos, aunque la temperatura sea la misma.

1.3 – Problemas potenciales en clima caliente

1.3.1 Los problemas potenciales para el hormigón en estado fresco frecuentemente incluyen:

- Incremento en la demanda de agua;
- Incremento en el ritmo de pérdida de asentamiento de la mezcla y la correspondiente tendencia a adicionarle agua en el lugar de trabajo;
- Incremento del ritmo de fraguado, dando como resultado una mayor dificultad en la manipulación, compactación, terminación y un mayor riesgo de formación de juntas frías;
- Incremento en la tendencia a la fisuración por retracción plástica;
- Incremento en la dificultad de controlar el aire incorporado a la mezcla.

1.3.2 Las deficiencias potenciales del hormigón en estado endurecido pueden incluir:

- Disminución de las resistencias a 28 días y posteriores, debido ya sea a una elevada demanda de agua, una alta temperatura del hormigón o ambos efectos en el momento del vertido en los siete primeros días;
- Una tendencia incrementada a la fisuración debido a la retracción por secado y debido al diferencial térmico con toda la estructura o a los diferenciales de temperatura dentro de la sección transversal del miembro;
- Disminución de la durabilidad como resultado de la fisuración;
- Mayor variabilidad en la apariencia superficial, debido a las juntas frías o a la diferencia de color por los diferentes ritmos de hidratación o diferentes relaciones agua/material cementicio;
- Incremento del potencial de corrosión del acero de refuerzo, haciendo posible el ingreso de soluciones corrosivas; e
- Incremento de la permeabilidad debido del elevado contenido de agua, un curado inadecuado, carbonatación, áridos ligeros o una proporción inadecuada matriz-áridos.

1.4 – Problemas potenciales relativos a otros factores

Otros factores que deben ser considerados junto con los climáticos son:

- El empleo de cementos con elevado ritmo de hidratación;
- El uso de hormigones de alta resistencia, que requieren de más elevados contenidos de cemento en la mezcla;
- El diseño de secciones finas de hormigón con sus correspondientes y más elevados porcentajes de acero, lo que complica el vertido y la compactación del hormigón;
- La necesidad económica de continuar trabajando en clima extremadamente caliente; y
- El empleo de cementos de retracción compensada.

1.5 – Práctica para el hormigonado en clima caliente

Cualquier daño al hormigón que sea provocado por el clima caliente nunca puede ser completamente aliviado. Es necesario contar con muy buen juicio para seleccionar el compromiso más apropiado de calidad, economía y practicabilidad. Los procedimientos seleccionados dependerán de; el tipo de construcción; las características de los materiales que se emplean y la experiencia de la industria local con la elevada temperatura ambiente, con altas temperaturas de los hormigones, con baja humedad relativa, con velocidad del viento y con radiación solar directa.

Las más serias dificultades ocurren cuando el personal que coloca el hormigón carece de experiencia en la construcción en clima caliente, o en la ejecución del tipo particular de construcción. Las improvisaciones de último minuto son raramente exitosas.

Deben ser aplicadas medidas preventivas tempranas, con énfasis en la evaluación de las materias primas, la planificación y la compra por adelantado, así como la coordinación de todas las fases del trabajo.

La planificación avanzada para el clima caliente incluye los procedimientos detallados para el mezclado, vertido, protección, curado, monitoreo de la temperatura y el ensayo del hormigón.

Son importantes las precauciones a tomar para evitar la fisuración por retracción plástica. El potencial de fisuración térmica debe ser previsto, ya sea por cambios totales de volumen o por restricción interna.

Los métodos para el control de la fisuración incluyen: el empleo apropiado de juntas, el incremento en la cantidad de acero de refuerzo o fibras, limitar la temperatura del hormigón, reducir el contenido de cemento en la mezcla, emplear cementos de bajo calor de hidratación, acelerar el tiempo para el deslizado del encofrado y seleccionar y dosificar aditivos químicos y adiciones minerales apropiados.

La lista siguiente de prácticas y medidas para reducir o evitar los problemas potenciales del hormigonado en clima caliente se discuten en detalle en los Capítulos 2, 3 y 4:

- Seleccionar las materias primas del hormigón y sus proporciones con resultados probados que sean satisfactorios en clima caliente.
- Enfriar el hormigón;
- Utilizar una consistencia del hormigón que permita un vertido rápido y una compactación efectiva;
- Minimizar el tiempo de transporte, vertido, compactación y acabado del hormigón;
- Planificar el trabajo para evitar la exposición adversa del hormigón al medioambiente: Organizar las operaciones de vertido ya sea de día o de noche, cuando las condiciones del clima sean favorables;
- Proteger al hormigón de la pérdida de humedad durante el vertido y el curado; y
- Organizar una conferencia previa al vertido para discutir los requerimientos del hormigonado en clima cálido

CAPÍTULO 2 – EFECTOS DEL CLIMA CALIENTE SOBRE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

2.1 – Generalidades

2.1.1 Las propiedades que hacen del hormigón un excelente material de construcción pueden verse muy afectadas en clima caliente, tal como se define en el Capítulo 1, los efectos dañinos se minimizan mediante los procedimientos de control señalados en este reporte. Las resistencias mecánicas, la impermeabilidad, estabilidad dimensional y la resistencia del hormigón al medio ambiente, la erosión y el ataque químico, dependen todas de los siguientes factores: la selección y el control apropiado de los materiales y del diseño de la mezcla; la temperatura inicial del hormigón; la velocidad del viento; la radiación solar; la temperatura ambiente y las condiciones de humedad durante el período de vertido y curado.

2.1.2 El hormigón mezclado, vertido y curado a elevadas temperaturas normalmente desarrolla más altas resistencias que el hormigón producido y curado a más bajas temperaturas, pero las resistencias son generalmente más bajas a 28 días y a edades posteriores. Los datos de la figura 2.1.2 muestran que con el incremento de la temperatura de curado, a 1 día la resistencia se

incrementará y a 28 días decrecerá (Klieger 1958; Verbeck y Helmuth 1968). Algunos investigadores han llegado a la conclusión de que una microestructura relativamente más uniforme de la pasta de cemento hidratada puede contribuir a obtener resistencias más altas de las mezclas de hormigón vertidas y curadas a más bajas temperaturas (Mehta 1986).

2.1.3 Los ensayos de laboratorio han demostrado el efecto adverso de las altas temperaturas con una falta de curado apropiado sobre la resistencia del hormigón (Bloem 1954). Los especímenes moldeados y curados al aire a 23 °C y 60% de humedad relativa y a 38 °C y 25% de humedad relativa dan lugar a resistencias de solo el 73 y el 62% respectivamente cuando se comparan con los obtenidos con los especímenes normativos que se curan húmedos a 23 °C por 28 días. Mientras mayor sea la demora entre la fabricación de las probetas y la colocación de las mismas en el curado húmedo, mayor será la reducción de la resistencia. Los datos ilustran que un curado inadecuado en combinación con elevadas temperaturas de vertido impiden el proceso de hidratación y reducen la resistencia. Los ensayos fueron hechos con un hormigón sin aditivos ni adiciones minerales que podrían haber mejorado su desempeño a elevadas temperaturas. Otros investigadores han determinado que un curado insuficiente es más dañino que las altas temperaturas (Cebeci 1986) y además que los niveles de resistencia requeridos pueden mantenerse mediante el empleo apropiado ya sea de aditivos químicos o adiciones minerales en el hormigón (Gaynor y otros 1985; Mittelacher 1985 y 1992).

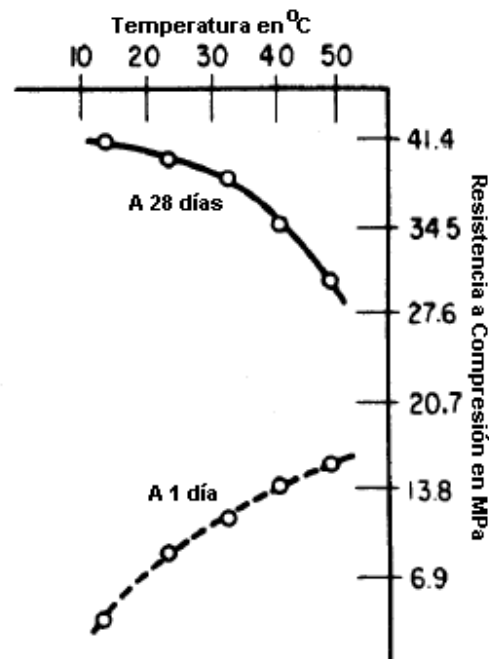


Figura 2.1.2 — Efecto de la temperatura de curado en la resistencia a compresión del hormigón (Verbeck y Helmuth 1968)

2.1.4 La fisuración por retracción plástica está frecuentemente asociada con el hormigonado en clima caliente en lugares áridos o secos. Ocurre en el hormigón expuesto fundamentalmente en losas, pero también en vigas y en cimientos y puede desarrollarse en otros climas cuando la superficie del hormigón fresco se seca y subsecuentemente se retrae. El secado superficial se inicia siempre que el ritmo de evaporación es mayor que el ritmo al cual el agua sube a la

superficie del hormigón recientemente vertido por exudación. Un método para estimar el ritmo de evaporación está indicado en el apartado 5.1.3. Las temperaturas elevadas del hormigón, una elevada velocidad del viento y una baja humedad relativa, sola o en combinación, causan una rápida evaporación del agua superficial. El ritmo de exudación, por otra parte, depende de los ingredientes de la mezcla de hormigón y de sus proporciones, del espesor de los miembros que son hormigonados y del tipo de compactación y acabado. Debido a que el secado superficial se inicia cuando el ritmo de evaporación excede el ritmo de exudación, la probabilidad de fisuración por retracción plástica se incrementa por lo tanto siempre que las condiciones medioambientales incrementen la evaporación, o cuando el hormigón posee un ritmo de exudación reducido. Por ejemplo las mezclas de hormigón que incorporan cenizas volantes, microsilíce o cementos de elevada finura, frecuentemente tienen un bajo o insignificante ritmo de exudación y son altamente sensibles al secado superficial y a la retracción plástica, aun bajo condiciones moderadas de evaporación (ACI 234R).

2.1.5 La fisuración por retracción plástica es poco frecuente en clima caliente húmedo donde la humedad relativa raramente es inferior del 80%. La tabla 2.1.5 muestra para varias humedades relativas, las temperaturas del hormigón que pueden dar como resultado ritmos críticos de evaporación y por lo tanto incrementan la probabilidad de fisuración por retracción plástica. La tabla está basada en asumir una velocidad del viento de 16 km/h y una temperatura del aire de 6°C por debajo que la temperatura del hormigón.

El nomograma de la figura 2.1.5 está basado en los métodos hidrológicos comunes para estimar el ritmo de evaporación del agua en lagos y reservorios y es por lo tanto el método más aproximado cuando se trata de estimar el ritmo de evaporación de la superficie del hormigón mientras esa superficie esté cubierta de agua exudada. Cuando la superficie no está cubierta con agua exudada, el nomograma y su expresión matemática subyacente tiende a sobreestimar el ritmo real de pérdida de agua en la superficie del hormigón tanto como en un factor de 2 o más (Al-Fadhala 1997). El método es por lo tanto el más útil en la estimación de la evaporación potencial de las condiciones ambientales y no es un estimador del ritmo real de pérdida del agua del hormigón. En el proceso temprano de la exudación, sin embargo, y a ritmos de evaporación menores o iguales a 1,0 kg/m²/h, el método ha demostrado estar bien de acuerdo con las mediciones de pérdida de agua, siempre que la temperatura, la humedad y la velocidad del viento se hayan medido tal como se describe en el texto debajo de la figura 2.1.5.

Es especialmente importante que la velocidad del viento sea monitoreada a 0,5 m por encima de la superficie de evaporación. Esto es porque la velocidad del viento se incrementa rápidamente con la altura por encima de la superficie y la medición de la velocidad del viento que se toma por encima de la altura indicada y que se emplea en el nomograma, sobreestimaré el ritmo de evaporación. Note además que la velocidad del viento varía mucho con el tiempo y los estimados no deben basarse en ráfagas momentáneas.

El empleo de la figura 2.1.5 aporta los ritmos estimados de evaporación basados en factores medioambientales de temperatura, humedad y velocidad del viento, que contribuyen a provocar fisuración por retracción plástica. El método gráfico del nomograma también brinda información rápida sobre los efectos de los cambios en uno o más de estos factores. Por ejemplo se muestra que el hormigón a temperatura de 21 °C, que es vertido a una temperatura del aire de 21 °C, con humedad relativa del 50% y una velocidad moderada del viento de 16 km/h, tendrá 6 veces el ritmo de evaporación en la superficie del mismo hormigón que se vierte cuando no hay viento.

Tabla 2.1.5 — Temperaturas típicas del hormigón para varias humedades relativas que son potencialmente críticas para la fisuración por retracción plástica

Temperatura del hormigón en °C	Temperatura del aire en °C	Ritmo crítico de evaporación			
		1,0 kg/m ² /h	0,75 kg/m ² /h	0,50 kg/m ² /h	0,25 kg/m ² /h
		Humedad relativa, %*			
41	35	85	100	100	100
38	32	80	95	100	100
35	29	75	90	100	100
32	27	60	85	100	100
29	24	55	80	95	100
27	21	35	60	85	100
24	19	20	55	80	100

* Humedad relativa, en % para la cual el ritmo de evaporación excede los valores críticos mostrados, asumiendo que la temperatura del aire sea 6 °C más fría que la del hormigón y una velocidad constante del viento de 16 km/h, medida a 0,5 m por encima de la superficie de evaporación. Nota: Tabla basada en el nomograma de la NRMCA-PCA (Figura 2.5.1) con valores redondeados hasta el 5% más cercano.

2.1.6 Cuando el ritmo de evaporación se espera que se aproxime al ritmo de exudación del hormigón, se deberán tomar precauciones como las explicadas en detalle en el Capítulo 4. Como los ritmos de evaporación varían desde cero a por encima de 1,0 kg/m²/h, éstos no se miden normalmente con el tiempo, es común asumir un valor para el ritmo crítico de evaporación. El valor más comúnmente asumido es el de 1,0 kg/m²/h. La experiencia más reciente, con un tablero de puente que contenía microsílíce, ha conducido a ritmos de evaporación máximos especificados como adecuados de 0,025 kg/m²/h (Departamento de Transportación de Virginia). Las especificaciones para el estado de Nueva York y la ciudad de Cincinnati son valores intermedios de 0,75 y 0,50 kg/m²/h respectivamente.

La probabilidad de que ocurra fisuración por retracción plástica se puede incrementar si el tiempo de fraguado del hormigón se prolonga por el uso de un cemento de fraguado lento, por emplear una dosis excesiva de aditivo retardador del fraguado, por reemplazar cemento con cenizas volantes o por el enfriamiento del hormigón. Las cenizas volantes son buenas para reducir la exudación y por lo tanto pueden contribuir a incrementar la tendencia a la fisuración (ACI 226.3R). Las fisuras por retracción plástica son difíciles de cerrar una vez que se han producido (Ver Apartado 4.3.4).

2.2 – Temperatura del hormigón

A menos que se tomen medidas para controlar el desempeño del hormigón a temperaturas elevadas, mediante la selección de los materiales y las proporciones adecuadas de la mezcla indicadas en los Apartados 2.3 a 2.9, los incrementos en la temperatura del hormigón tendrán los siguientes efectos adversos (En el Apartado 1.3 se listan otros efectos adversos):

- La cantidad de agua requerida para obtener un asentamiento dado, se incrementa con el tiempo. Para un tiempo de mezclado constante, la cantidad de agua requerida para producir un asentamiento dado también se incrementa con la temperatura, tal como se muestra en las figuras 2.2.1 (a) y (b);
- El incremento del contenido de agua en la mezcla provocará un descenso en las resistencias y la durabilidad si la cantidad de material cementicio no se incrementa proporcionalmente;
- La pérdida de asentamiento se hará evidente más temprano después del mezclado inicial y a un ritmo más acelerado, creando problemas con las operaciones de vertido y manipulación del hormigón;
- En clima árido, la fisuración por retracción plástica es más probable;

- En secciones de grandes dimensiones habrá un incremento del ritmo de hidratación y de la evolución del calor, lo que incrementará las diferencias de temperatura entre el exterior y el interior del hormigón y con ello la posibilidad de fisuración térmica (ACI 207.1R);
- El curado temprano es fundamental y la falta de curado incrementa los efectos negativos en la medida en que se eleva la temperatura.

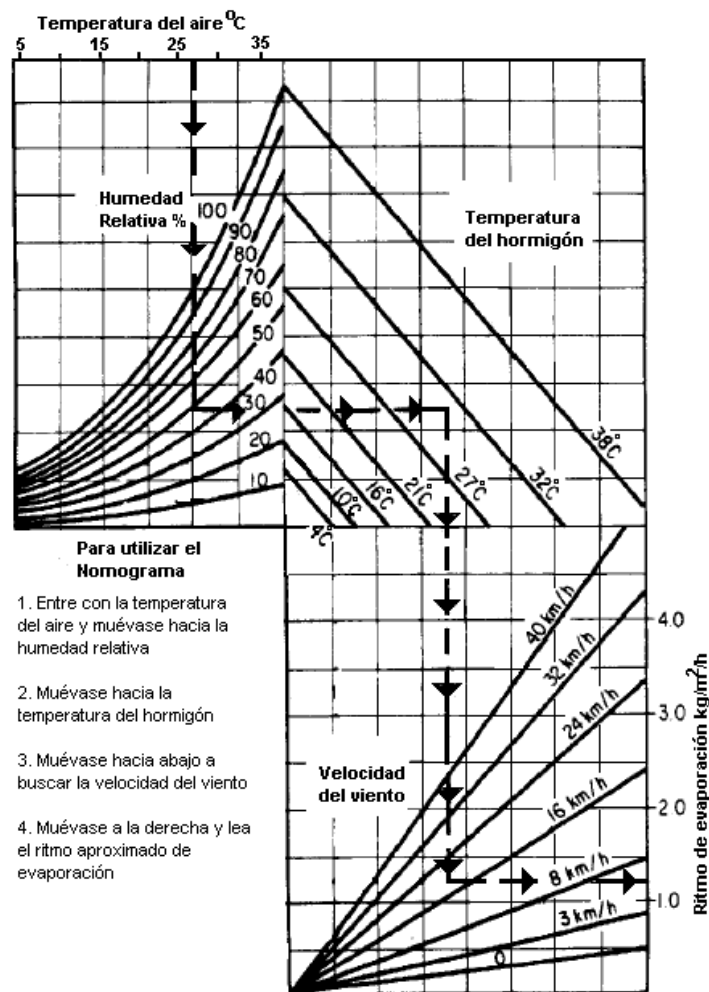


Figura 2.1.5 — Efecto de las temperaturas del hormigón y del aire, de la humedad relativa y de la velocidad del viento sobre el ritmo de evaporación en la superficie del hormigón. Este nomograma aporta un método gráfico para estimar la pérdida de humedad superficial para diversas condiciones del tiempo. Para emplear este nomograma siga los pasos indicados. Si el ritmo de evaporación se aproxima a $1 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ hay que tomar precauciones para evitar la fisuración por retracción plástica. La velocidad del viento es el promedio de la velocidad horizontal del aire en km/h y debe ser medida a un nivel aproximado de 510 mm por encima de la superficie de evaporación. La temperatura del aire y la humedad relativa deben medirse a un nivel aproximado de 1,2 a 1,8 m por encima de la superficie de evaporación en una parte protegida del viento y de los rayos solares (PCA Journal 1957).

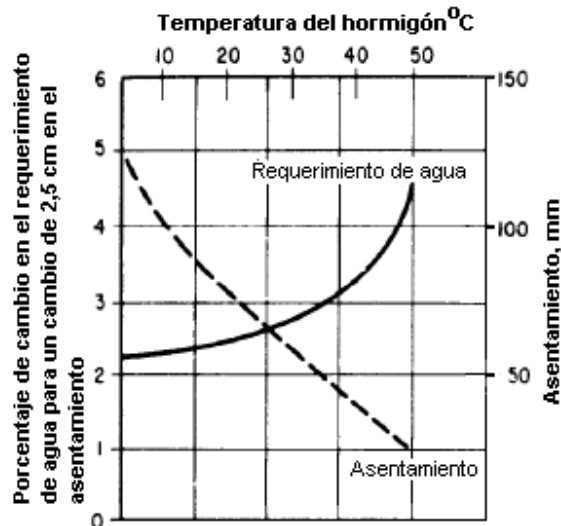


Figura 2.2.1(a) — Efecto de la temperatura del hormigón sobre el asentamiento y sobre el agua requerida para cambiar el asentamiento (datos promedios para cementos tipo I y II) (Klieger 1958)

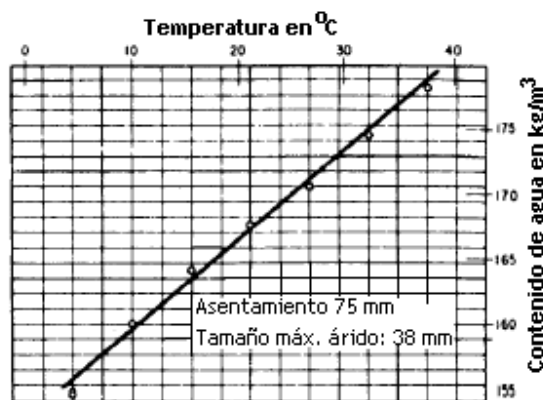


Figura 2.2.1(b)— Efecto del incremento de la temperatura en la demanda de agua del hormigón (U.S. Bureau of Reclamation 1975)

2.3 – Condiciones ambientales

2.3.1 En los tipos más generales de construcción en clima caliente (tal como se define en el apartado 1.2) no resulta práctico recomendar una temperatura ambiente o del hormigón máxima, ya que la humedad y la velocidad del viento pueden ser bajas, permitiendo por tanto una más elevada temperatura ambiente y del hormigón. Una temperatura ambiente o del hormigón que sirva para un caso específico, puede servir o no para otros casos. El Comité sólo puede brindar información sobre los efectos de las altas temperaturas en el hormigón, tal como se menciona en los apartados 1.3 y 2.2.1 y aclara que a cierta temperatura aproximadamente entre 24 y 38 °C está un límite que será el más favorable para obtener los mejores resultados en cada operación en

clima caliente y este límite será determinado para el trabajo concreto. Las prácticas para el hormigonado en clima caliente deben ser discutidas durante la conferencia o reunión de coordinación previa al vertido del hormigón.

En Cuba se ha demostrado que el valor límite para la temperatura del hormigón es de 35 °C

Se efectuarán mezclas de prueba del hormigón para el trabajo a la temperatura límite seleccionada, o a la temperatura esperada en el lugar de trabajo, según los requerimientos de la Norma Cubana NC 221:2002, bastante más que el rango de 20 a 30 °C dado en la norma norteamericana ASTM C 192. Los procedimientos de ensayo de las mezclas a temperaturas más altas de 21 °C son indicados en el apartado 2.9.

2.4 – Requerimientos de agua

2.4.1 El agua como ingrediente del hormigón influye mucho en sus propiedades significativas, tanto en estado fresco como endurecido. Altas temperaturas del agua provocan más elevadas temperaturas en el hormigón y en la medida en que se incrementa la temperatura del hormigón se necesita más agua para obtener el mismo asentamiento. La figura 2.2.1 (b) ilustra el posible efecto de la temperatura del hormigón sobre su demanda de agua. A menos que la cantidad de material cementicio sea incrementada proporcionalmente, el incremento de agua extra incrementa la relación agua/material cementicio y hará decrecer la resistencia, la durabilidad, la impermeabilidad y otras propiedades relativas al hormigón. Esta agua extra debe ser tenida en cuenta en el diseño de la dosificación de la mezcla. Aunque esto es algo esencial para el hormigón colocado en cualquier condición, es especialmente necesario para controlar la utilización del agua adicional en el hormigón colocado bajo condiciones de clima caliente. Ver el apartado 2.3.1.

2.4.2 La figura 2.2.1(a) ilustra los efectos generales del incremento de la temperatura del hormigón sobre su asentamiento cuando la cantidad de agua de mezclado permanece constante. Se indica como un incremento de 11 °C en la temperatura hará decrecer el asentamiento en cerca de 25 mm. La figura 2.2.1(a) también muestra los cambios en la demanda de agua que son necesarios para obtener un incremento de 25 mm de asentamiento a diferentes niveles de temperatura. En un hormigón con 21 °C, para poder incrementar el asentamiento en 25 mm se requiere cerca de un 2,5 % más de agua; En un hormigón con 50 °C, para incrementar el asentamiento en 25 mm se requiere de un 4,5% más de agua. La cantidad original requerida de agua de mezclado para cambiar el asentamiento de la mezcla puede ser menor si se emplean aditivos reductores del agua de mediano o alto rango.

2.4.3 La retracción por secado generalmente se incrementa con el contenido total de agua (Diseño y control de mezclas de prueba por la Portland Cement Association, 1992). La pérdida rápida de asentamiento en clima caliente, frecuentemente incrementa el contenido de agua total y por lo tanto, incrementa el potencial para la retracción por secado. El vertido del hormigón en clima caliente es también susceptible a la retracción por secado mientras se enfría subsecuentemente. La retracción combinada: térmica y por secado puede conducir a una mayor fisuración que la observada para el mismo hormigón colocado en condiciones más moderadas.

2.4.4 Debido a que el agua tienen un calor específico de unas 4 a 5 veces el del cemento o los áridos, la temperatura del agua de mezclado tiene el mayor efecto por unidad de peso en la temperatura del hormigón. La temperatura del agua es más fácil de controlar que la de los otros componentes, aunque el agua se emplea en menor cantidad que los otros ingredientes, el agua enfriada reducirá la temperatura de vertido del hormigón, pero usualmente en no más de 4,5 °C

(figura 2.4.4). La cantidad de agua enfriada no debe exceder de la demanda de agua en la dosificación, que dependerá de las proporciones de la mezcla y del contenido de humedad de los áridos. En general disminuir la temperatura del agua de amasado en 2,0 a 2,2 °C reducirá la temperatura del hormigón aproximadamente en 0,5 °C. Se harán por tanto los esfuerzos necesarios para emplear agua fría. Para mantener el agua fría los tanques, las tuberías o los camiones pipas deben contar con aislamiento térmico, estar pintados de blanco, o ambos. El agua puede ser enfriada hasta una temperatura tan baja como 1 °C empleando equipos refrigeradores, hielo, tecnología de bombeo de calor o nitrógeno líquido. Estos métodos y su efectividad son discutidos posteriormente.

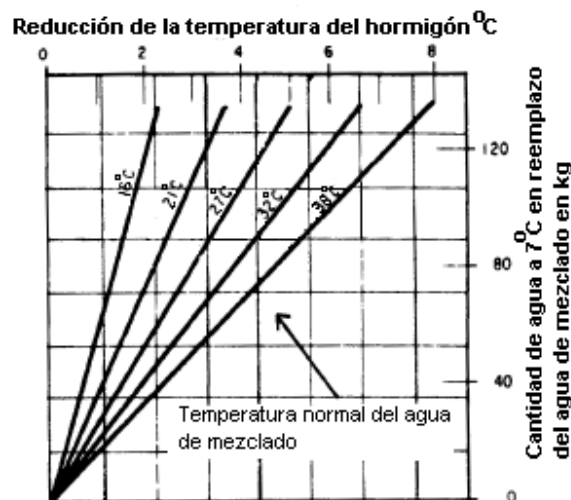


Figura 2.4.4 — Efectos generales del agua de mezclado enfriada sobre la temperatura del hormigón (Natlinal Ready Mixed Concrete Association 1962)

2.4.5 El empleo de hielo como parte del agua de mezclado ha permanecido como el medio de mayor reducción de la temperatura del hormigón. En su fusión el hielo absorbe calor a un ritmo de 335 J/g. Para ser más efectivo el hielo debe ser molido, raspado o desmenuzado cuando se vierta directamente en la mezcladora como parte del agua de amasado. Para lograr la efectividad máxima no debe permitirse que el hielo se funda antes de que sea colocado en la mezcladora en contacto con los otros ingredientes, sin embargo debe estar completamente derretido antes de completarse el mezclado del hormigón. Para un mezclado más rápido de los materiales al comienzo de esta operación no toda el agua de amasado debe ser añadida en forma de hielo, su cantidad puede estar limitada aproximadamente al 75% del agua de amasado requerida. Para maximizar la cantidad de hielo o agua fría a emplear, los áridos deben ser bien drenados o libres de humedad, permitiendo con ello una mayor cantidad de hielo o agua fría para el mezclado. La figura 2.4.5 ilustra las reducciones potenciales de la temperatura del hormigón que pueden lograrse sustituyendo variadas cantidades de hielo a 0 °C por agua de mezclado a las temperaturas mostradas. El mezclado debe continuar hasta que el hielo esté completamente derretido. El hielo triturado debe ser almacenado a una temperatura que evite la formación de grumos por recongelación de las partículas.

2.4.6 La reducción de la temperatura también puede ser estimada empleando la ecuación (A-4) o (A-5) del Anexo A. Para la mayoría de los hormigones la reducción máxima de la temperatura con hielo es aproximadamente de 11 °C. Cuando se requieran mayores reducciones de la temperatura, el medio más práctico puede ser el enfriamiento mediante la inyección de nitrógeno líquido dentro

de la mezcladora que contiene el hormigón mezclado. Ver el Anexo B para cualquier información adicional. El nitrógeno líquido inyectado no afecta los requerimientos del agua de mezclado excepto por la reducción de la temperatura del hormigón.

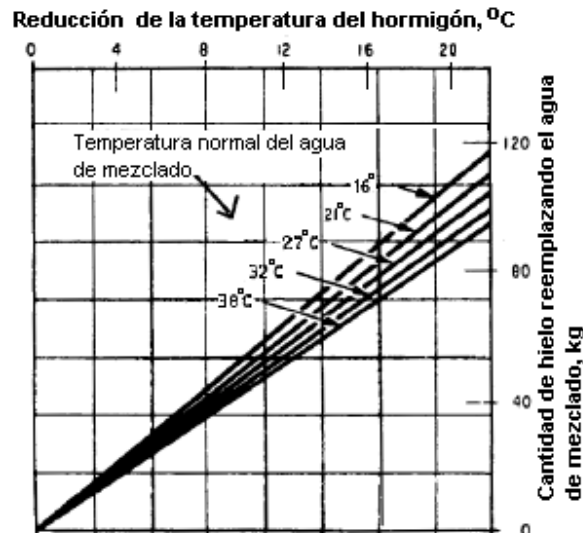


Figura 2.4.5 — Efectos generales en la temperatura del hormigón, del hielo en el agua de mezclado. Las temperaturas indicadas son las normales del agua de mezclado (National Ready Mixed Concrete Association 1962)

2.5 - Efecto del cemento

2.5.1 Las altas temperaturas del hormigón incrementan el ritmo de hidratación (figura 2.5.2) y como resultado de esto el hormigón se rigidiza más rápidamente y requiere de más agua para producir o mantener el asentamiento deseado. El contenido más elevado de agua provocará pérdida de resistencia e incrementará la tendencia a la fisuración del hormigón a menos que se compense mediante las medidas descritas en los apartados 2.6.1 y 2.7.

2.5.2 La selección de un cemento en particular tiene un efecto decisivo en el desempeño del hormigón en clima caliente, tal como se ilustra en la figura 2.5.2. Aunque las curvas están basadas en datos límites de las mezclas, empleando diferentes cementos en combinación con un aditivo retardador del fraguado, ellas muestran por ejemplo que cuando se ensaya a 38 °C, el hormigón con el más lento fraguado alcanza el tiempo de fraguado final 2,5 horas más tarde que el hormigón con el tiempo de fraguado más rápido. El hormigón que fragua más lento a 38 °C fue el del cemento de más rápido fraguado cuando se ensayó a 10°C. La figura 2.5.2 es un buen ejemplo de la dificultad para predecir el desempeño del hormigón a diferentes temperaturas. En general el empleo de un cemento Portland tipo II de fraguado normalmente más lento (ASTM C150) [Norma Cubana NC 95:2001] o un cemento mezclado tipo IP o IS (ASTM C595) [Norma Cubana NC96:2001] puede mejorar las características de manipulación del hormigón en clima caliente (ACI 225R). El hormigón que contiene los cementos de más lento fraguado será más probable que exhiba fisuración por retracción plástica.

2.5.3 Cuando se empleen cementos con más bajo calor de hidratación, los ritmos más lentos de desarrollo de calor y la disipación simultánea de calor del hormigón dan lugar a picos más bajos de

temperatura. Habrá menos expansión térmica y el riesgo de fisuración térmica por enfriamiento del hormigón será reducido. Este es un aspecto importante para las losas, muros y hormigones masivos tal como se discute en el ACI 207.1R y el ACI 207.2R. El incremento de la temperatura a partir de la hidratación del cemento en una mezcla dada de hormigón es proporcional a su contenido de cemento, por lo tanto el contenido de cemento debe ser limitado a lo requerido para obtener resistencia y durabilidad. Las mezclas de hormigón que obtienen alta resistencia a edad temprana desarrollarán altas temperaturas durante su fraguado inicial. Estas mezclas deben contar con protección térmica para asegurar su gradual enfriamiento a un ritmo que no le provoque fisuración. Ver el apartado 4.4.1.

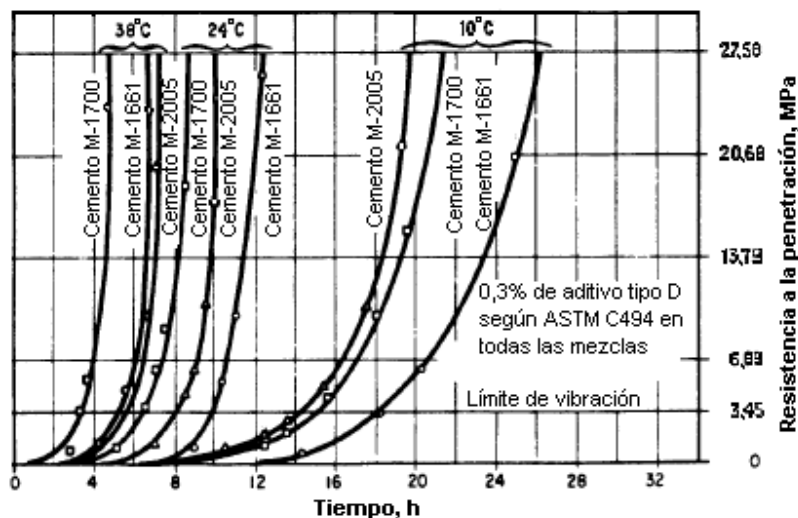


Fig. 2.5.2 – Efecto de la temperatura y de la marca de cemento en el tiempo de fraguado del mortero extraído del hormigón (Tuthill and Cordón 1955)

2.5.4 El cemento puede ser entregado a temperaturas relativamente altas. Esto no es inusual para los cementos fabricados recientemente que no han tenido la oportunidad de enfriarse después de su molienda. Las mezclas de hormigón cuentan con un 10 a un 15% de cemento aproximadamente, el cual elevará la temperatura aproximadamente en 0,5°C para cada 4 °C de incremento de la temperatura del cemento.

2.6 – Materiales cementicios suplementarios

2.6.1 Los materiales en esta categoría incluyen las cenizas volantes y otras puzolanas (ASTM C 618) y las escorias granuladas de altos hornos (ASTM C 989). Cada una de ellas son ampliamente empleadas como reemplazo parcial para el cemento Portland; ellas pueden aportar un ritmo de fraguado más lento y también más lenta ganancia de resistencia a edad temprana, que es deseable en el hormigonado en clima caliente, tal como se explicó en el apartado 2.5.2. Los cementos de fraguado rápido o los cementos que provocan una rápida pérdida de asentamiento en clima caliente pueden desempeñarse satisfactoriamente en combinación con estos materiales (Gaynor y otros 1985). El empleo de cenizas volantes puede reducir el ritmo de pérdida de asentamiento del hormigón en condiciones de clima caliente (Ravina 1984; Gaynor y otros 1985).

2.7 – Los aditivos químicos

2.7.1 Varios tipos de aditivos químicos (ASTM C494) son beneficiosos al neutralizar algunas de las características indeseables del hormigón colocado en períodos de elevada temperatura ambiente (ver también el ACI 212.3R). Los beneficios pueden incluir una más baja demanda de agua, períodos extendidos de utilización y resistencias comparables o más elevadas que el hormigón sin aditivos colocado a temperaturas más bajas. Su efectividad depende de las reacciones químicas del cemento con el cual son utilizados en el hormigón. Los aditivos sin una historia previa de desempeño satisfactorio en las condiciones de clima caliente, deben ser evaluados antes de su utilización, tal como se explica en el apartado 2.7.5. Los aditivos químicos afectan las propiedades del hormigón de la forma en que se describe a continuación.

2.7.2 Los aditivos retardadores que cumplen con los requisitos de la norma ASTM C 494, Tipo D, tienen tanto propiedades reductoras de agua como retardadoras del fraguado y son ampliamente utilizados en condiciones de clima caliente. Ellos pueden ser incluidos en el hormigón en variadas proporciones y en combinación con otros aditivos, de manera que con un incremento de la temperatura, elevadas dosis del aditivo pueden emplearse para obtener un tiempo de fraguado uniforme. Sus propiedades reductoras de agua compensan bien la elevada demanda de agua debido al incremento de la temperatura del hormigón. Como los aditivos reductores de agua y retardadores generalmente incrementan la resistencia del hormigón, pueden ser utilizados con los adecuados ajustes de la mezcla, para evitar las pérdidas de resistencia que por otra vía sería un resultado de las elevadas temperaturas del hormigón (Gaynor y otros 1985; Mittelacher 1985 y 1992). Comparada con el hormigón sin aditivos, una mezcla que emplee aditivo reductor de agua y retardador puede tener un ritmo de pérdida de asentamiento mayor. La reducción neta de agua y otros beneficios permanecen de forma sustancial aun después de que el asentamiento inicial es incrementado para compensar la pérdida de asentamiento.

El fuerte ritmo de pérdida de asentamiento con el tiempo que sufren los hormigones con estos aditivos en clima caliente, hacen que no sea recomendable adicionarlos al hormigón premezclado en la planta preparadora, a menos que se compruebe que el hormigón llegue a la obra con un asentamiento aún medible por el cono (mayor de 1 cm), de manera que sea posible efectuar el acomodo de la mezcla (retempering) con otra dosis del mismo aditivo, con resultados satisfactorios.

2.7.3 *Este apartado fue eliminado pues los aditivos a base de ácidos carboxílicos hidroxilados no se emplean en el país.*

2.7.4 Algunos aditivos reductores de agua de alto rango y retardadores (ASTM C494, Tipo G) y los aditivos plastificantes retardadores (ASTM C1017, Tipo II) frecuentemente referidos como superplastificantes, pueden aportar beneficios significativos en condiciones de clima caliente cuando se emplean para producir hormigones fluidos con elevados asentamientos, pues la ganancia de calor debido a la fricción interna durante el mezclado del hormigón será menor (Ver la ASTM STP 169C y el ACI 207.4R). Las características de manipulación mejorada del hormigón fluido permiten un vertido y una compactación más rápida y por lo tanto se puede reducir el período entre el mezclado y el acabado inicial. El ritmo de pérdida de consistencia del hormigón fluido puede ser también menor a elevadas temperaturas que en el caso del hormigón empleando retardadores convencionales (Yamamoto y Kobayashi 1986). Las resistencias de los hormigones son sustancialmente superiores que las de los hormigones comparables sin aditivos y con el

mismo contenido de cemento. Ciertos productos pueden provocar una exudación significativa, que puede ser beneficiosa en algunos casos, pero que requiere de precauciones en otros.

Puede ser necesario efectuar ensayos de determinación del contenido de aire de la mezcla antes del vertido para asegurar el mantenimiento de este parámetro cuando es exigido. Puede ser necesario también un cierto aseguramiento para que el sistema de vacíos de aire no sea disminuido si se requiere para la resistencia a la congelación y el deshielo del hormigón. Esto puede determinarse mediante el análisis del contenido de aire del hormigón endurecido o por la norma ASTM C666 Ensayo de congelación y deshielo.

Algunos aditivos reductores de agua de alto rango y retardadores pueden mantener el asentamiento necesario por períodos extensos de tiempo a elevadas temperaturas del hormigón (Collepari y otros 1979; Hampton 1981; Guennewig 1988). Esto tendrá particular beneficio en el caso de vertidos demorados a grandes distancias de transporte. Otros aditivos reductores de agua de alto rango pueden acelerar mucho la pérdida de asentamiento, particularmente cuando los asentamientos iniciales de la mezcla son de 75 a 100 mm. Algunos aditivos reductores de agua pueden provocar que el tiempo de laborabilidad del hormigón se extienda por 2 horas o más, seguido de una aceleración de la ganancia de resistencia.

2.7.5 A partir de los años 1990, el uso de los aditivos reductores de agua de mediano rango se ha incrementado en clima caliente. Estos aditivos garantizan hasta un 15% de reducción del agua de amasado, que es superior al de los aditivos reductores de agua convencionales, pero menor que los de alto rango. Aunque hasta el presente no estén contemplados en la clasificación ASTM, estos aditivos reductores de agua de mediano rango cumplen con los requerimientos de la norma ASTM C 494 para el tipo A y en algunos casos para el tipo F. Estos aditivos no demoran el tiempo de fraguado del hormigón de forma significativa. A más elevadas dosis los aditivos reductores de agua convencionales pueden alcanzar estos valores de reducción de agua pero incrementan significativamente el tiempo de fraguado del hormigón. Comparado con el hormigón que tiene un aditivo reductor de agua convencional, el hormigón con aditivo reductor de agua de mediano rango tiene características mejoradas para el bombeo y la terminación. El empleo de los aditivos reductores de agua de mediano rango es particularmente beneficioso en los casos donde las propiedades de los áridos contribuyen a una pobre laborabilidad y un acabado dificultoso. La apariencia superficial del hormigón que contiene aditivo reductor de agua de rango medio puede ser modificada favorablemente lo que implica una reducción en la duración de las operaciones de acabado. También hay disponibles aditivos reductores de agua de mediano rango y retardadores, que cumplen con los requisitos de la norma ASTM C 494 para el tipo D.

2.7.6 El uso de aditivos controladores del fraguado para detener el proceso de hidratación del hormigón fresco (ya sea recién dosificado o retornado a la planta en estado plástico cuando normalmente debía ser colocado en obra), así como del residuo de hormigón en las tamboras de los camiones hormigoneros (del lavado con agua), ha ganado incrementada aceptación en medioambientes calientes a partir de su introducción en 1986.

Algunos aditivos controladores del fraguado cumplen con los requerimientos de la norma ASTM C 494 para el tipo B Retardadores del Fraguado y para el tipo D Reductores de agua y retardadores del fraguado.

Los aditivos controladores del fraguado difieren de los aditivos retardadores convencionales en que ellos paralizan el proceso de hidratación del cemento Portland, tanto de la fase silicato como aluminato. Los aditivos retardadores del fraguado regulares solamente actúan sobre las fases silicato y extienden (no detienen) el proceso de hidratación. La tecnología de los aditivos controladores del fraguado puede también emplearse para detener el proceso de hidratación del hormigón fresco con vistas a una transportación muy prolongada o para métodos de vertido lentos. Para esta aplicación los aditivos controladores del fraguado se añaden durante o inmediatamente

después del proceso de dosificación. La dosis apropiada de los aditivos controladores del fraguado debe determinarse mediante mezclas de prueba que incorporan los requerimientos de tiempo del proyecto y de esta forma poder asegurar que el hormigón alcanzará el tiempo de fraguado requerido. No se requieren aditivos adicionales para restablecer la hidratación.

2.7.7 Los requerimientos de calificación de la norma ASTM C 494 proporcionan un procedimiento riguroso para la selección de los aditivos. Los aditivos sin una historia pertinente de desempeño con el hormigón seleccionado para el trabajo tienen que ser evaluados primero en amasadas de ensayo en el laboratorio a la elevada temperatura de trabajo esperada en obra, utilizando unos de los procedimientos descritos en el apartado 2.9. Algunos de los aditivos reductores de agua de alto rango y retardadores puede ser que no demuestren sus beneficios potenciales cuando se emplean en pequeñas amasadas de laboratorio, por lo que puede entonces requerirse la preparación de amasadas a escala productiva. Durante el uso preliminar de campo, el hormigón con aditivos debe ser evaluado por la consistencia de su desempeño de acuerdo con las características deseadas en la construcción en clima caliente.

Cuando se evalúan aditivos deben ser consideradas, además de las propiedades básicas de la mezcla de retención del asentamiento, el tiempo de fraguado y la resistencia, otras propiedades como la laborabilidad, la bombeabilidad, el desarrollo de resistencias a edades tempranas, las características del vertido y del acabado del hormigón, la apariencia y el efecto en la reutilización de los encofrados. Estas características pueden influir en la selección de un aditivo y sus dosis, más que las propiedades que usualmente cubren la mayoría de las especificaciones.

2.8 – Los áridos

2.8.1 Los áridos son el mayor componente del hormigón, pues constituyen entre el 60 y el 80% del volumen del hormigón de densidad normal que se emplea en la mayoría de las estructuras, por lo tanto las propiedades de los áridos afectan significativamente la calidad del hormigón. El tamaño, forma y gradación del árido son tres de los principales factores que afectan la cantidad de agua requerida para producir hormigón de un asentamiento dado. Las propiedades de los áridos que son deseables en el hormigonado en clima caliente son las siguientes:

- La Graduación, forma de las partículas y la ausencia de material de tamaño inferior son muy importantes para minimizar la demanda de agua (ACI 221R). El árido grueso triturado también contribuye a una mayor demanda de agua, pero se reporta que garantiza mejor resistencia a la fisuración que el redondeado (ACI 224R). La mezcla de 3 o más tamaños de áridos puede reducir los requisitos de agua de amasado y mejorar la laborabilidad para un asentamiento dado (Shilstone and Shilstone Jr. 1993)

2.8.2 Si el árido grueso es el ingrediente de mayor masa en el hormigón, los cambios de su temperatura tienen un efecto considerable sobre la temperatura del hormigón. Por ejemplo una reducción de temperatura moderada de 0,8 a 1,1 °C reducirá la temperatura del hormigón en 0,5 °C. El enfriamiento del árido grueso puede ser un medio suplementario efectivo para alcanzar la deseada temperatura más baja en el hormigón (ver el Anexo B).

2.9 – Diseño de la mezcla

2.9.1 Las proporciones de la mezcla pueden ser establecidas o ajustadas sobre la base de las pruebas de campo, de acuerdo con [la Norma Cubana NC 120:2004,] el ACI 318/318R (ACI 318/318M) partiendo de que estas pruebas indiquen el efecto de las temperaturas esperadas y de los tiempos de entrega.

2.9.2 La selección de los ingredientes y de sus proporciones debe estar guiada por su contribución a un desempeño satisfactorio del hormigón en condiciones de clima caliente (ACI 211.1 y 211.2) El

contenido de cemento debe ser mantenido tan bajo como sea posible pero suficiente para garantizar los requerimientos de resistencia y durabilidad. La inclusión de materiales cementicios suplementarios, como las cenizas volantes o las escorias granuladas de altos hornos debe ser considerada con el objetivo de demorar el fraguado y mitigar el crecimiento de la temperatura debido al calor de hidratación. El empleo de varios tipos de aditivos reductores de agua puede contrarrestar el incremento de la demanda de agua y la pérdida de resistencia, que de otro modo serían causadas por las temperaturas más elevadas del hormigón. Deben ser considerados los aditivos reductores de agua de alto rango y retardadores que son formulados para garantizar la retención prolongada del asentamiento, si se prevén períodos de entrega más largos. A menos que se requiera otra cosa, el hormigón debe ser diseñado para un asentamiento no menor de 100 mm para permitir un rápido vertido y una compactación efectiva en el encofrado.

Se ha sustituido el valor recomendado de 75 mm por 100 mm por considerarse mucho más apropiado a las condiciones de Cuba.

2.9.3 El desempeño de las mezclas de hormigón que son propuestas para el trabajo debe ser verificado bajo condiciones que se aproximen a las de su entrega y al medioambiente caliente esperado en el proyecto.

Las mezcla de prueba empleadas para seleccionar las proporciones son normalmente preparadas de acuerdo con la Norma Cubana NC 221:2002. El método requiere que los materiales del hormigón estén a temperatura ambiente (del local de trabajo), en el rango de 20 a 30 °C. Las mezclas de prueba sin embargo deben también ser ejecutadas a la temperatura máxima esperada en el vertido, teniendo en consideración el empleo de un período de mezclado y agitación más prolongado que el requerido por la Norma Cubana NC 221:2002 para ayudar a definir el desempeño esperado.

2.9.4 En la determinación del desempeño de las mezclas de prueba en condiciones de laboratorio se seguirá el procedimiento establecido en la Norma Cubana NC 320:2003 "Hormigón fresco. Determinación de la variación de la consistencia con el tiempo y la eficiencia del acomodo (retempering) de la consistencia".

Se ha modificado el contenido original del apartado 2.9.4 por considerar que no corresponde con las condiciones de Cuba

2.9.5 Como método alternativo se puede considerar para verificar las proporciones de la mezcla, la producción de amasadas en pruebas de campo, ya que los niveles esperados de altas temperaturas en esta caso van a estar siempre presentes. Esta vía puede ser la preferida cuando se empleen aditivos capaces de extender el asentamiento. En este caso requiere de mucho cuidado registrar las cantidades reales de las amasadas en plantas y el total de agua o aditiva que se añade para ajustar el asentamiento antes de muestrear. Deben observarse estrictamente los procedimientos de muestreo establecidos en la Norma Cubana NC 167:2002.

CAPÍTULO 3 — PRODUCCIÓN Y ENTREGA

3.1 – Generalidades

Los procedimientos y las facilidades de producción deben ser capaces de asegurar la calidad requerida del hormigón bajo condiciones de clima cálido a los ritmos de producción requeridos por el proyecto. Debe asegurarse un satisfactorio control de la producción y de las operaciones de entrega. La planta de hormigón y las unidades de entrega deben estar en buenas condiciones de operación. La interrupción intermitente de las entregas debido a roturas de equipos puede ser mucho más serias en clima caliente que en clima moderado. En las operaciones de hormigonado en clima caliente el vertido del hormigón puede ser planificado en momentos que no sean por el día, tales como la parte más fresca de la mañana. La producción en el horario nocturno requiere de una excelente planificación y de una buena iluminación en el lugar de trabajo.

3.2 – Control de la temperatura del hormigón

3.2.1 El hormigón puede ser producido en clima caliente y se comportará satisfactoriamente si se observan las precauciones adecuadas con la dosificación, producción, entrega, vertido y curado. Como parte de estas precauciones debe hacerse un esfuerzo para mantener la temperatura del hormigón tan baja como sea posible. Empleando las fórmulas dadas en el Anexo A se puede lograr por ejemplo que la temperatura del hormigón de usuales proporciones puede ser reducida en 0,5 °C si cualquiera de las siguientes reducciones es lograda en la temperatura de los materiales:

- Reducción de 4 °C en la temperatura del cemento;
- Reducción de 2 °C en la temperatura del agua; o
- Reducción de 1 °C en la temperatura de los áridos.

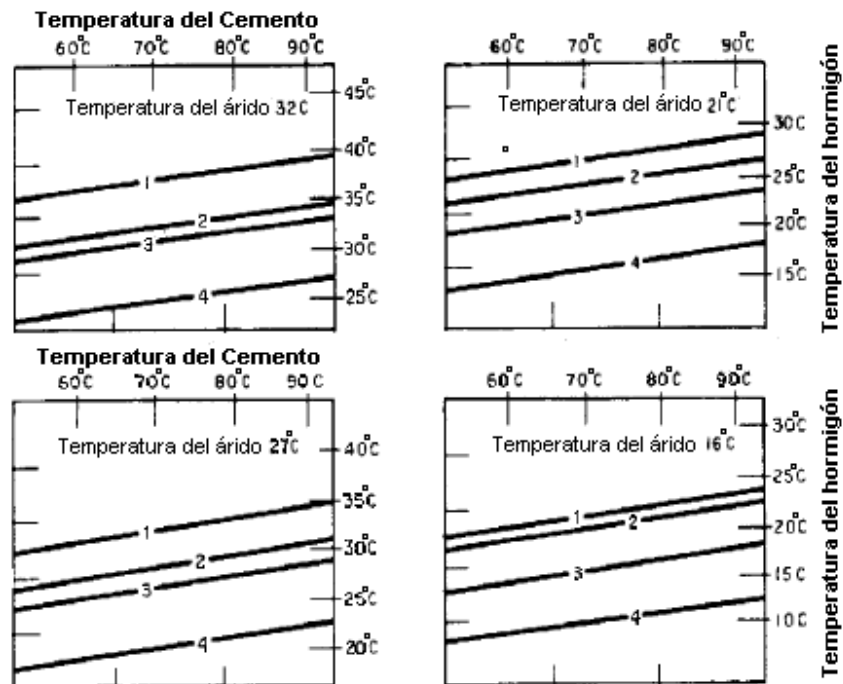
3.2.2 La figura 3.2.2 muestra la influencia de la temperatura de los ingredientes del hormigón en la propia temperatura del hormigón. Como la porción mayor en el hormigón la ocupa el árido, la reducción de la temperatura del árido aportará la mayor reducción en la temperatura del hormigón, por lo que deben emplearse todos los medios prácticos para mantener los áridos tan fríos como sea posible. Será de gran ayuda el almacenaje a la sombra de los áridos finos y gruesos y el rociado de los áridos gruesos en las pilas especialmente en condiciones ambientales de aridez. El rociado de los áridos gruesos con agua fría puede reducir la temperatura del árido por evaporación y enfriamiento directo (Lee 1987).

Pasar el agua a través de una torre de enfriamiento adecuadamente dimensionada, enfriará el agua por evaporación a la temperatura del bulbo húmedo. Este procedimiento tendrá mayor efecto en las áreas donde haya baja humedad relativa. El humedecimiento de los áridos sin embargo tienen a causar variaciones en la humedad superficial y por lo tanto complica el control del asentamiento. Los tanques de almacenaje del agua de amasado que se encuentran por encima del terreno deben estar provistos con aislamiento térmico y estar a la sombra. Los silos y tolvas absorberán menos calor si están recubiertos con pinturas que reflejen el calor. Las mezcladoras pintadas de blanco minimizan la ganancia de calor solar, lo que también será de cierta ayuda.

Partiendo de 1 hora de tiempo de entrega en un día caliente y soleado, el hormigón en una mezcladora blanca, de tambor y limpia será de 1 a 1,5 °C más frío, que en una mezcladora negra o roja de tambor, y será 0,3 °C más fría que en una mezcladora de tambor de color crema.

Si el tambor vacío de una mezcladora permanece bajo el sol por un largo período antes de que el hormigón sea amasado, el calor almacenado en la tambora de metal producirá una temperatura del hormigón de 0,3 a 0,5 °C más baja en el caso de una tambora de color blanco que para una amarilla o roja.

Ha sido sugerido como un medio para minimizar la temperatura del hormigón, rociar con agua el exterior de la tambora de la mezcladora, antes de recibir la amasada de hormigón o durante su entrega, pero puede esperarse que sea sólo un beneficio marginal.



- Curva (1) – Agua de mezclado a la temperatura del árido
 Curva (2) – Agua de mezclado a 10°C
 Curva (3) – Agua de mezclado a la temperatura del árido; un 25% del agua de mezclado es reemplazada por hielo
 Curva (4) – Agua de mezclado a la temperatura del árido; un 50% del agua de mezclado es reemplazada por hielo

Figura 3.2.2 — Influencia de la temperatura de los ingredientes del hormigón sobre la temperatura del hormigón. Calculada de las ecuaciones del Anexo A

3.2.3 Establecer los medios para enfriar cantidades medibles de producción de hormigones, requiere de planificar bien por adelantado el lugar y la instalación para el enfriamiento especializado. Esto puede incluir el enfriamiento del agua de amasado mediante enfriadores de agua o tecnología de bombeo de calor, así como otros métodos tales como la sustitución de parte del agua de amasado del hormigón por hielo triturado o en hojuelas, o el enfriamiento mediante nitrógeno líquido. Debe asegurarse en estos casos la entrega de la cantidad requerida de materiales enfriamiento.

En el Anexo A se dan detalles para la estimación de las temperaturas de los hormigones. En el Anexo B se describen varios métodos de enfriamiento. La influencia general de la temperatura de los ingredientes del hormigón se calcula a partir de las ecuaciones dadas en el Anexo A y se muestran gráficamente en la figura 3.2.2.

3.3 Dosificación y mezclado

3.3.1 En la Norma Cubana NC 412 se describe el proceso de dosificación y el mezclado del hormigón. Los procedimientos para las condiciones en clima caliente no son diferentes de las buenas prácticas bajo condiciones de clima normal. Es esencial la producción de hormigón con el correcto asentamiento y otras propiedades especificadas, según las especificaciones aplicables. Una interrupción en el vertido del hormigón debido a rechazos, puede provocar la formación de una junta fría o serios problemas de acabado. El ensayo del hormigón debe ser diligente y confiable de forma tal que los resultados representen la condición verdadera del hormigón.

3.3.2 Para el hormigón mezclado en camión, un mezclado inicial de no menos de 70 revoluciones de la tambora en la planta, antes de comenzar el transporte, permitirá una verificación aproximada de la situación del hormigón, en primer lugar su asentamiento y su contenido de aire. Generalmente el hormigón mezclado en planta puede ser inspeccionado visualmente en la medida en que es descargado a las unidades de transporte. El asentamiento puede cambiar fácilmente debido a los menores cambios que se produzcan en los materiales y en las características del hormigón. Por ejemplo un cambio no detectado de sólo un 1,0% de contenido de humedad en los áridos finos y gruesos, puede cambiar el asentamiento en 25 a 50 mm (ACI 211.1). Un error de rango de aproximadamente 0,5% en la determinación de la humedad de los áridos, complica el control de la humedad, aun disponiendo de sistemas avanzados.

El párrafo a continuación fue eliminado por considerarse que aunque es técnicamente posible es una práctica inadecuada que puede provocar serias indisciplinas tecnológicas

3.3.3 Las condiciones del clima caliente y el tiempo prolongado de transporte pueden indicar la necesidad de dividir el proceso de dosificación, dosificando el cemento en el lugar de trabajo si existen las condiciones para ello. Este método puede en ocasiones ofrecer la mejor solución bajo las condiciones existentes.

Se eliminó la opción del vertido de los componentes del hormigón por capas dentro de la tambora del camión hormigonera, proceso que no resulta práctico ni confiable

El mejor hormigón y el más controlado puede asegurarse cuando todos los materiales son dosificados en la planta de producción. Utilizando algunos aditivos retardadores de fraguado efectivos a dosis apropiadas, preferiblemente en combinación con materiales cementicios suplementarios con características de lento fraguado, el hormigón se puede mantener en condición colocable, en períodos extensos de tiempo, aun en clima caliente (Ver el apartado 2.7). Las experiencias de campo indican que el retardo del fraguado del hormigón puede ser extendido dosificando separadamente el aditivo retardador con una pequeña porción del agua de amasado (de 5 a 10 L/m³), después de que el hormigón haya sido mezclado durante varios minutos. Estos aditivos, junto con los materiales cementicios suplementarios y otros ingredientes propuestos por el proyecto, deben ser evaluados en condiciones de campo para verificar las propiedades deseadas. En caso de que el asentamiento fuera más bajo que el requerido, se recomienda el empleo de un aditivo reductor de agua de mediano o alto rango para incrementar su asentamiento.

3.3.4 Bajo las condiciones de clima caliente, la cantidad de mezclado a la velocidad correspondiente en la mezcladora, debe mantenerse en el valor mínimo para evitar la ganancia innecesaria de calor en el hormigón (ACI 207.4R). Para lograr un eficiente mezclado, las

mezcladoras deben estar libres de restos de hormigón endurecido y de exceso de desgaste en las paletas. Tan pronto como el hormigón haya sido mezclado y alcanzado una condición homogénea, toda rotación posterior de la tambora debe ser a la velocidad más baja de agitación (1 a 2 revoluciones por minuto). La tambora no puede ser detenida por períodos prolongados de tiempo, pues esto puede potencialmente provocar que los problemas de falso fraguado del cemento, causen una rápida rigidización y fraguado del hormigón en la tambora, o provocar averías por aplastamiento de los rodillos de la mezcladora.

3.3.5 Las especificaciones establecen que el número total de revoluciones de la tambora se limita usualmente a un máximo de 300 revoluciones para los camiones hormigoneras. Este límite debe ser modificado para condiciones que requieran un mezclado cuidadoso posterior del hormigón como por ejemplo:

- La adición por separado de aditivos reductores de agua de mediano o alto rango
- La adición directa de nitrógeno líquido inyectado dentro de la mezcladora como vía para disminuir la temperatura del hormigón
- Si el hormigón retiene su laborabilidad sin la adición de agua o aditivos

3.4 – Entrega

La hidratación del cemento, el incremento de la temperatura, la pérdida de asentamiento, la molturación de los áridos e incluso la pérdida u ocasionalmente la ganancia de contenido de aire en la mezcla, son fenómenos que ocurren en el tiempo en que el hormigón permanece en la mezcladora, por lo que el período de tiempo entre el comienzo del mezclado y el comienzo del vertido del hormigón debe ser minimizado. La coordinación del despacho de los camiones hormigoneras con el ritmo de vertido del hormigón, evita las demoras en la llegada o los períodos de espera de los camiones hasta el momento de la descarga. En los más grandes vertidos de hormigón hay que tener en cuenta el mantener buenas comunicaciones entre el lugar de trabajo y la planta productora de hormigón. Los vertidos más grandes deben ser planificados en horarios de poco tráfico urbano de cargas. Cuando el vertido es lento, hay que tener en cuenta el reducir la magnitud de cada carga, emplear aditivos retardadores o emplear hormigón enfriado.

3.5 – Ajuste del asentamiento

El hormigón fresco está sujeto a pérdidas de asentamiento con el tiempo, ya sea si se emplea en clima caliente o moderado. Es necesario que sean establecidas las características de cambio del asentamiento de la mezcla entre la planta y el lugar de trabajo, con los materiales dados y las proporciones concretas de la mezcla.

Con el procedimiento establecido en la Norma Cubana NC 320:2003 es posible establecer el ritmo de pérdida de asentamiento de la mezcla con el tiempo, así como determinar el incremento en el consumo de cemento requerido en la mezcla y la cantidad exacta de agua a añadir en la obra al efectuar el retempering con agua para que no se afecte la relación agua/cemento de la mezcla y con ello las propiedades del hormigón, o sea sus resistencias mecánicas y su durabilidad. Siempre es aconsejable efectuar el retempering con aditivos químicos, ya sea con una dosis inferior a la adicionada en la planta del mismo producto, o si se ha empleado un aditivo alto reductor del agua de amasado y retardador del fraguado, se puede emplear en la obra, en caso necesario un aditivo reductor del agua de amasado que sea compatible con el anterior. La dosis de aditivos a emplear para el retempering y la compatibilidad entre los aditivos empleados se establecerá mediante ensayos previos.

Cuando se adiciona agua o aditivo para llevar el asentamiento de la mezcla a los valores límites requeridos, la tambora o las paletas de la mezcladora deben ser accionados no menos de 30 revoluciones o más a velocidad de mezclado. Para garantizar un vertido rápido y una compactación efectiva, el hormigón estructural debe tener un asentamiento mínimo de 100 mm. Se permitirán incrementos en el asentamiento de la mezcla cuando se emplean aditivos químicos, ya que estos permiten que el hormigón tenga la misma o más baja relación agua/cemento o agua/material cementicio y no exhiba segregación potencial. En este caso el valor recomendable del asentamiento en clima caliente es no menor de 160 mm.

3.6 – Propiedades de las mezclas de hormigón

Las mezclas propuestas deben ser adecuadas para las condiciones esperadas del trabajo. Esto es particularmente importante, cuando no hay límites establecidos en las temperaturas de vertido, como es el caso de la mayoría de las construcciones en las regiones más cálidas. El empleo de cementos que se desempeñen bien en las condiciones del clima caliente, en combinación con aditivos reductores de agua y retardadores, puede asegurar el hormigón con las propiedades requeridas (Mittelacher 1985). Cuando se empleen aditivos reductores de agua de alto rango y retardadores, se seleccionarán los productos que aseguren una retención prolongada del asentamiento en clima caliente (Collepari y otros 1979; Guennewig 1988). En condiciones de clima seco y con vientos, el ritmo de fraguado del hormigón empleado en losas debe ser ajustado para minimizar la fisuración por retracción plástica o la formación de costra en la superficie con la capa inferior aún en condición plástica. El tipo de ajuste a efectuar depende de las condiciones climáticas locales, del tiempo de vertido y de las temperaturas del hormigón. Un cambio en la dosificación del aditivo o en la formulación puede garantizar con frecuencia el tiempo de fraguado deseado.

3.7 – Retempering

El retempering se define en el ACI 116R como “La adición de agua y el remezclado del hormigón o el mortero que ha perdido suficiente laborabilidad que lo hace no colocable o no vendible”

*Esta definición del ACI 116R es inadecuada al solo prever la adición de agua para efectuar el retempering, una definición más adecuada para el hormigón sería la siguiente:
“procedimiento que ejecuta el productor y que tiene como objetivo contrarrestar la pérdida de asentamiento experimentado por el hormigón desde su salida de la planta hasta su llegada a la obra, de manera que pueda ser entregada a esta en condiciones adecuadas para su colocación sin perjuicio algunos para las propiedades que le sean exigidas”. Bajo este concepto el retempering es una actividad posible siempre que sea controlada.*

Las investigaciones de laboratorio, así como la experiencia de campo muestran que la reducción de la resistencia, así como otros efectos negativos son proporcionales a la cantidad de agua añadida para un retempering no controlado, por lo tanto la adición de agua en exceso del contenido máximo de agua proporcionado por la relación agua/material cementicio, para compensar la pérdida de laborabilidad, debe ser prohibida. La adición de aditivos químicos, particularmente los reductores de agua de alto rango, puede ser muy efectiva para mantener la laborabilidad.

CAPÍTULO 4 — VERTIDO Y CURADO

4.1 – Generalidades

4.1.1 Los requerimientos para la obtención de buenos resultados en el vertido y el curado del hormigón en clima caliente no difieren de los establecidos para las otras estaciones. Las mismas necesidades se mantienen:

- El hormigón tiene que ser manipulado y transportado con una segregación mínima y una pérdida mínima de asentamiento;
- El hormigón será colocado donde vaya a permanecer;
- El hormigón será colocado en capas lo suficientemente delgadas para asegurar una buena vibración en la capa inferior y que el tiempo transcurrido entre capas sea mínimo para evitar la formación de juntas frías;
- Las juntas de construcción indicadas en el ACI 224.3R serán hechas sobre un hormigón limpio y de buena calidad;
- Las operaciones de acabado y su tiempo serán guiadas solamente porque el hormigón se encuentre listo para ellas y por ninguna otra cosa; y
- El curado será conducido de manera que en ningún momento durante el período prescrito el hormigón carezca de abundante humedad y de control del tiempo para permitir un completo desarrollo de sus resistencia potencial y durabilidad

4.1.2 En los ACI 308R y 309R y en Norma Cubana NC 412:2005 hay detalles de los procesos de vertido, compactación y curado del hormigón. Es el propósito de este capítulo puntualizar los factores peculiares para el clima caliente que puedan afectar estas operaciones y el hormigón resultante y recomendar que es lo que se debe hacer para prever o eliminar su influencia.

4.2 – Preparación para el vertido y el curado

4.2.1 *Planificación para el vertido en clima caliente* – Antes de comenzar el proyecto debe hacerse un plan que permita minimizar la exposición del hormigón a condiciones adversas. Siempre que sea posible el vertido de las losas debe ser organizado después que la estructura del techo y de las paredes estén ejecutadas, con el objetivo de minimizar los problemas asociados con el secado por el viento y la acción solar directa. Esto reducirá también el choque térmico de las caídas rápidas de temperatura provocadas por las diferencias de temperatura entre el día y la noche o por la lluvia fría sobre el hormigón calentado por el sol más temprano durante el día.

Bajo condiciones de clima caliente, la organización del vertido del hormigón en horas diferentes de las normales puede ser aconsejable. Las consideraciones pertinentes incluyen la facilidad de manipulación y colocación, así como la evitación del riesgo de fisuración por retracción plástica y de fisuración térmica.

4.2.2 *Preparación para las condiciones ambientales* - El personal a cargo de la construcción con hormigón debe tener cuidado anticipadamente de la combinación dañina de una elevada temperatura del aire, la radiación solar directa, el secado de los vientos y una elevada temperatura del hormigón. Hay que ejecutar localmente el monitoreo de los reportes locales del clima y registrar de forma rutinaria las condiciones del lugar, incluyendo la temperatura del aire, la exposición al sol, la humedad relativa y los vientos predominantes. Estos datos, junto con la temperatura proyectada o real del hormigón, le permiten al personal supervisor, a través de la referencia a la figura 2.1.5, determinar y preparar las medidas de protección requeridas. Debe estar también disponible en el lugar en equipamiento necesario para medir el ritmo de evaporación, de acuerdo con el apartado 5.1.3.

4.2.3 El vertido expedito – Hay que hacer los preparativos necesarios para transportar, verter, compactar y dar la terminación al hormigón al ritmo más rápido posible. La entrega del hormigón en el lugar debe ser planificada de manera que sea colocado inmediatamente a su llegada, particularmente la primera amasada. Muchos vertidos de hormigón tienen un mal comienzo debido a que el hormigón fue ordenado antes de que el trabajo estuviese listo para el vertido y el control del asentamiento se perdió en el momento más crítico.

La organización del tráfico en el lugar debe asegurar un acceso fácil de las unidades de entrega a los puntos de descarga sobre vías estables. El tráfico en el lugar debe estar coordinado para un viaje rápido de ida y retorno de los camiones hormigoneras. Si es posible los vertidos grandes y críticos deben ser organizados en períodos de bajas cargas de tráfico urbano.

4.2.4 Equipo de vertido – El equipo para el vertido del hormigón tendrá un adecuado diseño y debe tener amplia capacidad para desempeñar sus funciones con eficiencia. Todos los equipos deben tener la potencia adecuada para el trabajo y estar en condiciones óptimas de operación. Los recesos o demoras que paralicen o hagan lento el vertido pueden afectar seriamente la calidad y apariencia del trabajo. Deben hacerse arreglos para disponer de equipos de apoyo o reserva. Si se emplean bombas de hormigón, éstas deben ser capaces de bombear el tipo de hormigón especificado a través de toda la longitud de la línea e incluso de elevaciones, a los ritmos por hora que sean requeridos. Si el vertido se efectúa con grúa y cubetas, se deben emplear cubetas con boca de salida ancha y paredes inclinadas para permitir una rápida y completa descarga de su contenido. Debe disponerse de medios adecuados de comunicación entre los que manipulan las cubetas y la cuadrilla de vertido para asegurar que el hormigón es cargado dentro de la cubeta solamente si está lista la cuadrilla, sin demoras. No se debe permitir que el hormigón permanezca expuesto al sol y a altas temperaturas antes de verterlo en el encofrado. Para minimizar la ganancia de calor del hormigón durante el vertido, las unidades de entrega, las cintas transportadoras, bombas y líneas de bombeo deben permanecer a la sombra, si es posible. Además las líneas de bombeo deben ser pintadas de blanco. Las líneas pueden también ser enfriadas cubriéndolas con paños mojados con una manguera u otros medios similares.

4.2.5 Equipo de compactación – Deberá contarse con suficientes equipos de vibración y potencia para compactar el hormigón inmediatamente que sea recibido en el encofrado. Los procedimientos y equipos son descritos en el ACI 309R. Debe preverse un número amplio de vibradores de reserva. Como mínimo un vibrador de reserva por cada 3 vibradores en uso. En el lugar deben estar disponibles generadores portátiles para garantizar la operación ininterrumpida de los vibradores en caso de falta o falla de potencia. Aparte del deficiente aspecto de un hormigón pobremente compactado, esto puede afectar seriamente la durabilidad y el desempeño estructural del hormigón armado.

4.2.6 Preparación para la protección y curado del hormigón – En el proyecto debe existir agua suficiente para humedecer el sustrato y los encofrados, así como el acero de refuerzo antes del vertido del hormigón, también para el curado húmedo si es aplicable. Los rociadores o nebulizadores empleados deben producir un manto de niebla. No deben ser confundidos con los rociadores ordinarios de jardín que generan un spray de lavado excesivo. Los lavadores de presión, con una adecuada nariz acoplada, pueden ser medios prácticos para lograr una nebulización adecuada en pequeños trabajos. Deben estar a mano los materiales y medios necesarios para poder levantar pantallas temporales tanto de sombra como rompevientos que permitan proteger al hormigón contra el secado de los vientos y la acción directa del sol. Debe haber disponibles también láminas plásticas o compuestos curadores formadores de membranas que se emplean con spray, para la aplicación de películas temporales que retengan la humedad para reducir la evaporación del agua en las losas entre las etapas o pases del acabado. Si el

hormigón colocado bajo las condiciones del clima caliente es expuesto a caídas rápidas de temperatura, debe garantizarse la protección térmica para evitar la fisuración del hormigón por retracción térmica. Finalmente deben estar disponibles los materiales para el curado en el lugar del proyecto con vistas a permitir la rápida protección de todas las superficies expuestas contra el secado prematuro una vez que se haya completado el vertido.

4.2.7 Preparación de los trabajos incidentales – Debido a que el fraguado y el endurecimiento del hormigón son más rápidos en clima caliente, el momento justo para efectuar varias operaciones finales como por ejemplo el aserrado de juntas y la aplicación de retardadores superficiales, se torna más crítico, por lo tanto estas operaciones deben ser planificadas con antelación. Deben hacerse planes para el aserrado oportuno de las juntas de contracción en las losas, con vistas a minimizar la fisuración debido a tensiones excesivas. Típicamente las juntas que son cortadas empleando el proceso convencional húmedo o seco, se hacen entre las 4 y las 12 horas después de que la losa ha sido terminada; 4 horas en clima caliente y 12 horas en clima frío. Para efectuar el corte por aserrado seco temprano, el período de espera variará típicamente de 1 hora en clima caliente a 4 horas en clima frío (ACI 302.1R).

4.3 – Vertido y acabado

4.3.1 Generalidades – La aceleración del vertido y del acabado reduce materialmente las dificultades del clima caliente. Las demoras incrementan la pérdida de asentamiento y provocan la adición de agua para detenerla. Cada operación de acabado debe ser ejecutada rápidamente cuando el hormigón esté listo para ello. El hormigón no debe ser colocado más rápido de lo que pueda ser adecuadamente compactado y acabado. Si el ritmo de vertido no está correctamente coordinado con la fuerza de trabajo y el equipamiento disponible, la calidad del trabajo puede ser dañada por la aparición de juntas frías, una pobre compactación y una terminación áspera de la superficie.

4.3.2 Hormigón colocado por capas – En clima caliente es usualmente necesario colocar el hormigón en capas más finas que las empleadas en climas moderados, con el fin de asegurar el cubrimiento de la capa inferior mientras ella pueda aún responder a la vibración. El intervalo entre el vertido en una pared monolítica y el piso se torna muy corto en clima caliente. Este intervalo puede ser extendido mediante el empleo juicioso de aditivos retardadores del fraguado.

4.3.3 Vertido en losas – Al depositar el hormigón en losas sobre el terreno, el sustrato debe ser humedecido y estar libre de agua acumulada y de sitios blandos. Al verter el hormigón en losas de cualquier tipo puede ser necesario en clima caliente mantener la operación confinada a una pequeña área y proceder en un frente que tenga una cantidad mínima de área superficial expuesta al aire. Para enfriar el aire, los encofrados y el acero, así como para evitar la evaporación rápida de la superficie del hormigón antes y después de cada operación de acabado, debe emplearse un nebulizador inmediatamente delante.

Debe evitarse la aplicación excesiva de nebulización (que pueda lavar la superficie del hormigón o provocar exceso de agua que se pegue al refuerzo o permanezca sobre la superficie en el momento de enrase y froteado) debe evitarse. Otros medios para reducir la pérdida de humedad son la aplicación y remoción de un compuesto curador formador de membrana, capaz de retener la humedad (monomolecular) entre las diferentes operaciones de acabado. El acabado de la losa comenzará después de que el brillo de la superficie de la membrana (monomolecular) haya desaparecido. Estos productos no deben utilizarse como una ayuda para la terminación o el trabajo de la superficie, pues afectan la durabilidad del hormigón. Debe contactarse al fabricante del producto para tener información sobre la adecuada aplicación y dosis a emplear. Estos procedimientos pueden provocar un ligero incremento de la temperatura del hormigón en el lugar

debido al reducido enfriamiento por evaporación. Generalmente el beneficio de una evaporación reducida es más importante que el incremento de la temperatura del hormigón colocado (Berhane 1984).

4.3.4 Fisuras por retracción plástica – Sin protección contra la pérdida de humedad pueden ocurrir las fisuras por retracción plástica, tal como se describe en el apartado 2.1.5. En vertidos relativamente masivos, la revibración, aplicada antes de frotar en ocasiones puede cerrar este tipo de fisuras, siempre antes de que el hormigón alcance su tiempo de fraguado final. Las fisuras pueden ser cerradas con frecuencia apretando la superficie a cada lado de la fisura con una frota. El área afectada es entonces frotada de nuevo hasta lograr el nivel de acabado.

No resulta correcto frotar sobre las grietas un slurry, porque éstas reaparecerán si no están firmemente cerradas e inmediatamente cubiertas para evitar la evaporación.

4.4 – Curado y protección

4.4.1 Generalidades – después de concluir las operaciones de vertido y de acabado, deben continuar los esfuerzos para proteger el hormigón de las altas temperaturas, la acción solar directa, la baja humedad y el secado de los vientos. Si es posible el trabajo debe mantenerse bajo una temperatura uniformemente moderada, para permitir que el hormigón desarrolle su potencial de resistencia total. Las temperaturas iniciales de curado elevadas son negativas para la resistencia última en mayor grado que las elevadas temperaturas de vertido (Bloem 1954; Barnes y otros 1977; Gaynor y otros 1985). Los procedimientos para proteger las superficies expuestas al secado deben ser comenzadas rápidamente, con amplio cubrimiento y de forma continuada (sin interrupciones). Una falla en esto trae como resultado una retracción excesiva y fisuración que afectará la durabilidad y la resistencia superficial del hormigón. El curado debe continuarse como mínimo durante 7 días.

Si se hace un cambio en el método de curado durante este período, debe hacerse solamente después de los 3 primeros días. No debe permitirse que la superficie del hormigón se seque durante la transición.

En el ACI 308R se describen los diferentes métodos de curado. El hormigón además debe ser protegido contra la fisuración por retracción térmica a partir de caídas rápidas de la temperatura, particularmente en las primeras 24 horas. Este tipo de fisuración está usualmente asociada a un ritmo de enfriamiento de más de 3 °C por hora, o más de 28 °C en un período de 24 horas, para la estructura de hormigón con una dimensión mínima menor de 300 mm.

El hormigón expuesto al enfriamiento rápido tiene una más baja capacidad para tensiones a tracción y es más susceptible a la fisuración que el hormigón al que se le permite enfriar a un ritmo más lento (ACI 207.4R). Los patrones del clima caliente que probablemente causan fisuración térmica incluyen las diferencias de temperatura durante todo el día, la noche y la lluvia fría. Bajo estas condiciones el hormigón debe ser protegido colocándole encima varias capas de papel impermeable o empleando otros métodos y materiales de aislamiento que están descritos en el ACI 306R.

4.4.2 Curado húmedo de las losas – De los diferentes métodos de curado, el curado húmedo es el mejor para garantizar el desarrollo de la resistencia del hormigón y minimizar la retracción temprana por secado. El curado húmedo puede ser ejecutado por inundación, cubriendo elemento con arena limpia que se mantenga continuamente húmeda, o mediante rociado continuo. Requiere de un suministro de agua grande y además de controlar y disponer los derrames que se produzcan.

Cuando se emplea el rociado, debe tenerse cuidado de que no se produzca la erosión de la superficie del hormigón, Un método más práctico de curado húmedo es el cubrir el hormigón previamente mojado con mantas impermeables o la aplicación de mantas absorbentes que se

mantengan continuamente húmedas con una manguera u otro medio similar. En el ACI 308R están descritos los recubrimientos adecuados. Estos materiales deben estar en contacto con la superficie del hormigón todo el tiempo. Los ciclos alternos de humedecimiento y secado deben ser evitados porque pueden provocar un patrón de fisuración. La temperatura del agua empleada para el curado debe ser lo más cercana posible a la del hormigón para evitar el choque térmico.

4.4.3 Membrana de curado de losas – Emplear el compuesto líquido formador de membranas es el método más práctico de curado donde las condiciones de trabajo no sean favorables para el curado húmedo. Las membranas restringen la pérdida de humedad del hormigón, permitiendo de esta forma el desarrollo de las resistencias mecánicas, la durabilidad y la resistencia a la abrasión de las losas. Sobre las superficies de hormigón expuestas al sol deben emplearse compuestos pigmentados de color blanco. La capacidad para la retención de agua varía considerablemente entre los diferentes productos. Para ser utilizado en condiciones de clima caliente, debe seleccionarse un material que garantice una mejor retención de agua que la requerida por la norma ASTM C-309. Ella limita la pérdida de humedad en un período de 72 horas a no más de $0,55 \text{ kg/m}^3$ cuando se ensaya de acuerdo con la norma ASTM C156. Algunas agencias han establecido un límite más restringido de $0,39 \text{ kg/m}^2$ de pérdida de humedad en un período de 72 h. En losas, la aplicación debe efectuarse inmediatamente después de que desaparezca de la superficie el brillo del agua, después del pase final de acabado. Cuando se aplica con aspersor, la nariz del aspersor debe ser ubicada suficientemente cerca de la superficie para asegurar el ritmo correcto de aplicación y evitar la dispersión por la acción del viento. La aplicación manual debe hacerse en dos pases, con el segundo pase ejecutado en dirección perpendicular al primero. La mayoría de los compuestos de curado no deben ser empleados en cualquier superficie contra la cual sea necesario adherir hormigón adicional u otros materiales, a menos que el material de curado no reduzca la resistencia de adherencia o a menos que la remoción del material de curado sea asegurada antes de que la subsiguiente construcción sea adherida.

4.4.4 Curado del hormigón en los encofrados – Los encofrados deben ser cubiertos y mantenidos continuamente húmedos durante el período más temprano de curado. El hormigón encofrado requiere el acceso temprano a un amplio curado exterior con agua para lograr el desarrollo de las resistencias. Esto es particularmente importante cuando se emplea un hormigón de alta resistencia con una relación agua/material cementicio menor de 0,4 (ACI 363R). Los encofrados deberán ser retirados tan pronto como pueda hacerse sin provocar daños en el hormigón y deben tomarse medidas para que el agua de curado corra hacia abajo dentro de ellos. Puede ocurrir fisuración cuando el hormigón se enfría rápidamente desde una temperatura pico elevada y su contracción es restringida. En la mayoría de los objetos masivos y si el crecimiento de la temperatura interna no es controlado mediante los medios disponibles, el hormigón debe contar con protección térmica, de manera que se pueda enfriar gradualmente a un ritmo que no provoque fisuración. Después de la remoción del encofrado, los huecos de los pernos pasadores pueden ser llenados y también debe ejecutarse cualquier reparación que sea necesaria descubriendo una pequeña porción del hormigón en cada momento en que se vaya a realizar este trabajo. Estas reparaciones deben completarse en los primeros días después del desencofre, de manera que las reparaciones y el llenado de los huecos de los pernos se puedan curar con el hormigón circundante. Al final del período de curado (7 días como mínimo y mejor 10 días), el recubrimiento debe permanecer aún en el lugar, sin humedecimiento, durante varios días (se sugieren 4 días), de manera que la superficie del hormigón se seque lentamente y así esté menos propensa a fisurarse superficialmente por retracción. Los efectos del secado pueden también minimizarse aplicando un compuesto formador de membrana por aspersión al final del período de curado húmedo.

CAPÍTULO 5 — ENSAYOS E INSPECCIÓN

5.1 – Ensayos

5.1.1 Los ensayos sobre las muestras de hormigón fresco deben ser conducidos, y los especímenes preparados, siguiendo las exigencias de las Normas Cubanas aplicables. Los ensayos deben ser ejecutados por un técnico calificado. La muestra debe ser representativa en todo lo posible de la resistencia potencial y de otras propiedades del hormigón que es entregado. Las altas temperaturas, humedades relativas bajas y el secado de los vientos, son particularmente nocivos para la muestra de hormigón fresco que se utiliza para fabricar los especímenes de ensayo y para hacer los ensayos. El abandono de la muestra de hormigón fresco expuesta al sol, el viento o el secado al aire invalidará los resultados de los ensayos.

5.1.2 Algunas veces es deseable en clima caliente, ejecutar los ensayos (como el asentamiento, el contenido de aire, la medición de la temperatura ambiente y del hormigón, de la humedad relativa y la determinación de la masa unitaria) más frecuentemente que para las condiciones normales.

5.1.3 El factor más importante que afecta la retracción plástica del hormigón, es el ritmo de evaporación, que se puede estimar por la figura 2.1.5 a partir de la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento que prevalezca. El ritmo de evaporación se puede determinar más aproximadamente por la evaporación de agua de una cazoleta que tenga un área de aproximadamente 0,093 m². La cazoleta se llena de agua y se determina la masa cada 15 a 20 minutos para determinar el ritmo de evaporación, que es igual a la pérdida de la masa de agua de la cazoleta. Un balance de al menos 2500 g es satisfactorio.

5.1.4 Debe ponerse particular atención a la protección y curado de las probetas de ensayos de resistencia que son empleadas como base para la aceptación del hormigón. Debido a sus pequeñas dimensiones en relación con las mayores partes de la estructura, las probetas de ensayo son influidas más fuertemente por los cambios de la temperatura ambiente. Se necesitan esfuerzos extras en clima caliente para mantener las probetas de ensayo a una temperatura de 16 a 27 °C y evitar la pérdida de humedad durante el período inicial de curado, de acuerdo con [a Norma Cubana NC 221:2002 y] las normas ASTM C31/C31M. Si es posible las probetas deben estar provistas de una cubierta impermeable y colocarse inmediatamente en un lugar de trabajo con temperatura controlada después de ser moldeadas. Si se almacenan afuera debe evitarse la exposición al sol y el efecto de enfriamiento por evaporación del agua debe emplearse para ayudar a garantizar las condiciones de curado. Los siguientes métodos para moldes de ensayo no absorbentes han sido encontrado prácticos:

- Mantener las probetas embebidas en arena húmeda. Hay que tener cuidado de mantener la arena constantemente húmeda (no se puede emplear con moldes de cartón);
- Mantenerlas cubiertas con mantas húmedas. Hay que tener cuidado de mantener la manta constantemente húmeda y fuera de contacto con el hormigón;
- Mantenerlos bajo un spray nebulizador. Hay que tener cuidado de que no se produzcan interrupciones con el spray; y
- Mantenerlos en inmersión total de agua (no se puede emplear con moldes de cartón). Las probetas pueden ser inmersas en agua saturada con cal después de ser moldeadas. Como las probetas están fabricadas con cemento hidráulico, que endurece bajo el agua, las mismas no necesitan ser cubiertas con un capuchón, pero generalmente esto se les hace como medida de precaución contra los daños externos.

5.1.5 Los moldes de probetas no deben ser en ningún caso potencialmente absorbentes ni que expandan en contacto con la humedad o inmersos en agua. Los moldes deben cumplir con los requerimientos establecidos en la Norma Cubana NC 221:2002. Cubrir simplemente la parte superior de la probeta encofrada con una tapa, una plancha o un plato es usualmente insuficiente en clima caliente para evitar la pérdida de humedad y mantener la temperatura requerida para el curado inicial. Durante el traslado a los laboratorios las probetas deben ser mantenidas húmedas y también ser protegidas y manipuladas cuidadosamente.

5.1.6 Además de requerirse las probetas para los ensayos de aceptación del hormigón, otro grupo se puede preparar y curar en el mismo lugar de trabajo para ayudar a determinar cuándo los encofrados pueden ser removidos, o cuando los pernos de anclaje pueden ser quitados y también cuándo la obra o el elemento puede ser puesto en servicio. A menos que las probetas empleadas para estos otros propósitos sean curadas en el mismo lugar y lo más cerca posible de los elementos, o sea bajo las mismas condiciones que el mismo, los resultados de estos ensayos pueden ser absurdos.

En la Norma ASTM C900 y la ASTM C 918 se describen métodos de ensayos alternativos que permiten determinar la resistencia del hormigón ya colocado.

5.2 – La Inspección

5.2.1 En el ACI 311.1R y el 311.4R aparecen los numerosos detalles que hay que chequear previo a efectuar la construcción con hormigón. Los efectos particulares del clima caliente en el desempeño del hormigón y las precauciones que hay que tomar para minimizar los efectos adversos ya han sido discutidos con anterioridad: La inspección del proyecto de hormigón tiene que asegurar la conformidad con estas precauciones y con los procedimientos tradicionales. La inspección adecuada es necesaria además para verificar y documentar esta conformidad. Debe tenerse en cuenta por anticipado la necesidad de tomar medidas tales como el rociado de los encofrados y del sustrato, el enfriamiento del hormigón, el aseguramiento de los paneles de sombra, las cortinas rompevientos, la nebulización y la minimización de las demoras en el vertido y el curado.

5.2.2 La temperatura del aire y del hormigón (ASTM C1064), las condiciones generales del tiempo (despejado, nuboso), la velocidad del viento, la humedad relativa y el ritmo de evaporación deben ser registrados a intervalos frecuentes. Además los siguientes aspectos deben ser registrados e identificados con el trabajo en proceso, de manera que las condiciones relativas a cualquier parte de la construcción de hormigón puedan ser identificadas posteriormente.

- Toda el agua añadida a la mezcla con los tiempos correspondientes de fraguado;
- Momento en que se efectúa la dosificación, el comienzo de la descarga y el completamiento del tiempo de descarga;
- Temperatura del hormigón en el momento de la entrega y después del vertido del hormigón;
- Observaciones sobre la apariencia del hormigón entregado y después de vertido en los encofrados;
- Asentamiento del hormigón entregado;
- Asentamiento del hormigón descargado; y
 - Protección y curado;
 - Método;
 - Tiempo de aplicación;
 - Ritmo de aplicación;

- Apariencia visual del hormigón; y
- Duración del curado

Estas observaciones deben incluirse en el registro permanente del Proyecto.

CAPÍTULO 6 — REFERENCIAS

6.1 – Normas y reportes de referencia

Estos documentos de varias organizaciones normalizativas están referidas en este documento y se lista a continuación con su designación serial:

Normas Cubanas

- NC 95:2001 Cemento Portland. Especificaciones
 NC 96:2001 Cemento con adición activa. Especificaciones
 NC 120:2004 Hormigón hidráulico. Especificaciones
 NC 167:2002 Hormigón fresco. Toma de muestras
 NC 221:2002 Hormigón. Elaboración de probetas para ensayos
 NC 320:2003 Hormigón fresco. Determinación de la variación de la consistencia con el tiempo y la eficiencia del acomodo (retempering) de la consistencia
 NC 412:2005 Guía para la preparación, mezclado, transporte y vertido del hormigón

Instituto Americano del Hormigón (ACI)

- 116R Cement and Concrete Terminology
 201.2R Guide to Durable Concrete
 207.1R Mass Concrete
 207.2R Effect of Restrain, Volume Change and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete
 207.4R Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete
 211.1R Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete
 211.2 Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete
 211R Guide for the Use of Normal Weight Aggregates in Concrete
 212.3R Chemical Admixtures for Concrete
 221R Guide for the Use of Normal Weight Aggregates in Concrete
 223R Standard Practice for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete
 224R Control of Cracking in Concrete Structures
 224.3R Joints in Concrete Construction
 225R Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements
 226.3R Use of Fly Ash in Concrete
 234R Guide for the Use of Silica Fume in Concrete
 301 Specifications for Structural Concrete for Buildings
 302.1R Guide for Concrete Floor and Slab Construction
 304R Guide for Measuring, Mixing, Transporting and Placing Concrete
 306R Cold Weather Concrete
 308R Standard Practice for Curing Concrete
 309R Guide for Consolidation of Concrete
 311.1R/(SP.2) Manual of Concrete Inspection
 311.4R Guide for Concrete Inspection Programs
 318/ Building Code Requirements for Structural

- 318R Concrete and Commentary
- 318M/ Building Code Requirements for Structural
- 318RM Concrete and Commentary
- 363R State-of-the Art Report on High Strength Concrete
- E4-96 Chemical and Air-Entraining Admixtures for Concrete

Normas ASTM

- C31/C31M Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field
- C 156 Standard Test Method for Water Retention By Concrete Curing Materials
- C 172 Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete
- C 192 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
- C 309 Standard Specification for Liquid membrane-Forming Compounds for Curing Concrete
- C 494 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete
- C 595 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements
- C 618 Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete
- C 989 Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars
- C 1017 Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete
- C 1064 Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Portland-Cement Concrete
- STP 169C Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, 1994, 571 pp.

6.2 – Referencias Citadas

- American Concrete Institute, 1996, "Practitioner's Guide to Hot Weather Concreting" ACI PP-1
- Barnes, B. D.; Orndorff, R.L.; and Roten, J. E. 1977, "Low Initial Curing Temperature Improves the Strength of Concrete Test Cylinders", ACI Journal, *Proceedings* V.74, No. 12, Dec, pp 612-615
- Berhane, Z., 1984, "Evaporation of Water from Fresh Mortar and Concrete at Different Environmental Conditions." ACI Journal, *Proceedings* V.81, No. 6, Nov-Dec, pp 560-565
- Bloem, D., 1954, "Effect of Curing Conditions on Compressive Strengths of Concrete Cylinders, *Publication No. 53*, National Ready Mixed Concrete Association, Dec., 15 pp.
- Cebeci, O. Z., 1986, "Hydration and Porosity of Cement Paste in Warm and dry Environments". 8th *International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro*, V.III, pp 412-416; 423-424.
- Cebeci, O. Z., 1987, "Strength of Concrete in Warm and Dry Environment" *Materials and Structures, Research and Testing* (RILEM, Paris), V. 20, No. 118, July pp. 270-272.
- Colleparadi, M.; Corradi, M; and Valente, M., 1979, "Low-Slomp.-Loss Superplasticized Concrete, " *Transportation Research Record 720*, Transportation Research Board. Washington, D.C., Jan., pp. 7-12,
- Gaynor, R.D.; Meininger, R.C.; and Khan, T. S., 1985 "Effect of Temperature and Delivery Time on Concrete Proportions" *Temperature Effects on Concrete*, STP – 858, ASTM, Philadelphia , pp 68-87.

- Guennewig, T. 1988, "Cost-Effective Use of Superplasticizers" . *Concrete International: Design and Construction: Design and Construction*, V. 10, No. 3, Mar., pp. 31-34.
- Hampton, J. S., 1981. "Extended Workability on Concrete Containing High-Range Water-Reducing Admixtures in Hot Weather". *Developments in the Use of Superplasticizers*, SP-68, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 409-422.
- Klieger, P., 1958, "Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength." *ACI Journal, Proceedings* V.54, No. 12, June, pp. 1063-1081. Also, *Research Department Bulletin 103*, Portland Cement Association.
- Lee, M., 1987, "New Technology in Concrete Cooling." *Concrete Products*, V. 89, No. 7, July, pp.24-26, 36.
- Lerch, William, 1957, "Plastic Shrinkage", *ACI Journal, Proceedings*, V.53, No. 8, Feb., 797-802.
- Metha, P.K., 1986, "Concrete Structure. Properties and materials, pp. 56-57
- Mittelacher, M., 1985, "Effect of Hot Weather Condition on the Strength Performance of Set-Retarded Field Concrete", *Temperature Effects on Concrete*, STP 858. ASTM, Philadelphia, pp88-106.
- Mittelacher, M., 1992, "Compressive Strength and the Rising Temperature of Field Concrete". *Concrete International*, V. 14, No.12, Dec, pp 29-33
- National Ready Mixed Concrete Association. 1962, "Cooling Ready Mixed Concrete", *Publication* No. 106, Silver Spring, June, 7pp.
- Olivieri, E., and martin, I., 1963, "Curing of Concrete in Puerto Rico". *Revista*, Colegio de Agricultura y Artes Mecánicas, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez.
- Portland Cement Association, 1992, "design and Control of Concrete Mixtures", Thirteenth Edición, p. 80
- Ravina, D., 1984, "Slump Loss of Fly Ash Concrete". *Concrete International; Design and Construction. Proceedings*, V.6, No. 4, Apr., pp 35-39.
- Ravina D., and Shalon, R., 1968 a, "Shrinkage of Fresh Mortar Cast under and Exposed to Hot Dry Climatic Conditions", *Proceedings*, Colloquium on Shrinkage of Hydraulic Concrete, RILEM/Cembureau, Paris, V.2 (published by Instituto Eduardo Torroja, Madrid).
- Ravina, D., and Shalon, R., 1968b, "Plastic Shrinkage and Cracking." *ACI Journal, Proceedings* V. 65, No. 4, Apr., pp 282-291.
- Shilstone J., Sr., and Shilstone J., Jr., 1993, "High-Performance Concrete Mixtures for Durability", *High-Performance Concrete in Severe Environments*, SP-140, P. Zia, ed. American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 281-305
- Tuthill, L. H., and Cordon, W. A., 1955, "properties and Uses of Initially Retarded Concrete", *ACI Journal, Proceedings* V.52, No. 3, Nov., pp. 273-286.

U.S. Bureau of Reclamation, 1952, "effect of Initial Curing Temperatures on the Compressive Strength and Durability of Concrete," *Report No. C-625*, Denver, 7 pp.

U.S. Bureau of Reclamation, 1975, *Concrete Manual*, 8th Edition., Denver, 627 pp.

Verbeck, G. J., and Helmuth, R. H., 1968, "Structure and Physical Properties of Cement Pastes". *Proceeding*, Fifth International Symposium en the Chemistry of Cement, Tokyo. V. III, pp. 1-32.

Yamamoto, Y. And Kobayashi, S., 1986, "Effect of Temperature on the Properties of Superplaticized Concrete." *ACI Journal. Proceedings* V. 83. No. 1, Jan-Feb., pp. 80-87.

Anexo A
(obligatorio)

ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL HORMIGÓN

A1- Las ecuaciones para la estimación de la temperatura T del hormigón fresco se indican a continuación:

Sin hielo:

$$T = \frac{0,22 (T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_{wa}}{0,22 (W_a + W_c) + W_w + W_{wa}} \quad (A - 1)$$

Con Hielo:

$$T = \frac{0,22 (T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_{wa} + 79,6 W_w}{0,22 (W_a + W_c) + W_w + W_w + W_i + W_{wa}} \quad (A - 3)$$

La fórmula A-2 se eliminó por no corresponder al Sistema Internacional de Unidades

Donde:

T_a = Temperatura del árido

T_c = Temperatura del cemento

T_w = Temperatura del agua de mezclado en la amasado, de una fuente normal, excluyendo el hielo

T = Temperatura del hielo (Nota: La temperatura del agua libre y absorbida en el árido se asume que sea la misma del agregado. Todas las temperaturas están en °C).

W_a = Masa del árido en estado seco

W_c = Masa del cemento

W_i = Masa del hielo

W_w = Masa del agua de mezclado de la amasada

W_{wa} = masa de la humedad libre y absorbida en el árido a Temperatura T_a . (Nota: Todas las masas se dan en Kg.)

A2 – La ecuación A-3 para estimar la temperatura del hormigón con hielo, asume que el hielo está en su punto de fusión. Una aproximación exacta sería emplear la ecuación A-5 que incluye la temperatura del hielo.

$$T = \frac{0,22 (T_a W_a - T_c W_c) + T_w W_w}{0,22 (W_a + W_c) + W_w + W_i + W_{wa}} + \frac{T_a W_{wa} + - W_i (79,6 - 0,5T_i)}{0,22 (W_a + W_c) + W_w + W_i + W_{wa}} \quad (A - 5)$$

La fórmula A-4 se eliminó por no corresponder al Sistema Internacional de Unidades

Anexo B
(informativo)

MÉTODOS DE ENFRIAMIENTO DEL HORMIGÓN FRESCO

El resumen está limitado a una descripción de los métodos adecuados para los usos estructurales corrientes del hormigón. Los métodos para el enfriamiento del hormigón en masa se explican en el ACI 207.4R.

B1 – Enfriamiento con agua de mezclado fría

El hormigón puede ser enfriado empleando agua de mezclado fría; la reducción máxima de la temperatura del hormigón que puede obtenerse es aproximadamente de 6 °C. La cantidad de agua fría no puede exceder el requerimiento del agua de mezclado, que dependerá del contenido de humedad de los áridos y de las proporciones de la mezcla. El método implica una inversión significativa en equipos de refrigeración mecánica y en almacenaje de agua con aislamiento térmico suficientemente grande para garantizar los ritmos de producción horarios y diarios de hormigón enfriado. Los sistemas que están disponibles en el mercado incluyen uno que está basado en la tecnología de bombeo de calor, que es utilizable tanto para enfriar como para calentar el hormigón. Aparte de este costo inicial de la instalación, este sistema puede ofrecer enfriamiento a un costo más bajo que los otros sistemas disponibles para el enfriamiento del agua de mezclado.

B2 – Enfriamiento del agua de mezclado con nitrógeno líquido

El agua de mezclado se puede enfriar rápidamente mediante la inyección de nitrógeno líquido dentro de un tanque aislado térmicamente. Esta agua fría se dispersa entonces en la amasada. Alternativamente el agua de mezclado puede ser convertida en agua congelada con consistencia jabonosa inyectándole nitrógeno líquido a la corriente de agua de mezclado cuando ésta es cargada dentro de la mezcladora. El sistema permite enfriar hasta 11 °C. La relación hielo a agua en el agua congelada debe ser ajustada para producir la temperatura deseada en el hormigón. La instalación de este sistema requiere del almacenaje del agua de mezclado con aislamiento térmico, un recipiente suministrador de nitrógeno, controles de dosificación y equipamiento auxiliar. Además de los costos de instalación hay generalmente gastos de operación con el uso del nitrógeno líquido e impuestos por los recipientes suministradores de nitrógeno. El método difiere del de inyección de nitrógeno líquido en el hormigón ya mezclado, que se describe en B4.

B3 – Enfriamiento del hormigón con hielo

El hormigón se puede enfriar empleando hielo como parte del agua de mezclado. La magnitud del enfriamiento está limitada por la cantidad de agua de mezclado disponible para ser sustituida por hielo. Para la mayoría de los hormigones, la temperatura máxima de reducción es de aproximadamente 11 °C. Para efectuar una correcta dosificación el hielo debe ser pesado. El enfriamiento con bloque de hielo incluye: el empleo de una unidad trituradora y transportadora de hielo, la cual puede triturar finamente un bloque de hielo y verterlo dentro de la mezcladora. El mayor obstáculo en el uso de un bloque de hielo en muchos aspectos es el insuficiente suministro. Los costos de la utilización del bloque de hielo para este fin incluyen: el costo del hielo, su transportación, el almacenaje, refrigerado, el equipamiento de trituración y manipulación, el trabajo adicional y si se requiere también la instalación para el pesaje del hielo. Una alternativa al empleo del bloque de hielo es instalar una planta de hielo cerca de la planta de hormigón y en la medida en que el hielo se produce, se pesa, se tritura y se transporta por cinta hacia dentro de la mezcladora. También se pueden producir hojuelas de hielo que no requieren de trituración. Este sistema requiere de un gran capital de inversión.

B4 – Enfriamiento de la mezcla de hormigón con nitrógeno líquido

B4.1 La inyección de nitrógeno líquido dentro de la mezcla fresca de hormigón es un método efectivo para la reducción de la temperatura del hormigón. El límite práctico más bajo de temperatura se alcanza cuando el hormigón más cercano a la nariz de inyección forma un aglomerado helado; esto es probable que ocurra cuando la temperatura del hormigón está por debajo de 50 °F. Este método se ha empleado exitosamente en la mayoría de los vertidos de hormigón. El desempeño del hormigón no se afecta mediante su exposición a grandes cantidades de nitrógeno líquido. El costo de este método es relativamente alto, pero se puede justificar sobre la base de consideraciones prácticas y su efectividad.

B4.2 Las instalaciones del sistema consisten en un recipiente de suministro del nitrógeno y los medios para su inyección en la central mezcladora o una o más estaciones de inyección para los camiones hormigoneras. El sistema se puede ubicar en el lugar de construcción para el enfriamiento en el último minuto del hormigón antes del vertido. Esto reduce la ganancia de temperatura del hormigón enfriado en tránsito entre la planta de hormigón y el lugar de vertido. Se requiere de coordinación para el despacho del nitrógeno líquido en camiones porta tanques hacia las estaciones de inyección para el relleno oportuno del gas consumido en las operaciones de enfriamiento. La cantidad de nitrógeno líquido requerida variará de acuerdo con las proporciones de la mezcla y de sus componentes y de la cantidad de reducción de temperatura necesaria. El empleo de 48 m³ de nitrógeno líquido reducirá usualmente la temperatura del hormigón en 0,5 °C.

B5 – Enfriamiento de los áridos gruesos

B5.1 Un método efectivo para la disminución de la temperatura del árido grueso es mediante el rociado con agua fría o por inundación. El árido grueso tiene la mayor masa en una mezcla típica de hormigón. La reducción de la temperatura del árido en aproximadamente $1 \pm 0,5$ °C bajará la temperatura final del hormigón fresco en 0,5 °C. Para emplear este método el productor debe tener disponible grandes cantidades de agua helada y el equipamiento necesario para el enfriamiento del agua necesaria para satisfacer los requisitos de producción. Este método es el más efectivo cuando las cantidades adecuadas de material grueso están contenidas en un silo o en una tolva de manera que el enfriamiento pueda efectuarse en un corto período de tiempo. Debe tenerse cuidado de inundar de forma regular el material de manera que la variación de asentamiento de carga a carga sea minimizada.

B5.2 El enfriamiento del árido grueso puede además ser cumplido soplando aire a través del árido húmedo. El aire que fluye mejorará el enfriamiento por evaporación y le aportará al árido grueso una temperatura dentro de 1 °C del bulbo húmedo de temperatura. La efectividad de este método depende de la temperatura ambiente, de la humedad relativa y de la velocidad del flujo de aire. La mejora de emplear aire helado en lugar de aire a temperatura ambiente puede reducir la temperatura del árido grueso en tanto como 7 °C. Este método sin embargo requiere de un costo de instalación relativamente alto.