



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

EL CONCRETO MASIVO

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE :

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T A :

ING. LUIS CANDELAS RAMÍREZ

TUTOR : ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES



ENERO DE 2008

JURADO ASIGNADO

Presidente: M.I. Fernando Favela Lozoya.

Secretario: Ing. Carlos Manuel Chavarri Maldonado.

Vocal: Ing. Juan Luis Cottier Caviedes.

1er. Suplente: Ing. Ernesto René Mendoza Sánchez.

2do. Suplente: M.I. Hector Sanginés García.

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F.

TUTOR DE TESIS:

Ing. Juan Luis Cottier Caviedes

AGRADECIMIENTOS

A **DIOS**: Padre, Hijo y Espíritu Santo

por su infinito **Amor** y la oportunidad de completar mis estudios

A mi amada esposa Lidia y mis queridos hijos Luis Mario y David Alejandro

han sido la razón para mi superación

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM

representada por mis profesores, compañeros y autoridades

Al Ing. Juan Luis Cottier Caviedes

por su dirección en la realización del presente trabajo

EL CONCRETO MASIVO

Índice

Introducción	1
1. Antecedentes	4
1.1 Definición	5
1.2 Generalidades	6
1.3 Breve Resumen Histórico	6
2. Características del Concreto Masivo	10
2.1 Materiales constitutivos	11
2.1.1 Cemento	11
2.1.2 Agregados	12
2.1.3 Agua	15
2.1.4 Aditivos	16
2.2 Diseño de Mezclas	17
3. Procesos en la Tecnología del Concreto Masivo	24
3.1 Necesidad de Controlar la Temperatura	25
3.2 Requerimientos Estructurales	25
3.3 Dimensiones de la Estructura	26
3.4 Restricciones	27
3.5 Generación de Calor	27
3.6 Clima	28
3.7 Producción	28
3.7.1 Suministro de Materiales	29
3.7.1.1 Agregados	29
3.7.1.2 Cemento	29
3.7.1.3 Agua	29
3.7.1.4 Aditivos	30
3.7.2 Dosificación	30
3.7.3 Mezclado	31
3.7.4 Transporte	32
3.7.5 Preparación Antes de la Colocación	37
3.7.6 Colocación	38
3.7.7 Compactación	39
3.7.8 Curado	40

4. Control de la Temperatura	42
4.1 Características Térmicas del Concreto	49
4.1.1 Coeficiente de Expansión Térmica	49
4.1.2 Calor Específico	50
4.1.3 Conductividad Térmica	50
4.1.4 Coeficiente de Difusión Térmica	50
4.2 Propiedades Elásticas del Concreto	51
4.2.1 Capacidad de Deformación	52
4.3 Preenfriamiento	53
4.3.1 Métodos para el Preenfriamiento	55
4.3.2 Agua de Mezclado	56
4.3.3 Agregados	57
4.3.4 Materiales Cementantes	58
4.4 Sistemas de Posenfriamiento	60
5. Casos Prácticos en el uso del Concreto Masivo	63
5.1 Temperatura Máxima en Cubos de Concreto	64
5.2 Losa de Cimentación	68
5.2.1 Análisis para Definir la Cantidad de Hielo	69
5.2.2 Pruebas para Validar la Temperatura del Concreto	71
5.3 Presa Huites	72
5.3.1 Enfriamiento del Concreto	73
5.3.2 Preenfriamiento	73
5.3.3 Posenfriamiento	74
5.4 Puente Viaducto de la Unidad, Monterrey, N. L.	77
5.5 Cimentación para Puente en el Norte de California, USA.	79
6. Conclusiones	81
Bibliografía	84

Introducción

Introducción

Si se le preguntara a cualquier ingeniero lo que es el concreto normal de cemento tipo portland, seguramente podrá dar una respuesta satisfactoria diciendo que es un material compuesto por cemento, arena, grava y agua y tal vez, aire y aditivo(s), lo cual es enteramente correcto, pero si la pregunta se refiere a lo que es el concreto masivo, la respuesta no siempre es acertada. En un pequeño sondeo realizado entre ingenieros de diversas especialidades sobre el conocimiento del concreto normal y del masivo se pudo concluir que más del 90% de los planteamientos sobre el concreto normal fueron respondidos correctamente, en contraste solo el 50 % de las respuestas sobre el concreto masivo fueron acertadas.

Adicionalmente, al concreto masivo solo se le identifica con la construcción de presas rígidas de concreto, siendo que este tipo de concreto y sus técnicas es de aplicación en otros tipos de elementos como por ejemplo grandes cimentaciones.

Por otro lado, es conocido que cualquier tipo de concreto hidráulico o simplemente concreto, es un material que se integra, en principio, con la mezcla de arena, grava, agua y cemento en proporciones adecuadas a las características que se desean de él tanto en su estado fresco como durante su endurecimiento y en toda su vida útil.

Cuando se mezcla, en el concreto, el agua con el cemento, se lleva a cabo una reacción química exotérmica, es decir, se produce calor (calor de hidratación) y por consecuencia se eleva la temperatura del elemento fabricado, si el elemento no tiene la facilidad de disipar ese calor, por ser de dimensiones “grandes”, se pueden alcanzar temperaturas que hagan cambiar su volumen provocando tensiones y por consecuencia agrietamientos que dañan las características deseadas en el concreto. También el diferencial de temperatura entre el interior del elemento y su superficie exterior es motivo de agrietamientos

Por todo lo anterior el objetivo principal del presente trabajo es que el ingeniero constructor conozca de una forma sencilla y práctica lo que es el concreto masivo, su manejo y comportamiento tanto en estado fresco como endurecido, los cuidados que se deben de tener en el manejo de sus insumos, las técnicas de preenfriamiento de insumos y concreto así como el posenfriamiento del concreto endurecido, contribuyendo a mejorar las prácticas comunes en la utilización de este tipo de concreto y por lo tanto lograr estructuras de concreto masivo de mejor calidad en resistencia y durabilidad.

Para lograr el objetivo mencionado se ha dividido esta investigación bibliográfica en seis capítulos:

En el primero capítulo, Antecedentes, se trata de definir al concreto masivo y se hace un resumen histórico de su desarrollo y aplicaciones.

A continuación, en el segundo capítulo, se presentan los elementos constitutivos del concreto masivo, es decir, los tipos de cementos, los agregados gruesos y finos, el agua, aditivos y adiciones haciendo énfasis en las características y propiedades útiles para el

mejor desempeño del concreto estudiado. De igual forma se presenta un procedimiento para el diseño de mezclas de concreto masivo.

El capítulo Procesos en la Tecnología del Concreto Masivo presenta, en primer término, la necesidad de controlar la temperatura, las características propias del elemento como dimensiones y requerimientos estructurales y las circunstancias que rodean a la estructura como el clima y las restricciones. Posteriormente se presentan los procesos constructivos desde el suministro y manejo de insumos, la dosificación, mezcla, transporte y colocación, hasta la compactación y curado.

En el cuarto capítulo Control de Temperatura en Estructuras de Concreto Masivo, se revisan las características térmicas y elásticas, que son de especial importancia en el diseño y aplicación del concreto masivo, para continuar, se presentan los métodos para el preenfriamiento de los componentes del concreto, y los sistemas de posenfriamiento del concreto.

Los casos prácticos en la aplicación del concreto masivo se tratan en el quinto capítulo, presentando en primer lugar un estudio para conocer las temperaturas máximas en un elemento de concreto, así como las temperaturas de fabricación y colado del concreto y la cantidad de hielo necesaria para lograr temperaturas adecuadas en el concreto para una base de cimentación. Posteriormente se presentan ejemplos de otras estructuras como son una presa, un puente viaducto y una zapata y columna para puente.

Finalmente en el capítulo seis se comentan las conclusiones a las que se llegaron al realizar el presente trabajo.

Capítulo 1

Antecedentes

1. Antecedentes

1.1 Definición

El Concreto Masivo es definido por el ACI 116R (American Concrete Institute) como cualquier volumen de concreto con dimensiones lo suficientemente grandes para requerir que se tomen las medidas necesarias para hacer frente a la generación de calor por hidratación del cemento y el consecuente cambio de volumen, con el fin de minimizar el agrietamiento.

Por otro lado el ACI 211 dice: muchos elementos estructurales grandes pueden ser suficientemente masivos para que la generación de calor deba ser considerada, particularmente cuando la dimensión mínima de la sección transversal del elemento sólido se aproxima o exceda de 60 a 90 cm (2 a 3 pies) o cuando el contenido de cemento exceda de 355 kg/m³ (600 lb/yd³)

Según el Departamento de Transportación de Florida, un elemento debe ser considerado como masivo si presenta las siguientes condiciones:

- La dimensión mínima es de un metro
- La relación de volumen a superficie es mayor de 0.30

Ejemplos:

Un elemento de concreto de 2.13x2.13x1.22 m (7'x7'x4') que tiene un volumen de 5.5 m³ y una superficie de 19.52 m², V/S = 0.28 por lo que no se considera masivo.

Un elemento de concreto de 2.74x2.74x1.07 m (9'x9'x3.5') que tiene un volumen de 8.03 m³ y una superficie de 26.77 m², V/S = 0.30 por lo que se considera masivo.

En México, por ejemplo, la CFE en sus Especificaciones de Construcción de Obra Civil del P. H. El Cajón, Nay. en su capítulo de Concretos indica:

“La temperatura de las diferentes mezclas de concreto no debe exceder de los valores mostrados en la siguiente tabla:

Tipo de concreto	Espesor del elemento por colar cm	Temperatura máxima en planta °C	Temperatura máxima de colocación °C
Masivo	>100	20	23
Semimasivo	60-100	24	27
Normal	<60	28	31

Para satisfacer los requisitos de temperatura, es necesario que el Contratista adopte algunas medidas especiales, por ejemplo: hielo en sustitución parcial del agua de mezclado; dar sombra a los recintos de almacenamiento de los agregados, de cemento y quizás a la planta

de concreto; regar o preenfriar con agua los depósitos de grava y arena; y efectuar colados durante las horas de baja temperatura en la obra.”

No es pues fácil el definir al concreto masivo en términos absolutos y simples. La definición varia dependiendo de las especificaciones, el tipo de construcción y el tipo de uso.

1.2 Generalidades

El diseño de estructuras de concreto masivo está general y principalmente basado en la durabilidad, economía y las condiciones de temperatura, dejando la resistencia en un segundo término. La característica que distingue al concreto masivo de otros tipos de concreto es su comportamiento térmico.

La reacción química entre el agua y el cemento es exotérmica, por lo que la temperatura en el concreto aumenta. Cuando el calor no se disipa rápidamente puede aumentar la temperatura en forma considerable. Deformaciones y esfuerzos significativos pueden desarrollarse por el cambio de volumen asociado al aumento y disminución de la temperatura en la masa del concreto. Por lo que deberán tomarse medidas, para que las grietas que se pueden formar no hagan perder estabilidad e integridad en la estructura, que ésta deje de comportarse como monolito, se tengan grandes filtraciones o se acorte la vida de servicio.

La mayoría de los principios en la tecnología del concreto masivo son similares para el trabajo en general de los concretos.

Estas prácticas especiales de construcción se han desarrollado para satisfacer los requerimientos ingenieriles en estructuras de concreto masivo como presas de gravedad y de arco, reactores nucleares, casas de máquinas, grandes bases para equipos industriales, grandes cimentaciones, pilas y mástiles de puentes.

1.3 Breve Resumen Histórico

En el caso de presas, que es donde se ha desarrollado el concreto masivo, en los Estados Unidos de Norteamérica prácticamente desde el principio del siglo 20 se ha aplicado en presas como Arrowrock terminada en 1915 presa de arco-gravedad que en su tiempo fue la más alta del mundo con 107 m, construida por el U S Bureau of Reclamation o la Big Dalton presa de arcos multiples construida por el condado de Los Ángeles a fines de los años veintes. La presa Hoover, en los años treintas, marcó el inicio de prácticas como el posenfriamiento por medio de tuberías embebidas en el concreto y el uso de cemento de bajo calor de hidratación que se extendieron a todo el mundo. Los primeros esfuerzos serios para preenfriar el concreto fueron durante la construcción de la presa Norfolk de 1941 a 1945 por el Corps of EGINEERS consistentes en introducir hielo triturado como agua de mezclado durante los meses de verano, para 1949 la combinación de preenfriamiento y posenfriamiento fue usada en la presa Glen Canyon donde en el verano se tenían temperaturas de hasta 38° C.

Por otro lado un factor que incide notablemente en la elevación de la temperatura del concreto es la cantidad de cemento en la mezcla, hasta los años treinta era la práctica común que se utilizara como mínimo 223 Kilogramos de cemento por metro cúbico de concreto en la construcción de presas, para la presa Hiwassee, terminada en 1940 el contenido de cemento fue de 167 Kg/m³, un inusual contenido para la época, pero al terminarse sin grietas por temperatura, inició la tendencia de reducir la cantidad de cemento que tenemos a la fecha, un ejemplo de estos bajos contenidos de cemento es la presa Prince Flat en California construida por el Corps of Engineers en 1954 con tan solo 140 Kg/m³ de cemento Tipo II ASTM.

El uso de adiciones puzolánicas como reemplazo de cemento, se da por primera vez en la presa Boneville (USA) en 1938 ya que en ensayos previos se demostró un incremento en el tiempo de trabajabilidad de la mezcla fresca y sobre todo la disminución del calor generado en esa ocasión se uso una relación 1:3 de puzolana pumítica – clinker.

Para mediados de los años 40 era ya común el uso de aditivos, pero es en los 50 cuando se reconoce la importancia y beneficios de los reductores de agua, que permiten reducir la cantidad de cemento sin modificar la relación agua – cemento, y a su vez reducir la generación de calor.

Un significativo desarrollo de los años cincuenta fue el desechar como requerimiento de diseño en presas la resistencia a la compresión a los 28 días, ya que el concreto después de este tiempo sigue desarrollando resistencia y la estructura no es sometida a esfuerzos de diseño sino hasta mucho tiempo después.

En México la primera presa construida de concreto masivo fue la Presa Lázaro Cárdenas o de la Angostura sobre el río Bavispe, afluente del río Yaqui en el estado de Sonora. Su construcción estuvo a cargo de la Secretaría de Recursos Hidráulicos de 1936 a 1942.

Es una presa de arco – gravedad con una altura de casi 92 m y una longitud de 178 m. El ancho en la base es de 31 m y en la corona es de 3.5 m, con un volumen total de concreto de 184, 000 m³ y un tamaño máximo del agregado grueso de 15 mm (6”).

El cemento utilizado fue de bajo calor de hidratación, producido por primera vez en el país, con un contenido de 223 Kg/m³.

Para disipar el calor por la hidratación del cemento, se hizo circular agua fría por serpentines embebidos en el concreto. La tubería para formar los serpentines fue de fierro con un diámetro de 25 mm.

A fines de los años cincuenta y principios de los sesenta se construyeron tres importantes centrales hidroeléctricas muy similares entre si:

El Novillo (Plutarco Elías Calles), localizada en el estado de Sonora sobre el río Yaqui, entró en operación en 1964, su obra de contención consiste en una cortina de concreto masivo de arco de doble curvatura con una altura de 133.8 m, longitud de corona de 188 m, espesor de la cortina en la base de 20 m y en la corona 4 m.

El Tamaño máximo del agregado fue de 152 mm (6”), se utilizó cemento portland tipo II y puzolanas naturales. La resistencia a la compresión fue de 250 kg/cm². Los colados se realizaron de una altura de 2m, repartida en tres capas de espesor similar.

Debido a las altas temperaturas del sitio de la obra, fue necesario enfriar el concreto por dos procedimientos:

- a. Se hizo un preenfriamiento añadiendo hielo triturado al agua para que el agua alcanzara una temperatura de 4° C, con esto se logró colocar el concreto a 25° C.
- b. Una vez colocado el concreto se llevó a cabo un posenfriamiento mediante circulación de agua a 20° C en el interior de la masa de concreto con serpentines de cobre.

Los sistemas tradicionales de curado se aplicaron rigurosamente, como fueron: la protección de los colados a la acción del sol, el humedecimiento constante durante 14 días, etcétera.

En la tabla siguiente se resumen las temperaturas del concreto en tres casos: sin preenfriamiento, con preenfriamiento y con preenfriamiento y posenfriamiento, medidas para la presa El Novillo

	Al colado	Después de 4 días	Después de 90 días
Sin preenfriamiento	35	65	43
Con preenfriamiento	25	40	33
Con preenfriamiento y posenfriamiento	25	30	28

Temperaturas del concreto medidos experimentalmente para la presa El Novillo

Mazatepec (La Soledad), se localiza sobre el río Apulco en el estado de Puebla, su cortina es de tipo rígida de arco – bóveda en la parte central extendiéndose hacia ambos márgenes mediante diques de sección gravedad, la longitud del arco es de 154 m en la corona. Altura máxima 91.5 m, espesor en la base 14 m y en la corona 2.5 m.

Para la elaboración del concreto se utilizó cemento portland tipo II de bajo contenido de álcalis y puzolanas naturales. Se especificó una cantidad de cemento de 250 kg/m³ y una resistencia a la compresión de 280 kg/cm². Los colados se realizaron de una altura de 1.5 m, repartida en tres capas de espesor similar. Su construcción se inició en 1958.

Santa Rosa (Gral. Manuel M. Dieguez), se encuentra en el estado de Jalisco sobre el río Santiago a 77 kilómetros al noreste de la ciudad de Guadalajara, en el municipio de Amatitán, se inicio en 1957.

La cortina es del tipo arco – bóveda con una altura de 114 m, con un espesor en la base de 13.5 m y 2.5 m en al corona. Para el concreto se utilizó un contenido de cemento de 250 kg

la resistencia promedio fue de 285 kg/cm² y el tamaño máximo del agregado fue de 10 cm. El espesor de los colados fue de 1.5 m repartido en tres capas de 0.5 m.

Para controlar la temperatura del concreto debido a las altas temperaturas ambientes de alrededor de los 40° C y la generación de calor por la hidratación del cemento, se enfriaron los agregados por medio de sombreado y por el rociado de agua a 4° C y se utilizó hielo en escamas como parte del agua de mezclado y dentro de lo posible, se realizaron colados nocturnos.

Los sistemas de preenfriamiento y posenfriamiento que se han descrito en las obras arriba mencionados son prácticamente los mismos que hasta la actualidad, los ejemplos más recientes de esto, en los años noventas, lo constituyen la Central Hidroeléctrica de Zimapán y la presa Huites, de ésta última se presenta, en el capítulo 5 Casos Prácticos, los detalles de la aplicación del concreto masivo en la cortina.

En otro tipo de obras el antecedente más antiguo que se encontró de la aplicación del concreto masivo, es en la construcción del muelle de Puerto Progreso en Yucatán.

Se construyó entre 1937 y 1941 por la empresa danesa Christensen and Nielsen, consiste en una serie de arcos de concreto masivo sin refuerzo soportado sobre pilares del mismo material que descansan directamente sobre el fondo marino sin ser anclados y cabezales de concreto armado entre pilares y arco. La dimensión de los pilares es de 4.1 m de diámetro para los circulares y para los de forma elíptica de 7.0 m para su eje mayor y 4.4 m en su eje menor. Para el pilar más elevado de 7.6 m de alto se utilizaron 65 m³ de concreto.

Se utilizaron agregados producto de la roca caliza triturada. Fueron empleadas 23,000 toneladas de cemento provenientes de Dinamarca, Estados Unidos y México, no se reporta el tipo de cemento.

Lamentablemente no se encontró información sobre la forma utilizada para enfriar el concreto, pero se puede deducir el uso de agua fría o hielo para tal fin, y el cuidadoso curado para mantener la humedad y una temperatura apropiada, lo realmente importante es el buen estado en que se encuentra esta estructura después de mas de 60 años en un ambiente agresivo, cabe señalar que en el caso del cabezal de concreto armado, construido sobre los pilares, se utilizó acero de refuerzo inoxidable.

Es conveniente comentar que el concreto masivo se ha empleado en otras estructuras de presas, como pueden ser vertedores, pantalla impermeable (C. H. Aguamilpa y Cajón), en grandes cimentaciones, etc.

Capítulo 2

Características del Concreto Masivo

2. Características del Concreto Masivo.

Como es el caso de otros concretos, el concreto masivo está compuesto de cemento, agregados y agua, frecuentemente se adiciona puzolanas y aditivos, para formar una masa semejante a una roca pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua.

Una mezcla de concreto masivo satisfactoria inicia con la adecuada selección de materiales, que a su vez, producirán un concreto adecuado para cumplir con los requerimientos de la estructura en cuestión, con respecto a la economía, trabajabilidad, estabilidad en sus dimensiones, libre de grietas, bajo aumento de la temperatura, resistente, durable y en el caso de estructuras hidráulicas, con baja permeabilidad.

En términos generales, los concretos masivos son aquellos que requieren un manejo especial para evitar daños causados por el calor interno y/o por un posible gradiente de temperatura excesivo durante el proceso de hidratación.

El comité ACI 116 ha definido el **concreto masivo** como un concreto en una estructura, es decir, una viga, columna, pila, compuerta, o presa cuyo volumen es de tal magnitud, que requiere medios especiales para contrarrestar la generación de calor y el subsecuente cambio de volumen.

Hay una suposición general, de que la composición y las propiedades del concreto masivo son de interés solamente para aquellos involucrados en el diseño y construcción de presas; la definición del ACI trata de corregir esa errónea impresión, porque muchas prácticas de construcción desarrolladas en la construcción de grandes presas de concreto, son también aplicables a estructuras mucho menos masivas, como en la construcción de grandes cimentaciones para edificios, equipos o puentes que se construyen en México.

Un concreto masivo por lo general no difiere de un concreto normal en cuanto a los materiales que lo componen, por lo que a continuación se presenta una descripción sucinta de estos componentes, haciendo énfasis en las características y propiedades que para el tipo de concreto que nos ocupa, será útil que se tome en cuenta y se amplíe el comentario.

2.1 Materiales Constitutivos.

2.1.1 Cemento

Los cementos utilizados para la fabricación del concreto, son materiales que en presencia de agua, tienen la capacidad de aglutinar fragmentos de roca (agregados) y endurecer para formar una piedra artificial con características de resistencia y durabilidad apropiadas para las estructuras que el hombre necesita en sus actividades cotidianas.

El cemento (o cemento tipo Pórtland) actualmente utilizado se puede definir como el resultado de la molienda fina del clínker, producido éste, por una mezcla homogénea de materiales arcillosos y calcáreos llevados a la temperatura de fusión incipiente, sin la adición de otro componente excepto yeso.

Tipos de Cementos

Según la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999 los cementos se clasifican en:

CPO: Cemento Pórtland Ordinario
CPP: Cemento Pórtland Puzolánico
CPEG: Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno
CPC: Cemento Pórtland Compuesto
CPS: Cemento Pórtland con Humo de Sílice
CEG: Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno

Además con características especiales:

RS: Resistente a los Sulfatos
BRA: Baja Reactividad Álcali-agregado
BCH: Bajo Calor de Hidratación
B: Blanco

Y por su clase resistente: 20, 30, 30R, 40 y 40R

De acuerdo con las recomendaciones de utilización y las propiedades de los cementos podemos concluir que los más adecuados para ser empleados en la fabricación de concreto masivo son:

Cemento Pórtland Puzolánico (CPP)
Cemento Pórtland Compuesto (CPC)
Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno (CPEG)
Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno (CEG)

Todos en clase resistente 20 y Característica especial Bajo Calor de Hidratación (BCH) Lo anterior será lo deseable pero su uso está limitado por la dificultad de obtenerlos y más importante porque se ha demostrado que puede controlarse satisfactoriamente la generación de calor por otros medios.

Además no se debe olvidar que a menor cantidad de cemento se tendrá menor producción de calor de hidratación, por supuesto sin que la disminución de la cantidad de cemento afecte otras propiedades como la resistencia y durabilidad.

2.1.2 Agregados

Los agregados gruesos y finos que se utilizan para la fabricación del concreto, también llamados, gravas y arenas, son partículas de roca, que pueden ser naturales, triturados o parcialmente triturados.

Los agregados naturales son aquellos que se encuentran y se extraen con un tamaño tal que solamente se tendrán que limpiar y/o clasificar para su uso, se obtienen de ríos, minas, bancos etc. Los agregados triturados proceden generalmente de bancos de roca y se triturarán hasta alcanzar el tamaño y granulometría deseados. Los agregados parcialmente triturados son aquellos que

contienen naturalmente partículas de tamaño apropiado y partículas mayores y por este motivo se procesan por medio de clasificación y trituración de partículas mayores.

En una mezcla de concreto, los agregados ocupan, generalmente, del 60 al 75 % de su volumen y del 70 al 85% de su peso y su repercusión en las propiedades del concreto fresco y endurecido es de gran importancia. Para los concretos masivos, la influencia de la temperatura de los agregados es primordial.

Los agregados de calidad deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril optimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia la pasta del cemento. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables.

2.1.2.1 Granulometría

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis de tamices (norma NMX-C-111-ONNCCE-2004). El tamaño de partícula del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas.

La granulometría y el tamaño máximo de agregado afectan las proporciones relativas de los agregados así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, capacidad de bombeo, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto.

2.1.2.2 Granulometría de los agregados finos

La granulometría del agregado fino depende del tipo de trabajo, de la riqueza de la mezcla, y el tamaño máximo del agregado grueso. En mezclas más pobres, o cuando se emplean agregados gruesos de tamaño pequeño, la granulometría que más se aproxime al porcentaje máximo que pasa por cada criba resulta lo más conveniente para lograr una buena trabajabilidad. En general, si la relación agua - cemento o agua – materiales cementantes se mantiene constante y la relación de agregado fino a grueso se elige correctamente, se puede hacer uso de un amplio rango de granulometría sin tener un efecto apreciable en la resistencia.

A continuación se presenta la recomendación que el comité ACI 207 1R proporciona para la granulometría de la arena.

No. Malla (mm)	Porcentaje retenido individual en peso
(9.5)	0
4 (4.75)	0-5
8 (2.36)	5-15
16 (1.18)	10-25
30 (0.60)	10-30
50 (0.30)	15-35
100 (0.15)	12-20
Charola	3-7

Tabla 2. Granulometría del agregado fino para concreto masivo (ACI 207 1R)

Entre más uniforme sea la granulometría, mayor será la economía.

El módulo de finura (m_f) del agregado fino se obtiene, sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie especificada de mallas y dividiendo la suma entre 100.

El módulo de finura es un índice del tamaño promedio de las partículas del agregado, entre mayor sea el módulo de finura, más grueso será el agregado.

El módulo de finura del agregado fino no debe ser menor de 2.3 ni mayor de 3.1, (NMX-C-111-ONNCCE-2004). Es útil para estimar las proporciones de los agregados finos y gruesos en las mezclas de concreto.

2.1.2.3 Granulometría de los agregados gruesos

El tamaño máximo del agregado grueso que se utiliza en el concreto tiene su fundamento en la economía, en la trabajabilidad y en la necesidad de controlar el calor en el concreto masivo. Comúnmente se necesita más agua y cemento para agregados de tamaño pequeño que para tamaños mayores, por lo que para concretos masivos sin armado se prefieren tamaños de 75 mm y hasta 150 mm.

La granulometría del agregado grueso, con un determinado tamaño máximo, puede variar moderadamente dentro de un rango, sin que afecte apreciablemente las demandas de cemento y agua de la mezcla, siempre que la proporción del agregado fino, con relación a la cantidad total de agregados, produzca un concreto con buena trabajabilidad. Las proporciones de la mezcla se deben cambiar para producir un concreto trabajable si ocurrieran grandes variaciones en la granulometría del agregado grueso.

El tamaño máximo nominal de un agregado, es aquel representado por la malla inmediatamente superior en donde el porcentaje retenido acumulado sea mayor o igual al 10 %. Por ejemplo, un agregado clasificado como de 19 mm tiene un tamaño máximo de 25 mm y un tamaño máximo nominal de 19 mm. De noventa a cien por ciento de este agregado debe pasar la malla de 19 mm y todas sus partículas deberán pasar la malla 25 mm.

El Comité ACI 318 especifica que el tamaño máximo de las partículas de agregado grueso no debe ser mayor a:

- 1): Un quinto de la dimensión mas pequeña del miembro de concreto.
- 2): Tres cuartos del espaciamiento libre entre barras de refuerzo.
- 3): Un tercio del peralte de las losas.

Los agregados se deben manejar y almacenar de manera que se minimicen la segregación y la degradación y que se prevenga la contaminación con sustancias deletéreas. Las pilas se deben construir en capas delgadas de espesor uniforme para minimizar la segregación. El método más económico y aceptable de formación de pilas de agregados es el método de volteo con camión, que descarga el material de manera que no lo separe. Entonces, se recupera el agregado con un cargador frontal. El cargador debe remover porciones de los bordes de la pila desde la parte inferior hacia la parte superior, de manera que cada porción contenga una parte de cada capa horizontal.

Malla (mm)	Límites recomendados para concretos masivos, en la granulometría del agregado grueso, en porcentaje del peso que pasa la malla			
	150-175 (mm)	75-37.5 (mm)	37.5-19 (mm)	19-4.75 (mm)
175	100			
150	90-100			
100	20-45	100		
75	0-15	90-100		
50	0-5	20-55	100	
37.5		0-10	90-100	
25		0-5	20-45	100
19			1-10	90-100
9.5			0-5	30-55
4.75				0-5

Tabla 2. Granulometría del agregado grueso para concreto masivo (ACI 207 1R)

2.1.3 Agua

Casi cualquier agua natural que sea potable y que no tenga un sabor u olor pronunciado, se puede utilizar para producir concreto. Sin embargo algunas aguas no potables pueden ser adecuadas para el concreto.

Las impurezas excesivas en el agua no solo pueden afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también pueden ser causa de eflorescencias, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad. Por consiguiente se pueden fijar ciertos límites en el contenido de cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua o se pueden desarrollar ensayos adecuados para determinar el efecto que la impureza provoque sobre ciertas propiedades.

La norma NMX-C-122-ONNCCE-2004 AGUA PARA CONCRETO “establece los requisitos para las aguas naturales o contaminadas, diferentes de las potables que se pretendan emplear en la elaboración o curado del concreto hidráulico”. Esta norma nos indica los niveles máximos de impurezas o contaminantes que pueden tener las aguas para ser empleadas sin problemas en las mezclas de concreto, aclarando que si algún nivel sobrepasa la norma, se podrá emplear esa agua siempre que se tenga la evidencia de su empleo sin resultados negativos para el concreto.

2.1.4 Aditivos

Los aditivos son aquellos ingredientes del concreto además del cemento Portland, del agua y de los agregados que se agregan a la mezcla inmediatamente antes del mezclado o durante el mismo. Por su función, se les puede clasificar a los aditivos como:

Aditivos inclusores de aire.

Aditivos reductores de agua.

Aditivos retardantes.

Aditivos acelerantes.

Superplastificantes.

Aditivos minerales finamente divididos.

Aditivos diversos, para mejorar la trabajabilidad, la adherencia, a prueba de humedad, impermeabilizantes, para lechadeado, formadores de gas, colorantes, inhibidores de la corrosión y ayudas para bombeo.

El concreto debe ser trabajable, capaz de dársele acabados, fuerte, durable, impermeable y resistente al desgaste. Estas cualidades frecuentemente se pueden obtener de una manera fácil y económica seleccionando los materiales adecuados sin que se tenga que recurrir a los aditivos. (Excepto los aditivos inclusores de aire cuando son necesarios).

Se deberán realizar mezclas de prueba con el aditivo y los materiales por utilizar a las temperaturas y humedades que se vayan a tener en la obra.

Se deberán usar la cantidad de aditivo recomendada por el fabricante o la cantidad óptima de aditivo determinada por medio de ensayos de laboratorio.

Aún cuando un aditivo puede producir un concreto con las propiedades deseadas, se pueden frecuentemente obtener los mismos resultados económicos, cambiando las proporciones de la mezcla o eligiendo otros ingredientes para el concreto.

Siempre que sea posible, se deberá comparar el costo de cambiar la mezcla básica de concreto, contra el costo adicional de emplear un aditivo.

Las principales razones del empleo de los aditivos son:

- 1.- Para reducir el costo de la construcción en concreto.
- 2.- Para obtener algunas propiedades en el concreto de manera más efectiva que por otros medios.
- 3.- Para asegurar la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colocación y curado en condiciones ambientales adversas.
- 4.- Para superar ciertas eventualidades durante las operaciones de colado.

Se debe tener presente que ningún aditivo de ningún tipo ni en cualquier cantidad se podrá considerar como sustituto de una práctica correcta en la tecnología del concreto.

La efectividad del aditivo depende de factores como el tipo, marca y cantidad de cemento; el contenido de agua, la forma, granulometría y proporciones de los agregados; el tiempo de mezclado; el revenimiento; y las temperaturas del concreto y del aire.

Para el tema que nos ocupa, es común el uso de aditivos reductores de agua - plastificantes ya que nos permitirá reducir también la cantidad de cemento, generador del calor, siempre que no afecte la trabajabilidad del concreto masivo.

2.1.5. Puzolanas

La puzolana se define como un material sílico o sílico-aluminoso que por él mismo posee muy poca o nula propiedad cementante, pero finamente dividido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio (liberado durante la hidratación del cemento Pórtland) a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.

De acuerdo con la norma ASTM C 618 los materiales puzolánicos se clasifican en: clase N como las tierras diatomáceas, las pizarras, las tobas volcánicas y la piedra pómez, las que se deben moler y calcinar para su uso y clase C y F, como las cenizas volantes de contenido elevado y bajo de calcio respectivamente.

Las puzolanas en el concreto masivo pueden utilizarse para reducir la generación de calor, mejorar la trabajabilidad, minimizar el potencial daño por la reactividad alcali-agregado y ataque por sulfatos

2.2 Diseño de Mezclas.

El propósito del procedimiento para dosificar concreto masivo es combinar los materiales disponibles: cemento, agua, agregado fino y grueso y aditivos de manera que la mezcla resultante no exceda el límite de temperatura determinado como permisible y que, sin embargo, cumpla con los requerimientos de resistencia y durabilidad establecidos. En algunos casos pueden requerirse dos mezclas: un concreto masivo interior y un concreto exterior que resista las diversas condiciones de la exposición. En consecuencia se deben tomar en consideración, durante la etapa de diseño, los efectos que ejerce la temperatura sobre las propiedades del concreto. Por ejemplo, un muro de 15 cm de espesor disipa con bastante facilidad el calor generado, pero conforme aumenta el espesor y el tamaño del colado, se llega a un punto en que la tasa de generación de calor excede por mucho la tasa de disipación de calor; este fenómeno produce un ascenso en la temperatura interior del concreto, por lo que puede registrarse una diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior de la masa, o entre la temperatura máxima y la temperatura final estable, lo suficientemente grande como para inducir esfuerzos de tensión. El diferencial de

temperatura entre el interior y el exterior del concreto, generado por las reducciones en las condiciones de temperatura del medio ambiente, puede causar agrietamiento en las superficies expuestas. Además, a medida que el concreto alcanza su temperatura máxima y se establece el subsecuente enfriamiento, se inducen esfuerzos de tensión debidos a dicho enfriamiento, si el cambio de volumen es restringido por las conexiones con otras partes de la estructura.

El agrietamiento térmico de estructuras de concreto masivo, puede reducir su vida de servicio, propiciando un deterioro prematuro o una necesidad de mantenimiento excesivo. Asimismo, cabe señalar que la selección de las proporciones adecuadas para la mezcla es solo un medio para controlar la elevación de la temperatura, y que otros aspectos de la obra de concreto deben ser estudiados e incluidos en los requerimientos de diseño y construcción.

2.2.1 Procedimiento

El procedimiento para el diseño de mezclas de concreto masivo que a continuación se describe está tomado del comité ACI 211.1

Una vez determinadas las propiedades de los materiales y conociendo las propiedades del concreto, el procedimiento de proporción debe seguir una serie de pasos que se describen en los siguientes párrafos. Las proporciones deben determinarse para la temperatura máxima de colado prevista, debido a su influencia sobre la velocidad de hidratación del cemento y el calor generado.

2.2.1.1. Paso uno. Determínese todos los requerimientos relacionados con las propiedades del concreto, incluyendo:

1. Tamaño máximo de agregado que puede emplearse.
2. Variación del revenimiento.
3. Limitaciones de la relación agua/cemento.
4. Máxima temperatura de colado prevista.
5. Variación en el contenido de aire.
6. Resistencia y edades de prueba especificadas.
7. Condiciones de exposición prevista.
8. Velocidades previstas del agua, cuando el concreto va a estar expuesto al agua corriente.
9. Requerimiento de calidad del agregado.
10. Propiedades del cemento y/o la puzolana.

2.2.1.2. Paso dos. Si no se dispone de suficiente información, deben determinarse las propiedades esenciales de los materiales. Deben obtenerse, en cantidades suficientes, muestras representativas de todos los materiales, a fin de poder efectuar pruebas de verificación mediante mezclas de prueba.

Del material seleccionado para el programa de pruebas, determínese las siguientes propiedades:

1. Análisis granulométrico de todos los agregados.
2. Peso específico de los agregados a granel.
3. Absorción de los agregados.
4. Forma de la partícula de los agregados gruesos.
5. Módulo de finura de los agregados finos.

6. Peso específico del cemento Pórtland, de las puzolanas y del cemento mezclado.
7. Propiedades físicas y químicas del cemento de las puzolanas y del cemento mezclado, incluyendo la prueba de calor de hidratación a los 7 días.

Debe tenerse disponible un registro completo de estas propiedades para utilizarlo en el campo; esta información será de gran ayuda para ajustar la mezcla si alguna de las propiedades de los materiales empleados en campo difiere de las propiedades de los materiales empleados en el programa de mezclas de prueba en el laboratorio.

2.2.1.3. Paso tres. Selección de la relación agua/cemento. Si en los datos del proyecto no se proporciona la relación agua/cemento, se debe seleccionar de la tabla 2.1 la relación agua/cemento máxima permisible para las condiciones particulares de exposición. Comparese esta relación con la de agua/cemento máxima permisible requerida en la tabla 2.2, para obtener la resistencia promedio que incluye la resistencia especificada mas un margen para variaciones previstas, y empléese la relación agua/cemento mas baja. La relación agua/cemento se debe reducir 0.02 para garantizar que la relación agua/cemento máxima permisible no se exceda durante los ajustes en el campo. Si es necesario esta relación se puede convertir a una relación agua/cemento más puzolana.

TABLA 2.1 Relaciones agua/cemento máximas		
Permisibles para secciones masivas		
Ubicación de la estructura	Relación agua/cemento por peso	
	Clima severo o Moderado	Clima templado, poca nieve o heladas
Al nivel del agua en estructuras hidráulicas o en muelles, donde es posible la saturación intermitente	0.50	0.55
Porciones no expuestas de estructuras masivas	sin límite	sin límite
Estructuras normalmente expuestas	0.50	0.55
Inmersión continua y completa en el agua	0.58	0.58
Concreto depositado en el agua	0.45	0.45
Exposición a aguas subterráneas fuertemente sulfatadas u otros líquidos corrosivos, sal o agua de mar	0.45	0.45
Concreto sometido a flujo de agua a alta velocidad, más de 12 m/s	0.45	0.45

* El límite se debe basar en el requerimiento mínimo para la trabajabilidad o en la Tabla 2.1 para la resistencia.
ACI 211.1

TABLA 2.2 Resistencias aproximadas a la compresión del concreto con aire incluido para diversas relaciones agua/cemento. (Basadas en el empleo de cilindros de 152 x 305 mm.).

Relaciones agua/cemento por peso	Resistencia aproximada a la compresión f'c a los 28 días*, kg/cm ²	
	Agregado natural	Agregado triturado
0.40	316	350
0.50	239	267
0.60	190	218
0.70	148	175
0.80	112	133

*90 días cuando se emplea puzolana

2.2.1.4. Paso cuatro. Estimación de los requerimientos de agua de mezclado. Hágase la estimación de los requerimientos de agua a partir de la tabla 2.3 para el revenimiento especificado y el tamaño máximo nominal del agregado. La temperatura inicial del colado puede afectar este requerimiento de agua.

Tabla 2.3 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado								
Revenimiento, cm	Agua, Kg/m ³ para el concreto de agregado de tamaño nominal máximo (mm) indicado							
	9.5*	12.5*	19*	25*	38*	50*	75+**	150+**
Concreto sin aire incluido								
2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15.0 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire en concreto sin aire incluido, por ciento	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
2.5 a 5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5 a 10.0	202	193	184	175	165	157	133	119
15.0 a 17.5	216	205	197	174	174	166	154	-
Promedio recomendado + + + de contenido de aire total, por ciento, según el nivel de exposición								
Exposición ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.0	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

*Las cantidades de agua de mezclado dadas para concretos con aire incluido están basadas en los requerimientos típicos totales de contenido de aire que se consignan en la tabla precedente como "exposición moderada". Estas cantidades de agua de mezclado son para usarse en el cálculo del contenido de cemento para mezclas de prueba a una temperatura de 20 a 25 De. Son cantidades máximas para agregados gruesos angulosos, razonablemente bien formados y con granulometría dentro de los límites aceptados por las especificaciones. Los agregados redondeados pueden requerir 20 Its/m³ menos para concretos con aire incluido. El empleo de aditivos químicos reductores de agua, que cumplen ASTM C 494, pueden también reducir el agua de mezclado en un 5 por ciento o más. El volumen de aditivos líquidos se debe incluir como parte del volumen total de agua de mezclado. Los valores de revenimiento mayores de 18 cm. se obtienen únicamente mediante el empleo de aditivos químicos reductores de agua; éstos son para concretos con agregados cuyo tamaño máximo nominal no es mayor que 25 mm.

+Los valores de revenimiento para concreto con agregado mayor de 40 mm están basados en pruebas de revenimiento, después de quitar las partículas mayores de 40 mm, mediante cribado húmedo.

+ +Estas cantidades de agua de mezclado se emplean para calcular factores de cemento para mezclas de prueba, cuando se utilizan agregados de tamaño máximo nominal de 70 ó 150 mm. Son promedios para agregados gruesos razonablemente bien formados y con buena granulometría de grueso a fino.

+ + +En varios documentos del ACI aparecen recomendaciones adicionales con respecto al contenido de aire y a las tolerancias necesarias de contenido de aire para control en el campo. Entre estos documentos están: ACI 201, 345,318,301 Y 302. La norma ASTM C 94 para concretos premezclados también proporciona los límites de contenido de aire. Los requerimientos que aparecen en otros documentos no siempre pueden concordar exactamente, por lo que al proporcionar concreto se debe

prestar atención a la selección de un contenido de aire que se ajuste a las necesidades de la obra, así como a las especificaciones aplicables.

#Para concretos que contienen agregados grandes que serán tamizados en húmedo a través de una malla de 1 1/2 pulgadas antes de someterse a la prueba de contenido de aire, el porcentaje de aire esperado en el material de tamaño inferior a 40 mm debe ser como el tabulado en la columna de 40 mm. Sin embargo, los cálculos iniciales de proporción deben incluir el contenido de aire como un porcentaje total.

°Cuando se emplea agregado grande en concretos con bajo factor de cemento, la inclusión de aire no debe ir en detrimento de la resistencia. En la mayoría de los casos el requerimiento de agua de mezclado se reduce lo suficiente como para mejorar la relación agua/cemento y, de esta manera, compensar el efecto reductor de resistencia del concreto con inclusión de aire. Generalmente, sin embargo, para dichos tamaños máximos grandes de agregado los contenidos de aire recomendados en caso de exposición severa se deben considerar, aunque pueda haber poca o ninguna exposición a la humedad o al congelamiento.

33Estos valores se basan en el criterio de que es necesario un 9% de aire en la fase de mortero del concreto. Si el volumen del mortero va a ser sustancialmente diferente del determinado en esta obra, puede ser conveniente calcular el contenido de aire necesario tomando un 9% del volumen real del mortero.

2.2.1.5 Paso cinco. Selección del contenido de aire. Selecciónese un contenido total de aire en la mezcla, como se recomienda en la tabla 2.4. Se puede hacer una medición exacta del contenido de aire durante los ajustes futuros de la mezcla mediante la ecuación 2.1:

$$A = \frac{a}{1 + r (1 - a/ 100)} \quad 2.1$$

donde,

A = contenido de aire del total de la mezcla, expresado como porcentaje.

a = contenido de aire de una fracción de la mezcla inferior a 40 mm, expresado como porcentaje.

r = relación entre el volumen absoluto del agregado de más de 40 mm y el volumen absoluto de todos los demás materiales en la mezcla, excepto el aire. Si el 100 % del agregado pasa por la malla de 40 mm, r = 0 y A = a.

TABLA 2.4 Contenido aproximado de mortero y aire para diversos agregados de tamaño máximo (37,5 mm y contenido de aire del 5 al 6 % en la porción inferior a 37.5 mm).		
Tamaño máximo y tipo de agregado grueso, mm	Contenido de mortero m ³ /m ³ ±0.01	Contenido de aire en la mezcla total, porcentaje
150	0.39	3.0-4.0
150	0.37	3.0-4.0
75	0.44	3.5-4.5
75	0.43	3.5-4.5

2.2.1.6. Paso seis. Calcúlese el peso de cemento requerido para la relación agua/cemento seleccionada y el peso del requerimiento de agua.

2.2.1.7. Paso siete. Determínese el volumen absoluto de los materiales aglutinantes, el contenido de agua y aire y la información obtenida en los pasos cuatro, cinco y seis. Calcúlense los volúmenes absolutos individuales del cemento y la puzolana.

$$V_c + p = \frac{C_w}{G_c (1000)} \text{ m}^3 \quad 2.2$$

$$V_c = V_c + p (1 - F_v) \quad 2.3$$

$$V_p = V_c + p (F_v) \quad 2.4$$

donde;

C_w = peso del cemento portland equivalente, determinado mediante el paso seis.

G_c = peso específico del cemento portland.

V_c = volumen de cemento (m³).

V_p = volumen de puzolana (m³).

$V_c + p$ = volumen de cemento y puzolana (m³).

F_v = porcentaje de puzolana por volumen absoluto en el volumen total absoluto del cemento más la puzolana, expresado como factor decimal.

2.2.1.8. Paso ocho. Selecciónese el porcentaje de agregado grueso. A partir de la tabla 2.5, y con base en el módulo de finura del agregado fino, así como en el tipo y tamaño máximo del agregado grueso, determínese el porcentaje de este en el volumen total de agregado.

TABLA 2.5 Contenido aproximado de agregado grueso cuando se emplea agregado fino natural (N) o manufacturado (M) (Porcentaje de agregado total por volumen absoluto).									
Tamaño máximo Nominal y tipo de agregado grueso, mm	Tipo de arena	Módulo de finura							
		2.40		2.60		2.80		3.00	
		N	M	N	M	N	M	N	M
150 triturado		80	78	79	77	78	76	77	75
150 redondeado		82	80	81	79	80	78	79	77
75 triturado		75	73	74	72	73	71	72	70
75 redondeado		77	75	76	74	75	73	74	72

Nota: Para concreto que contenga 5.5 % de aire y revenimiento de 5 cm, ambos medidos sobre la porción de tamaño inferior a 37.5 mm. Los contenidos de agregado grueso que se mencionan en la tabla se pueden incrementar en un 1 ó 2 % aproximadamente, si se siguen procedimientos adecuados de control. El contenido de agregado grueso en la tablas corresponde principalmente al tamaño de la partícula en la porción inferior a 37.5 mm.

2.2.1.9. Paso nueve. Determínese el volumen absoluto del agregado total, restando del volumen unitario los volúmenes absolutos de cada material, como se indica en el paso siete. Con base en la cantidad de agregado grueso, seleccionado en el paso ocho, determínese el volumen absoluto del agregado grueso. Lo que resta del volumen absoluto representa la cantidad de agregado fino en la mezcla.

2.2.1.10. Paso diez. Establézcase la combinación deseada de los diferentes grupos de tamaño de agregado grueso. Utilizando las granulometrías individuales de los agregados gruesos, Combínense todos los agregados gruesos en una granulometría uniforme, aproximando las que aparecen en la tabla 2.6 para el agregado de tamaño máximo nominal de 150 o 75 mm. El porcentaje de cada grupo de tamaño se debe redondear con el porcentaje entero más cercano.

TABLA 2.6 Granulometría combinada ideal para Agregado de tamaño máximo nominal de 150 mm y de 75 mm.				
Tamaño de la malla, Mm	150 mm		75mm	
	Porcentaje que pasa		Porcentaje que pasa	
	Triturado	Redondeado	Triturado	Redondeado
150	100	100		
125	85	89		
100	70	78		
75	54	64	100	100
50	38	49	69	75
37,5	28	39	52	61
25	19	28	34	44
19	13	21	25	33
9.5	5	9	9	14

2.2.1.11. Paso once. Conviértanse los volúmenes absolutos de todos los componentes de la mezcla a peso por volumen unitario.

2.2.1.12. Paso doce. Verifíquese el contenido de mortero. A partir de los volúmenes absolutos calculados anteriormente, calcúlese el contenido de mortero y compárense los resultados con los valores proporcionados en la tabla 2.4, los cuales proporcionarán un indicio de la trabajabilidad de la mezcla, como se ha determinado por comportamientos pasados en el campo. La tabla 2.4 se puede consultar como auxiliar para hacer los ajustes de la mezcla en el laboratorio.

Capítulo 3

Procesos en la Tecnología del Concreto Masivo

3. Pocosos en la Tecnología del Concreto Masivo

3.1 Necesidad de Controlar la Temperatura

Si el cemento y puzolanas no generan calor mientras el concreto se endurece, habrá poca necesidad de controlar la temperatura.

En la mayoría de los casos esta generación de calor y la elevación de temperatura, ocurrirán rápidamente dando como resultado el endurecimiento del concreto mientras se expande. Además, junto con el aumento de rigidez se da una continua elevación de la temperatura por varios días, estas circunstancias pueden ser poco importantes si:

- a. La máxima temperatura puede ser limitada a un valor cercano a su temperatura final al enfriarse.
- b. Se mantiene la misma temperatura en todo el volumen incluyendo superficies expuestas; y,
- c. Se soporta sin restringir (o contener en cimbras que se expandan o contraigan según el concreto)

Obviamente ninguna de estas tres condiciones puede lograrse por completo ni simultáneamente. La primera y la segunda pueden ser realizadas hasta cierto punto en la mayoría de las construcciones. La tercera es la más difícil de obtener, pero ha sido lograda a escala limitada por medio del calentamiento del concreto previamente colocado para limitar la diferencia de temperatura entre el concreto viejo y la máxima temperatura que se espera alcanzar en el concreto nuevo.

3.2 Requerimientos Estructurales

El tamaño, tipo, y función de la estructura, el clima ambiental, y el grado de restricción interna y externa impuesta a la estructura dicta hasta que punto es necesario controlar la temperatura. Estructuras gravitacionales, las cuales dependen para su estabilidad y seguridad de una integridad estructural, usualmente no pueden tolerar grietas en ciertos planos (cierta orientación). El número de juntas debe ser mínimo de acuerdo con los requerimientos de diseño y construcción. El diseñador debe establecer un diseño de fuerzas consistente con los requerimientos para el desempeño de la estructura, cargas de construcción, descimbrado y durabilidad. Se considera la especificación del requerimiento de resistencia más allá de los 28 días. Concretos con una resistencia temprana mayor de la necesaria después de los 28 días, necesitará una excesiva cantidad de cemento, además de introducir calor adicional al concreto agravando el problema del control de la temperatura. Donde las grietas, incluidas aquellas producidas por la tensión por temperatura, permiten la entrada del agua, y la corrosión del refuerzo, la oxidación y/o la congelación y deshielo se puede producir la caída del recubrimiento o provocar otra acción destructiva.

El programa de construcción, la relación estimada de la colocación y la época del año, deben ser considerados por el diseñador. La temperatura más alta (pico), ocurrirá en el concreto colocado durante los meses calientes del verano; de igual forma al término del verano o inicio del otoño se alcanzará un gran pico de temperatura, y probablemente estará

expuesto a una abrupta caída de la temperatura del aire. La colocación del concreto en invierno estará expuesta a una severa condición de baja temperatura. Estas circunstancias contribuyen a la necesidad de considerar el control de la temperatura.

Al final de la primavera es el tiempo mas conveniente para la colocación del concreto masivo porque la temperatura del aire en el ambiente tiende a crecer diariamente, de esta manera coincide con la elevación de la temperatura del concreto. Así el concreto no absorbe mucho calor del aire ni tampoco estará propenso a un cambio brusco de temperatura en la superficie.

Aunque estas últimas consideraciones no necesariamente ocurren, se deberán tener en cuenta sobre todo en el norte del país donde son más marcadas las condiciones de temperatura ambiente de acuerdo con las estaciones del año.

3.3 Dimensiones de la Estructura

Cuando la dimensión más pequeña de un elemento de concreto no es muy grande, la evolución del calor en la mezcla es baja y el calor de hidratación puede ser disipado con facilidad por las dos superficies (la cimbra no aísla) la máxima temperatura no será muy elevada. Sin embargo en todo caso la elevación de temperatura es necesaria con el fin de crear un gradiente (diferencia) de temperatura para conducir el calor a la superficie. La tabla 3.1 muestra las máximas temperaturas alcanzadas típicamente en muros.

Tabla 3.1 Elevación de la temperatura en muros

Ancho del muro (m)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	3.0	Infinito
Elevación máxima de la temperatura (°C)	1.2	3.2	4.9	6.6	8.1	12.8	16.7

Cemento de moderado calor Tipo II

Temperatura de colocación igual a la temperatura ambiente

Expuesto por los dos lados

Difusión térmica: 0.093 m²/día

Elevación de la temperatura: °C por 100 Kg de cemento por metro cúbico de concreto

ACI 207.4R 93

Nota: para la actual norma NMX C-414 ONNCCE el cemento CPP sería equivalente al Tipo II

Una losa de cimentación puede ser considerada como un muro de gran dimensión con una cara expuesta, por lo que la pérdida de calor se dará solo por la superficie expuesta. Para este caso la tabla 3.2 muestra las máximas temperaturas esperadas, las cuales no son substancialmente más altas que las del muro vertical. Sin embargo la máxima ocurre a edades tardías y sobre una gran parte del concreto. Deberá existir un balance de las fuerzas estáticas de compresión y tensión, los esfuerzos en la parte central son pequeños y esencialmente uniformes, mientras que en el lado expuesto los esfuerzos de tensión son muy altos.

La protección al concreto masivo puede hacerse con sencillas precauciones y ayudándose por condiciones climáticas favorables, logrando un concreto sin grietas. Lo anterior se ejemplifica con una gran base de concreto reforzado construida en Gran Bretaña de 480 m² de área, 2.5 m de espesor y con un contenido de cemento de 418 kg/m³, fue colocado como una sola unidad. La máxima temperatura alcanzada del concreto fue de 65° C, con la superficie inferior protegida con triplay de 19 mm y la superficie de arriba por una capa de plástico sobre una capa de 25 mm de arena. El triplay y la arena fueron removidos a los 7 días, las superficies estuvieron expuestas al ambiente de enero con su temperatura y humedad.

Tabla 3.2 Elevación de la temperatura en losas sobre el terreno

Ancho de la losa (m)	0.9	1.5	3.0	4.6	6.1	7.6	Infinito
Elevación máxima de la temperatura (°C)	5.6	8.7	13.1	15.0	16.7	16.2	16.7

Cemento de moderado calor Tipo II

Temperatura de colocación igual a la temperatura ambiente

Expuesta solo la cara superior

Difusión térmica: 0.093 m²/día

Elevación de la temperatura: °C por 100 Kg de cemento por metro cúbico de concreto

ACI 207.4R 93

Nota: para la actual norma NMX C-414 ONNCCE el cemento CPP sería equivalente al Tipo II

3.4 Restricciones

No se desarrollarán tensiones o deformaciones si el volumen o longitud cambian asociados con el decrecimiento de la temperatura del concreto en masa o el elemento puede acomodarse libremente. Cuando estas contracciones potenciales, entre cualquier estructura de concreto masivo y su base firme, por ejemplo de roca, entre elementos estructurales contiguos, o internamente un elemento de concreto se encuentra restringido, ocurrirán totalmente o en parte las tensiones y las deformaciones aparecerán. Si el concreto puede moverse libremente no se presentarán problemas en la contracción si por el contrario el movimiento esta restringido las tensiones y contracciones se presentarán. Bases flexibles causarán menos restricción.

3.5 Generación de Calor

Los requerimientos de resistencia, durabilidad y las características de los agregados disponibles, en gran parte dictan el contenido de cemento de la mezcla usado para un empleo particular. Las opciones que se tienen para buscar limitar la generación de calor incluyen: (a) uso de cemento, de acuerdo a la norma mexicana, con característica especial de Bajo Calor de Hidratación (BCH); (b) uso de cementos hidráulicos Tipo CPP, CPC; y (c) reducción del contenido de cemento como resultado del uso de material puzolánico como ceniza volante o puzolana natural, para lograr una reducción máxima de la producción de temperatura sin sacrificar el desarrollo de resistencia a largo plazo. En algunos casos se puede tomar ventaja de la reducción del cemento aprovechando la reducción del agua de mezclado. El Concreto Compactado con Rodillo (CCR) usualmente

permite la reducción del cemento al mantener baja la relación agua cemento, permaneciendo bajo el contenido de agua al punto donde la mezcla no tiene revenimiento.

Estas opciones, pueden ser seleccionadas para minimizar el calor generado. Sin embargo, la baja en la producción de calor, se contrapone con una lenta ganancia de resistencia, lo que requiere una edad mayor de diseño. En algunos casos las necesidades en la construcción, como la de obtener resistencias tempranas para permitir un rápido descimbrado, el uso continuo de la cimbra y la preparación de las juntas, puede no permitir una reducción del cemento (y la correspondiente baja en la generación de calor).

3.6 Clima

Como regla general, cuando no se toman precauciones especiales, la temperatura de colocación del concreto, será muy poco por arriba de la temperatura ambiente del aire. La temperatura final estable en el interior de la estructura de concreto masivo, será aproximadamente del promedio anual de la temperatura del aire de acuerdo a su localización geográfica.

La temperatura extrema experimentada por el concreto en su interior, está determinada por la temperatura en el colado, más la elevación de la temperatura adiabática, menos el calor perdido al aire y menos la temperatura estable final. Los procedimientos están disponibles para determinar la temperatura neta obtenida en los colados masivos (ver Capítulo 4).

Capas de 1.5 m pueden perder del orden del 25% del calor generado si está expuesta por tiempo suficiente, alrededor de 5 días, previo a la colocación de la siguiente capa, siempre que la temperatura ambiente esté por debajo de la temperatura interna del concreto.

Capas mayores de 1.5 m colocadas con poca o nada de diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura interna del concreto perderán poco o nada de calor.

De igual importancia es el gradiente de temperatura entre la temperatura interna y la superficial. Cuando la temperatura de la capa superficial desciende bruscamente se pueden producir deformaciones, que si llegan a exceder la capacidad de deformación del concreto producirá grietas.

Por otro lado deberá tenerse en cuenta que cuando la temperatura del concreto es baja, la hidratación avanza a una velocidad mucho menor. Las temperaturas inferiores a los 10° C son desfavorables para el desarrollo de la resistencia a edad temprana; debajo de los 4.5° C el desarrollo de la resistencia a edad temprana se retrasa en gran medida; y a temperaturas de congelación o por debajo de ellas, hasta los -10° C, el desarrollo de resistencia es mínimo o nulo.

3.7 Producción

El objetivo en la producción del concreto masivo, es obtener la uniformidad y homogeneidad, indicadas por propiedades físicas, tales como peso volumétrico, revenimiento, contenido de aire y resistencia en dosificaciones sucesivas de las mismas proporciones del mezclado, así como una apropiada secuencia y combinación de los ingredientes. Sin olvidar el aspecto económico y de trabajabilidad indispensables en cualquier obra.

3.7.1 Suministro de Materiales

Los agregados fino y grueso, el cemento, el agua (incluyendo el hielo) y los aditivos químicos deben ser adecuadamente manejados, procesados, almacenados y dosificados, para mantener su calidad en la producción de concreto.

3.7.1.1 Agregados

Para la producción y suministro, los agregados son transportados desde los bancos localizados previamente hasta la trituradora, para la selección de tamaños, son cribados por diferentes mallas, luego se almacenan en montones donde se lavan, y posteriormente se enfrían si es necesario para la elaboración de mezclas.

Cuando se transporta agregados de gran tamaño desde bandas elevadas, se reduce al mínimo las fracturas, utilizando una conducción de escalera. El agregado se almacena separándolo en diferentes tamaños. Sin embargo, cuando es necesario almacenar en montones, el uso de métodos incorrectos acentúa problemas con los finos y también causa segregación, rompimiento del agregado y una excesiva variación en la graduación. Los montones deben construirse en capas horizontales o suavemente inclinadas. Debe tenerse una base dura provista de un buen drenaje para evitar la contaminación del material en el fondo, y el mezclado de los diferentes tamaños debe evitarse mediante muros apropiados o amplios espacios entre los montones.

3.7.1.2 Cemento.

Debido a las grandes cantidades de cemento que se consumen en la producción masiva de concreto, se tiene la necesidad de transportarlo a granel de las plantas de cemento, puede ser por medio de furgones de ferrocarril, hasta un punto cercano a la obra, o bien por medio de camiones cisterna. En el primer caso, el cemento es depositado en silos para ser almacenado y posteriormente es transportado por medio de camiones para su almacenamiento en los silos de las plantas dosificadoras y o mezcladoras de concreto, en el segundo caso el cemento llega directo a los silos de las plantas. En ambos casos de este almacenamiento es transportado por medios neumáticos a la báscula y finalmente al equipo de mezclado.

3.7.1.3 Agua.

El agua se extrae de la fuente que puede ser un río, lago, pozo y es bombeada a tanques de almacenamiento que se encuentran en partes más elevadas, y por gravedad suministra al depósito que se encuentra en la planta dosificadora para proporcionar el agua requerida para ser suministrada en las mezcladoras y así elaborar la mezcla de concreto determinada. Cuando es necesario la utilización de hielo en mezclas de concreto para su enfriamiento es conveniente que se incorpore directamente en el depósito de agua de mezclado para así convertir el hielo en agua fría y de esta manera hacer más manejables los componentes del concreto durante su mezclado.

En ocasiones es necesario contar con una planta que suministre escarcha de hielo a la mezcla y que será parte del agua de mezclado

3.7.1.4. Aditivos

Los aditivos líquidos que se utilizan con más frecuencia en la elaboración de mezclas de concreto masivo son aditivos reductores de agua e inclusores de aire, los cuales se almacenan en tanques, para posteriormente ser bombeados a los depósitos de aditivos de las plantas y pasar a la dosificadora para suministrar las cantidades necesarias de aditivo e incorporarse al agua de mezcla para una mejor homogeneización en la elaboración de concreto.

3.7.2 Dosificación

La dosificación, es el proceso de medición, por peso o volumen de los componentes del concreto e introducirlos al mezclador. Para producir concreto masivo de calidad, los ingredientes deberán medirse con precisión en cada mezcla. La mayoría de las especificaciones requiere que las dosificaciones se efectúen por peso en vez de hacerlo por volumen debido a las imprecisiones al medir los agregados como resultado del abundamiento. El empleo de un sistema de dosificación por peso suministra una mayor exactitud y simplicidad. El agua, hielo y aditivos líquidos se pueden medir correctamente ya sea por volumen ó por peso.

Durante las operaciones de medición y dosificación, los agregados se deben manejar de tal manera que mantengan la granulometría deseada, pesándose todos los materiales a la tolerancia requerida para mantener homogéneas las características de la mezcla de concreto diseñada.

Los silos para el cemento, así como los almacenamientos de agua, agregados y aditivos que proveerán a la planta dosificadora deberán tener el tamaño adecuado para alimentar eficazmente la capacidad productora de la planta. Los compartimentos de almacenaje deben separar adecuadamente los diversos materiales del concreto, su forma y disposición se harán de tal manera que prevengan la segregación y rotura del agregado y deben ser diseñados de tal modo que el material no se desparrame de un compartimiento a otro.

Las tolvas pesadoras deben ser cargadas mediante almeja, dragalina o cargador frontal. Las compuertas que se emplean para cargar dosificadores semi o totalmente automáticos deberán estar equipados con motor y con un apropiado control de "goteo" para lograr la exactitud deseada de peso; dispondrán del debido acceso para tener muestras representativas o para lograr la apropiada secuencia y combinación de agregados durante la carga de la mezcladora.

El sistema de dosificación individual automática por peso esta provisto de básculas y tolvas medidoras, separadas para cada tamaño de agregado y para cada uno de los otros materiales que entran en la mezcla, interruptores para cortar los ciclos de pesado y de descarga cuando las tolerancias se han excedido, selectores de la mezcla, medidores y compensadores de humedad en los agregados y registradores. El ciclo de pesado se inicia mediante un interruptor sencillo, y las tolvas medidoras individuales se cargan simultáneamente.

Además de la medición exacta de los materiales, también deben emplear procedimientos correctos de operación, si se quiere mantener la uniformidad del concreto. Se debe tener cuidado de asegurar que los materiales que se han dosificado estén puestos en la secuencia apropiada, y combinados de manera que se carguen uniformemente dentro de la mezcla.

De ser posible, el cuarto de control de dosificación de la planta debe estar arreglado con la estación del operador, de modo que se ubique en una posición en donde el operador pueda ver de cerca y con claridad las básculas y los instrumentos de medición durante la dosificación del concreto, así como también la carga, el mezclado y la descarga de las mezclas sin tener que dejar su consola de operaciones.

Las especificaciones generalmente exigen que los materiales se midan en revolturas individuales con los siguientes porcentajes de precisión: cemento 1%, agregado 2%, arena 1%, aditivos 3% y agua 1%.

Los equipos deberán tener la capacidad de medir las proporciones dentro de las tolerancias mencionadas. La dosificación de aditivos se deberán revisar diariamente, puesto que los errores, particularmente la sobredosis pueden llegar a provocar problemas muy serios en el concreto, ya sea en estado fresco ó endurecido.

3.7.3 Mezclado

Es esencial un mezclado completo para la producción de un concreto de calidad uniforme. Por lo tanto, el equipo y los métodos que se emplean deben ser capaces de mezclar con eficiencia los materiales para concreto que contengan el mayor tamaño de agregado especificado, para producir mezclas uniformes con el menor revenimiento que sea práctico para el trabajo. Se debe proveer suficiente mezclado, así como los medios para transportarlo y colocarlo, para que exista continuidad y quede libre de juntas frías.

Todo concreto se deberá mezclar completamente hasta que su apariencia sea uniforme, con todos sus ingredientes distribuidos equitativamente. Los mezcladores no deben ser cargados por encima de su capacidad y deberán ser operados aproximadamente a la misma velocidad para la cual fueron diseñados, el ingeniero determinará la duración máxima de la mezcla

con el fin de obtener la mejor manejabilidad. Se debe determinar la incidencia de la duración sobre la dosificación necesaria de incorporadores de aire. La cantidad de aire incluido depende en primer lugar, de la composición inicial de la mezcla: aumenta inicialmente y disminuye con el tiempo de mezclado. Se deberá tener en cuenta especialmente para concretos de baja dosificación en cemento y agua, en los cuales se exige un tiempo de mezcla mayor. Puesto que la manejabilidad inicial no es constante, se deberá prever un tiempo prudente: un tiempo de mezclado corto tiene efectos más desfavorables que uno de mayor duración.

Si el concreto ha sido mezclado adecuadamente, las muestras que se tomen de distintas porciones de una mezcla tendrán los mismos pesos volumétricos, contenidos de aire, revenimientos, y contenidos de agregado grueso. Los mezcladores estacionarios cuentan con dispositivos para medir el tiempo, los cuáles pueden ser regulados para un cierto tiempo de mezclado y asegurados para que la mezcla no se pueda descargar sino hasta que haya transcurrido el tiempo designado. Los mezcladores tienen una capacidad nominal de 6 a 9 m³.

El periodo de mezclado debe medirse en el momento en que todo el cemento y el agregado se encuentren en el tambor mezclador, con la condición que toda el agua se agregue antes que transcurra un cuarto del tiempo de mezclado. Para condiciones normales, se debe colocar en el mezclador, antes de que se agreguen los materiales sólidos, hasta aproximadamente un 10% de agua de mezclado. Entonces el agua se debe vaciar uniformemente con los materiales sólidos, dejando aproximadamente un 10% para agregarlo después que todos los demás materiales se encuentran dentro del tambor.

La homogenización para un tiempo de mezclado de 60 a 70 segundos, resulta de buena a excelente.

3.7.4 Transporte

El concreto puede ser transportado por métodos y equipos diversos, tales como mezcladoras de camión, cajas de camión fijas con o sin agitadores; bachas con grúa; conductos o mangueras, y por bandas transportadoras entre otros. Cada tipo de transportación posee ventajas y desventajas específicas que dependen de las condiciones del uso, ingredientes de la mezcla, la accesibilidad y ubicación del sitio de colocación, capacidad y tiempo de entrega requeridos y las condiciones ambientales.

Aunque no exista una forma perfecta para transportar y manejar el concreto, una planeación anticipada nos ayudará en la elección del método más adecuado a las necesidades especiales de transporte, evitando así la ocurrencia de problemas. La planeación deberá tener en consideración tres eventos, que en caso de suceder durante el manejo y la colocación, podrían afectar seriamente la calidad del trabajo terminado:

1.- Retrasos: El objetivo que se persigue al planear cualquier calendario de trabajo, es hacerlo con mayor rapidez, contando con el equipo adecuado y gente especializada para realizarlo. Las máquinas para transportar el concreto se han ido modernizando continuamente. Se logrará la máxima productividad si se planea el trabajo aprovechando al

máximo el personal y el equipo de manera que se reduzca el tiempo de retraso durante la colocación de concreto. El intervalo de tiempo que transcurra entre el final de mezclado y la compactación debe ser lo más corto posible, sin importar el medio de transporte que se eligió, para que la pérdida de manejabilidad sea mínima.

2.- Endurecimiento temprano: El concreto comienza a endurecer en el momento en que se mezclan el cemento con el agua, pero el grado de endurecimiento que ocurre durante los primeros 30 minutos normalmente no presenta problemas, por lo general, el concreto que se haya mantenido en agitación se puede colocar y compactar dentro de la primera hora y media después del mezclado. La correcta planeación deberá eliminar ó disipar cualquier problema que provoque que el concreto endurezca y evite la completa consolidación.

3. - Segregación: Tiene como consecuencia que parte de la mezcla tenga una cantidad demasiado pequeña de agregado grueso y que el resto tenga agregado grueso en cantidades excesivas. Probablemente la primera parte se contraerá más, se agrietará y tendrá una baja resistencia a la absorción. La segunda será demasiado áspera para lograr una consolidación total. Los métodos y equipos que lleguen a usarse para transportar y manejar concreto no deberán causar segregación.

Para la elección del método de transporte, la primera cuestión por analizar es el tipo de trabajo: su tamaño físico, la cantidad total de concreto por colar y el programa a cumplir. El estudio de los detalles de la obra, determina además la cantidad de trabajo que queda debajo del nivel del terreno, por encima de este o en nivel del terreno. Esto ayuda a escoger el equipo o los equipos adecuados de manejo de concreto necesario para colar el concreto en los niveles que se requieran.

Se debe mover el concreto desde el mezclador hasta el sitio a colar lo más rápido posible sin segregación o pérdida de ingredientes. El equipo de transporte y de manejo deberá tener la capacidad necesaria para mover el concreto en cantidades suficientes a fin de eliminar las juntas frías.

Un requisito básico del equipo y método de colocación, como de todos los demás equipos y métodos de manejo, es que debe conservar la calidad del concreto en lo referente a la relación agua-cemento, revenimiento, contenido de aire y homogeneidad. La selección del equipo debe basarse en su capacidad para manejar eficientemente el concreto en las condiciones más ventajosas de tal modo que pueda ser fácilmente consolidado en su lugar mediante vibración.

Los equipos y métodos de transporte y colocación del concreto masivo son similares a los empleados en otros tipos de concreto, es decir: camión - revoladora, camión de volteo, camión agitador, grúa y bacha etc. solo que por lo general se usarán de gran tamaño o en cantidades adecuadas a los grandes volúmenes de concreto y por supuesto de gran producción, sin embargo un equipo de transporte y colocación que se ha empleado con éxito, y que es poco empleado en otras obras de concreto, son las bandas transportadoras, por lo que a continuación se abunda en su estudio.

Transportadoras de banda

Las bandas transportadoras de concreto están diseñadas o modificadas especialmente para transportar concreto en estado plástico, desde una fuente de suministro hasta las cimbras u otros lugares, sin tener que usar equipo adicional, excepto el requerido para la compactación. La colocación del concreto por medio de bandas transportadoras debe ser una operación continua. Los mejores resultados se obtienen cuando se cuenta con un suministro constante de concreto mezclado adecuadamente para cargar la banda transportadora, así como los dispositivos necesarios para desplazar el punto de descarga durante la colocación, de manera que el concreto en estado plástico pueda ser depositado en toda el área, sin necesidad de traspalearlo o aplicarle demasiada vibración.

El empleo de transportadoras de bandas, utilizando el sistema de bandas estacionarias así como las bandas operadas sobre camiones, se ha utilizado con éxito en la construcción de concreto masivo. Las bandas transportadoras pueden clasificarse en tres tipos:

1.- Transportadoras portátiles o auto suficientes. Para colocaciones a corta distancia o a poca altura, es necesario el uso de bandas transportadoras portátiles. Este equipo puede diferir de un fabricante a otro, pero todos tienen ciertas características básicas. La más importante es que cada unidad es autosuficiente y se puede desplazar con facilidad por toda la obra. Cada unidad debe tener su propia fuente de energía, ya que ningún equipo se puede considerar verdaderamente portátil si depende de una fuente de energía estacionaria. Las bandas transportadoras portátiles son impulsadas por motores de gasolina, y utilizan sistemas de transmisión hidráulica para dar impulso a la banda.

Estos sistemas poseen una buena relación entre potencia y peso de la carga, y tienen la capacidad de arrancar y parar con la banda cargada sin peligro de sufrir fallas mecánicas. Estos transportadores están equipados con un mecanismo de elevación por pluma y pueden ser auto propulsados y poseer dirección motriz. La descarga del concreto desde una banda transportadora portátil se puede llevar a cabo a través de un canalón que se desplaza sobre un arco de 360°, cuando la colocación se realiza en lugares profundos o debajo del nivel del suelo.

Las bandas transportadoras portátiles, son de gran ayuda en este tipo de construcción, debido a la gran versatilidad de uso; ya que se puede colocar concreto con bastante facilidad, en secciones estructurales delgadas como, muros, columnas.

El costo de instalación de las bandas transportadoras portátiles es substancialmente menor al de otros tipos de transportadores, y se pueden usar en trabajos donde se necesite un volumen pequeño de concreto. En trabajos masivos, se pueden emplear varios transportadores portátiles para manejar simultáneamente volúmenes de concreto por separado en sitios distantes, o bien, combinarse para obtener una gran capacidad en colocaciones de grandes volúmenes. A continuación se enuncian algunas características de una banda transportadora portátil:

Distancia máxima horizontal de la pluma: 60 m.

Inclinación máxima de pluma sobre el nivel de terreno: 30°

Inclinación máxima de pluma bajo el nivel de terreno: 15°
Capacidad máxima. de transporte: 500 m³/hr.

2.- Transportadoras de alimentación en serie. La colocación del concreto a largo alcance hace necesario el uso de bandas transportadoras de alimentación, que operan en serie con puntos extremos de descarga para la transferencia. El criterio principal para diseñarlas debe considerar un sistema múltiple de transportadores que operen conjuntamente dentro de un sistema integrado y que, además, prevengan, automáticamente las sobrecargas en cualquier unidad individual o punto de transferencia.

Este tipo de bandas transportadoras normalmente se usa para colocar grandes volúmenes de concreto, ya que requieren de mucho tiempo para su instalación y puesta en marcha.

Para simplificar los problemas de control y coordinación, las bandas transportadoras de alimentación vienen equipadas con motores eléctricos de corriente alterna, de manera que la velocidad de la banda transportadora es controlada por la fuente de energía.

En los sistemas de largo alcance, es importante que los transportadores arranquen automáticamente y en secuencia, empezando por el de descarga, y de allí los demás sucesivamente, hasta llegar al punto de carga por intervalos. No es conveniente que todos los motores eléctricos arranquen simultáneamente cuando las bandas están cargadas, pues la corriente de arranque es mucho mayor que la de marcha continua.

Las bandas no pueden manejar picos en su operación, por lo que es importante que el sistema asegure que cada unidad está operando a la velocidad correcta antes de descargar el concreto en la banda. Esta medida evitará derramamientos de concreto y obturaciones en los puntos de transferencia. Los transportadores de alimentación se operan sobre un riel o trayectoria de fácil instalación, lo que permite que el tren alimentador sea ampliado o reducido, sin interrumpir la colocación del concreto. El desarrollo de este sistema hizo posible el uso de unidades más grandes en el tren alimentador. Los transportadores más grandes disminuyen el costo del equipo por metro de alcance, pero pueden aumentar el costo de su traslado hasta el sitio de la obra y el tiempo de instalación del sistema. La selección de la longitud del equipo para un proyecto específico está en función de la importancia relativa de estos diferentes factores.

La mayoría de los transportadores de alimentación emplean bandas de 0.6 m de ancho, que corren a velocidades relativamente altas, superiores a los 150 m/min. Estos alimentadores poseen una capacidad para colocar el concreto mayor a los 92 m³/hr.

Generalmente, los trenes de los transportadores de alimentación quedan completamente instalados antes de que se inicie la colocación del concreto. Como se mencionó con anterioridad, las unidades individuales se pueden manejar sobre el riel para extender o acortar el sistema sin interrumpir la colocación. En proyectos grandes se pueden instalar bandas transportadoras de alimentación de concreto relativamente permanentes. Bajo estas condiciones, es posible usar unidades mucho más largas. Debido a que las bandas transportadoras de alimentación mueven estos grandes volúmenes de concreto, la distribución de este material, en el extremo de descarga o tren, requiere de especial

atención. Por lo general, los transportadores descargan el concreto en un equipo especialmente diseñado para distribuirlo. A continuación se enuncian algunas características del sistema de bandas transportadoras de alimentación en serie:

Capacidad de cada línea transportadora: 500 m³/hr.

Velocidad usual de las bandas: 190 m/min.

Pendientes máximas: 30°.

La banda transportadora de descarga, es movilizada, para distribuir el concreto, por medio de una torre-grúa.

Se emplean revenimientos de 3 a 6 cm.

Las bandas, se cubren para proteger el concreto, del viento y del sol.

3.- Transportadoras de distribución, con descarga radial o lateral. Los distribuidores radiales se instalan en el área de colocación, sobre un soporte en voladizo que usualmente se puede desplazar por un arco de 360° con respecto al punto de descarga. El transportador también se puede extender o acortar considerablemente. Por lo general, los distribuidores radiales en voladizo descansan sobre patas salientes apoyadas en la base donde se vacía el concreto, para resistir el momento de volteo originado por la banda cargada. Los modelos más simples y baratos de este tipo son de operación manual y su longitud no es mayor de 9 m. En caso de que el soporte en voladizo se pueda desplazar sobre un arco de 180°, es posible lograr amplitudes de colocación de hasta 18 m.

Sin embargo, el desplazamiento sobre un arco menor de 120° resulta bastante ineficiente, debido a que se vuelve necesario mover con frecuencia toda la unidad distribuidora radial. Los distribuidores radiales impulsados por motor, que poseen la capacidad de subir o bajar y extender o acortar el transportador por medio de motores, aumentan substancialmente la eficiencia de la distribución radial. Sin embargo, la adición de potencia y aumento de las características de alcance, aumentan el peso total del distribuidor radial y esto, a su vez, incrementa la dificultad y el costo de su instalación, antes de comenzar la colocación del concreto, y su desplazamiento durante el colado.

Las limitaciones del alcance y del peso, de las unidades de distribución radial han sido superadas por medio del uso de transportadores telescópicos de dos o tres secciones montados en el brazo de una grúa hidráulica. Existen modelos disponibles que poseen un alcance radial hasta 20 m en unidades pequeñas y de 38 m en unidades más grandes. Las unidades mayores tienen un alcance vertical de 23 m con el brazo inclinado a 30°.

Otras ventajas de los distribuidores radiales son su rápida instalación y su capacidad para superar los obstáculos que se interpongan en la colocación del concreto. Además en si, estos distribuidores constituyen una obstrucción mínima en el área de colocación. Sin embargo, también poseen una desventaja: la pérdida de eficiencia en las colocaciones rectangulares, en donde los requerimientos del radio de desplazamiento se establecen por la distancia del centro al punto más alejado de colocación.

Para colocaciones de grandes cantidades, el método más eficiente, en lo que respecta al equipo y a la forma de colocación para acabados con equipo mecánico, se logra por medio de transportadoras.

3.7.5 Preparación Antes de la Colocación

La preparación previa al colado de concreto incluye diversas actividades, como el humedecimiento de la superficie, el montaje de las cimbras, colocación de tapa juntas, instalaciones de serpentines (cuando se realizará un poseenfriamiento) inyección de juntas, la fijación segura en el concreto del acero de refuerzo y de los demás accesorios que vayan a quedar ahogados.

Las cimbras son los moldes dentro de los cuales se coloca el concreto, y el andamiaje es el apoyo estructural y apuntalamiento que se requiere para el apoyo temporal durante la construcción. El diseño de la cimbra debe quedar establecido antes de la construcción de la misma. Las cimbras se deben construir con la suficiente resistencia y rigidez para cargar la masa y la presión del fluido de concreto, de los materiales y equipo que se vayan a colocar sobre ellas. La presión del fluido hidráulico sobre las cimbras debe estar correlacionada con la capacidad y tipo del equipo de colocación, la velocidad planeada de colocación del concreto, el revenimiento, la temperatura y las características de endurecimiento del concreto.

Las juntas, esquinas, uniones e intersticios de los paneles de las cimbras, deben estar lo suficientemente bien ajustadas como para contener el mortero. La consolidación fluidificará el mortero en el concreto permitiendo fugas desde cualquier abertura en la cimbra, y dejando vacíos, filones de arena o bolsas de grava.

Cuando las cimbras se colocan para coladas sucesivas, las protuberancias en juntas horizontales se pueden evitar, si se montan de nuevo las cimbras con sólo 2.5 cm de traslape al concreto, debajo de la línea hecha por el listón de la colada anterior y fijando y atornillando con firmeza las cimbras cerca de la junta. Las tiras con aristas biseladas también se pueden utilizar para ocultar juntas de construcción, mejorando la apariencia cuando están bien dispuestas.

Las caras de las cimbras se deben tratar para evitar que el concreto se pegue a éstas, el descimbrado se facilite y la estructura no se deteriore.

Mientras no exista lechada, polvo o partículas sueltas, el concreto recién colado ya endurecido necesita poca preparación antes de colar el concreto fresco sobre él. El concreto viejo normalmente requiere de limpieza mecánica y de picado antes de colar encima algún concreto nuevo. Cuando el concreto fresco se cuele sobre un concreto recién endurecido, se deberán tener en consideración ciertas precauciones para asegurar la obtención de una junta bien enlazada y hermética. La superficie de la junta de concreto debe estar saturada y superficialmente seca al momento en que se coloque sobre ella nuevo concreto. El concreto endurecido deberá estar limpio y sano, bien nivelado y razonablemente áspero con algunas partículas expuestas de agregado grueso. Cualquier lechada, mortero suave, polvo, astillas de madera, aceite proveniente de la cimbra o cualquier otro material extraño interferirá en el enlace adecuado del colado subsiguiente.

La superficie del concreto viejo sobre la que se va a colar deberá rasparse y limpiarse perfectamente de cualquier partícula de polvo, películas superficiales, depósitos, partículas

sueltas, grasa, aceite y cualquier otro material. En la mayoría de los casos es necesario retirar toda la superficie hasta encontrar concreto sano. El labrado y limpieza con chorro de agua constituye un método satisfactorio para dejar expuesto al concreto sano. Este equipo de limpieza retira la superficie del concreto por medio de chorros de agua a presiones elevadas de 1200 kg./cm² hasta 3850 kg./cm².

Las juntas de construcción ocurren siempre que el colado del concreto se detiene o se demora. Es decir, que el concreto fresco colocado subsecuentemente contra el concreto endurecido, no puede adherirse a la colocación previa. Las juntas horizontales de construcción ocurren en los niveles entre coladas, mientras que las verticales se presentan cuando la estructura es de tal tamaño que no es posible colocar la extensión completa en una operación continua. En general, la preparación de una junta vertical de construcción para un comportamiento y apariencia aceptable, es la misma que para juntas horizontales.

La superficie limpia de la junta de concreto debe estar saturada y superficialmente seca al momento en que se coloque sobre ella nuevo concreto. La humedad de la superficie debilita la junta e incrementa la relación agua-cemento del concreto recién colocado. Hay que asegurarse de que la primera capa de concreto en la junta de construcción esté adecuadamente consolidada para lograr una buena adherencia.

Para las juntas constructivas horizontales en secciones de muros en las que se vaya a colar concreto fresco sobre concreto endurecido, la experiencia de campo indica que se puede obtener una buena liga colocando una buena mezcla rica de concreto con contenidos de cementos y arena mayores de lo normal en la parte inferior del nuevo colado y vibrándolo perfectamente en la interfase con la junta.

Se debe realizar una inspección final detallada de las cimbras, tapa juntas, refuerzo, elementos ahogados y otros detalles de la colocación del concreto antes de que se coloque.

3.7.6 Colocación

El equipo y el método utilizados para colocar concreto masivo deben evitar la separación de agregado grueso del concreto. Aunque no son objetables los pedazos dispersos de agregado grueso, si lo son las aglomeraciones o bolsas (bolsas de concreto húmedas en la superficie pero secas en su interior), por lo que éstas se deben romper e integrar o desechar antes de colocar el concreto. El agregado segregado no se eliminará con operaciones subsecuentes de colocación y consolidación.

El concreto se colocará en capas horizontales de 38 a 60 cm. de espesor y evitando capas inclinadas y juntas frías, en el caso de grandes pilas se podrán realizar colados continuos en toda su longitud. Para construcción monolítica, cada capa de concreto se debe colocar mientras que la capa subyacente aún sea sensible a la vibración; así mismo las capas deben ser lo suficientemente delgadas para permitir que dos capas queden bien unidas por una vibración apropiada. El método escalonado de colocación se debe emplear en estructuras masivas donde se abarcan grandes áreas, para impedir la formación de juntas frías. En este método, la colocación de concreto se hace por una serie de capas horizontales escalonadas. La colocación del concreto en cada capa se extiende por la anchura total del bloque, y las

operaciones de colocación progresan desde un extremo de la elevación hacia el otro, exponiendo solamente pequeñas áreas de concreto a la vez. Al progresar la colocación, parte de la misma estará ya terminada, mientras que ésta continuará en lo que queda.

El equipo debe disponerse de tal manera que el concreto tenga una caída vertical libre máxima de 1.5 m hasta el punto de colado o hasta el interior del contenedor que lo reciba. El chorro de concreto no debe separarse, permitiendo que caiga libremente sobre varillas, espaciadores, refuerzos u otros materiales ahogados. Si las cimbras están suficientemente abiertas y libres, de manera que no estorben la caída vertical del concreto en el lugar de colocación, generalmente es preferible la descarga directa y sin el empleo de tolvas, conductos o vertedores. El concreto debe ser depositado cerca o en su posición final durante su colocación, ya que presenta la tendencia a segregarse cuando tiene que hacerse fluir lateralmente hasta su lugar.

Si se desea colocar concreto de manera monolítica se debe programar una demora que permita el asentamiento del concreto inferior antes de colocar la siguiente capa de concreto. El tiempo de demora dependerá de la temperatura y las características del fraguado de concreto que se emplee, generalmente alrededor de 1 hora, pero la colocación se debe empezar lo suficientemente pronto como para permitir la liga de la capa nueva con la anterior por medio de vibración.

Al elegir el equipo de colocación se debe considerar su capacidad para colocar el concreto en el sitio correcto de manera económica y sin alterar su calidad. La selección del equipo es influenciada por el método de producción del concreto. Ciertos tipos de equipos tales como tolvas, cucharones, etc., serán mejores para producción intermitente, mientras que otros equipos, como bandas transportadoras fijas, bandas transportadoras montadas sobre camiones y bombas, son más apropiadas para producción continua. El colado deberá comenzar a lo largo del perímetro en un extremo del área de trabajo descargando cada mezcla contra el concreto previamente colado. En general el concreto deberá colarse en capas horizontales de espesor uniforme, consolidando adecuadamente cada capa antes de colar la siguiente.

3.7.7 Compactación

La compactación es el proceso que permite eliminar la concentración de piedras, agujeros y aire atrapado en el concreto fresco así como amoldarlo dentro de las cimbras, la vibración interna es el método más eficaz para consolidar concreto plástico para la mayor parte de las aplicaciones. La efectividad de un vibrador interno depende principalmente del diámetro de su cabeza, de la frecuencia y de su amplitud. Los vibradores no se deben emplear para mover concreto en sentido lateral, y deben insertarse y quitarse verticalmente a intervalos próximos, usando un patrón sistemático de vibración para asegurar que todo el concreto haya sido adecuadamente compactado.

Mientras que un vibrador funcionando continúe introduciéndose en el concreto por su propio peso, no es demasiado tarde para que el concreto se beneficie por revibración, con aumento de resistencia a compresión y adherencia. No existe evidencia de ningún efecto perjudicial sobre el refuerzo introducido o sobre el concreto en niveles parcialmente

endurecidos cuando están revibrados desde arriba por esfuerzos de consolidación en concretos frescos.

En las colocaciones inusualmente difíciles y obstruidas se puede requerir de alguna forma suplementaria de vibración; en estas circunstancias se debe tener cuidado para evitar una operación excesiva de las unidades de vibración y que podría causar una débil capa de pasta superficial.

En superficies verticales, en las cuales son indeseables los vacíos de aire, la experiencia ha demostrado que los vacíos se pueden reducir mediante el uso de vibración adicional. Sin embargo, ni la vibración extra, ni otra clase de manipulación mecánica del concreto, pueden eliminar los hoyos formados por vacíos de aire de superficies moldeadas bajo cimbras inclinadas.

Operarios experimentados y competentes, que trabajen con vibradores con un buen mantenimiento, y con suficientes unidades de reserva, son esenciales para una exitosa compactación del concreto fresco.

En grandes aplicaciones, que por lo general es el caso del concreto masivo se pueden usar grupos de vibradores operados mecánicamente, por ejemplo utilizar retroexcavadoras adaptándoles vibradores a cada una de ellas, cubriendo así un área mayor de vibrado en un tiempo menor y con una mayor eficiencia. Es posible compactar también con algún equipo pesado, por ejemplo un tractor.

3.7.8 Curado

Para lograr un concreto de buena calidad, la colocación adecuada de la mezcla deberá ir seguida del curado, en un medio ambiente propicio durante las etapas tempranas del fraguado. Se llama curado al procedimiento que se utiliza para promover la hidratación del cemento, y consiste en un control del movimiento de temperatura y humedad hacia adentro y hacia afuera del concreto.

El curado del concreto consiste en mantener un contenido satisfactorio de humedad, y temperatura en el concreto recién colado, para que puedan desarrollarse las propiedades deseadas. El curado tiene una gran influencia sobre las propiedades del concreto endurecido como lo son durabilidad, resistencia, hermeticidad, resistencia a la abrasión, estabilidad volumétrica, resistencia a la congelación y deshielo y a las sales para descongelar.

Los objetivos del curado son: a. Prevenir (o reaprovisionar) la pérdida de humedad del concreto. b. Mantener una temperatura favorable en el concreto durante un período definido.

Existen diversos materiales, métodos y procedimientos para el curado del concreto, pero los principios son los mismos: garantizar el mantenimiento de un contenido satisfactorio de humedad y temperatura para que se desarrollen las propiedades deseadas. Los dos sistemas para obtener un contenido satisfactorio de humedad son los siguientes:

* La continua o frecuente aplicación de agua por anegamiento, aspersion, vapor o cubiertos de materiales saturados, como mantas de yute o algodón, alfombras, tierra o arena.

* Evitar la pérdida excesiva de agua en la superficie del concreto, mediante el empleo de materiales tales como las hojas de plástico o de papel impermeable, o bien mediante la aplicación de compuestos de curado formadores de membrana sobre el concreto recién colado.

Capítulo 4

Control de la Temperatura

4. Control de Temperatura en Estructuras de Concreto Masivo.

La característica más importante del concreto masivo que lo diferencia de otros tipos de concretos estructurales es su comportamiento térmico, en general las grandes dimensiones de las estructuras de concreto masivo producen grandes diferenciales de temperatura entre el interior y la superficie exterior de la estructura, es decir, a medida que la temperatura del concreto en el interior aumenta y el concreto se expande, la superficie puede estar enfriándose y contrayéndose lo que provoca cambios volumétricos diferenciales, si a esto se le añade las posibles restricciones al libre movimiento del concreto tendremos como resultado, deformaciones y tensiones que pueden causar grietas que perjudican la estructura diseñada.

En el concreto masivo las contracciones por temperatura y las tensiones se desarrollan por dos fenómenos: por la disipación del calor de hidratación del cemento y por los cambios periódicos en la temperatura entre el concreto y el ambiente

Debido a que el concreto tiene una baja conductividad térmica, el calor generado en el interior de la estructura se disipa muy lentamente, a menos que se enfríe artificialmente.

El calor escapa del concreto a una velocidad que es inversamente proporcional al cuadrado de su menor dimensión, por ejemplo, un muro de espesor de 15 cm enfriándose por los dos lados llevaría 1.5 horas para disipar 95% de calor desarrollado. Un muro con espesor de 1.5 m llevaría una semana entera para disipar la misma cantidad de calor. Si el espesor es de 15 m, lo que puede representar el espesor de una cortina de arco, se requerirán 2 años (ACI 207).

No existe un tamaño de elemento específico de una estructura que al ser superado pueda clasificarse como concreto masivo. Muchos elementos estructurales de grandes dimensiones pueden no ser suficientemente masivos para que se deba considerar el calor generado. Esto es crítico principalmente cuando las dimensiones mínimas de la sección transversal se acercan o superan 1 metro o cuando el contenido de cemento supera 355 kg/m³, según lo recomendado por el comité ACI 207, además que en la misma definición del ACI 116R “El Concreto Masivo es cualquier volumen de concreto con dimensiones lo suficientemente grandes para requerir que se tomen las medidas necesarias para hacer frente a la generación de calor por hidratación del cemento y el consecuente cambio de volumen, con el fin de minimizar el agrietamiento” no se especifica un espesor determinado.

El aumento de temperatura en el concreto masivo se relaciona con su temperatura inicial, la temperatura ambiente, el tamaño del elemento de concreto (relación volumen-área superficial y dimensión mínima) y el tipo y la cantidad de los materiales cementantes. Por lo general la hidratación del cemento producirá una elevación de la temperatura del concreto de 5 a 8° C por cada 60 kg. de cemento. Elementos pequeños de concreto (menos de 0.3 m de espesor), con cantidades moderadas de material cementante, son de poco interés, pues el calor generado se disipa rápidamente.

A fin de evitar el agrietamiento, no se debe permitir que la temperatura interna del concreto en presas y en otras estructuras reforzadas de concreto, que posean relativamente baja resistencia a compresión, exceda en más que 11°C a 14°C el promedio anual de temperatura ambiente. (ACI 308)

Otra regla indica que la diferencia de temperaturas entre el interior y exterior del concreto no debe exceder en ningún momento de 20°C. (FitzGibbon 1977 y Dintel y Ghosh 1978).

Por otro lado, es importante señalar que en climas calidos (ACI 305) deberá tenerse en cuenta la perdida de humedad en el concreto por la evaporación superficial a fin de evitar el agrietamiento por contracción plástica. En este sentido, el mismo comité 305 proporciona una gráfica (figura 4.1) para evaluar el efecto de la temperatura del concreto y del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento sobre la rapidez de evaporación, si ésta se aproxima a 1.0 kg/m²/h, es necesario tomar precauciones contra el agrietamiento por contracción plástica. (Lerch 1957)

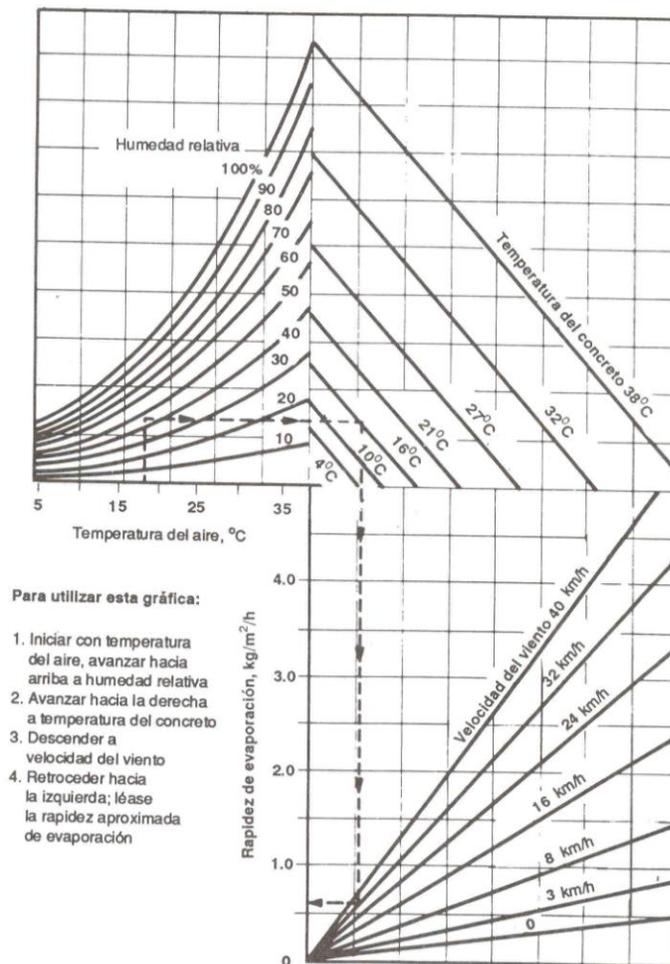


Fig. 4.1 Efecto de la temperatura del concreto y las condiciones ambientales en la rapidez de evaporación de la humedad superficial del concreto

En estructuras masivas que tengan una relación volumen-superficie grande, se puede obtener una estimación del aumento de temperatura adiabática con la siguiente ecuación:

$$T = C \cdot H / S$$

Donde

- T = aumento de temperatura en el concreto, en grados centígrados, provocado por la generación de calor del cemento en condiciones adiabáticas
- C = proporción de cemento en el concreto en peso
- H = generación de calor debida a la hidratación del cemento en kCal por kilogramo
- S = calor específico del concreto, kCal por kilogramo por grado centígrado

Si suponemos un concreto que pesa 2350 Kg/m³ y que contiene 210 Kg de cemento CPO por metro cúbico, $C = 210/2350 = 0.089$

De la fig. 4.2 el calor de hidratación del cemento (CPO) a siete días es igual a 83 kCal por kg de cemento. Si el calor específico del concreto varía de 0.20 a 0.28 kCal por kg por grado centígrado (0.840 a 1.170 kJ/kg°K según inciso 4.1.2, recordando el factor de conversión de 4.18 Joules = 1 caloría), supongamos un valor de S igual a 0.24, entonces el aumento de la temperatura será:

$$T = 0.089 \cdot 83 / 0.24 = 30.8^\circ \text{C a 7 días}$$

Lo que indica que si la temperatura de colocación del concreto es de 20° C, en el interior del elemento se alcanzará una temperatura de $20 + 30.8 = 50.8^\circ \text{C}$, suponiendo que no hay pérdida de calor.

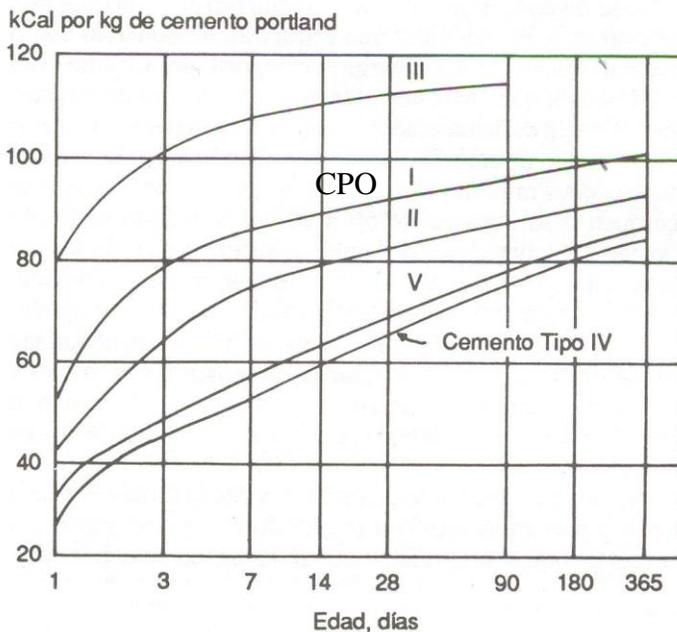


Fig. 4.2 Curvas típicas de calor de hidratación para diversos tipos de cemento

Cálculo de la temperatura máxima del concreto masivo (ACI 207 2R)

La velocidad y magnitud de la generación de calor del concreto depende de la cantidad por unidad de volumen del cemento y puzolanas (si se utilizan), de la composición y finura del cemento y de la temperatura durante la hidratación del cemento (variable a lo largo del día y de los días). La temperatura de hidratación a su vez es afectada por la pérdida o ganancia de calor que depende del tamaño del elemento y las condiciones de exposición al medio ambiente. Como se puede observar la temperatura exacta del concreto en un tiempo determinado depende de muchas y complejas variables, lo que dificulta su cálculo, sin embargo el problema puede ser simplificado si suponemos que la temperatura de colocación del concreto y la temperatura del ambiente (aire) es la misma y si hacemos uso de la relación volumen del elemento entre su superficie expuesta (V/S), que representa el promedio de la distancia que debe recorrer el calor para disiparse del concreto.

Para calcular la temperatura pico haciendo uso de la fig. 4.3 bajo la siguientes condiciones: cemento tipo I (CPO) con 223 kg / m^3 , superficie seca o húmeda; se entra con la relación V/S hasta encontrar la curva que corresponde a la temperatura de colocación y posteriormente por medio de un línea horizontal obtener en el eje de las ordenadas la elevación de la temperatura, finalmente la temperatura pico será la suma de la temperatura encontrada en la figura mas la temperatura de colocación.

Se debe tomar en cuenta que la temperatura encontrada se da con ciertas condiciones y que estas pueden variar por lo que se hará necesario realizar los ajustes correspondientes con la finalidad de obtener un resultado de acuerdo a las condiciones particulares de cada elemento de concreto masivo, es decir:

- a. La temperatura en el elemento no es la misma, se tendrá mucho calor en el centro y casi a temperatura del aire en la superficie.
- b. La cimbra funcionará como un aislante que retrasa el intercambio de calor
- c. La difusividad del concreto varía, por lo cual se tendrá que ajustar por medio de una relación entre la difusividad real y la del concreto de la figura 4.3.
- d. El tipo de cemento y su finura hará cambiar la temperatura máxima por lo que se ajustará de acuerdo a la relación de sus temperaturas adiabáticas.
- e. La cantidad de cemento será otro factor que hará variar la temperatura, su ajuste se hará con la relación de entre la cantidad de cemento real y los 223 kg/m^3 empleados en los resultados de la figura 4.3.

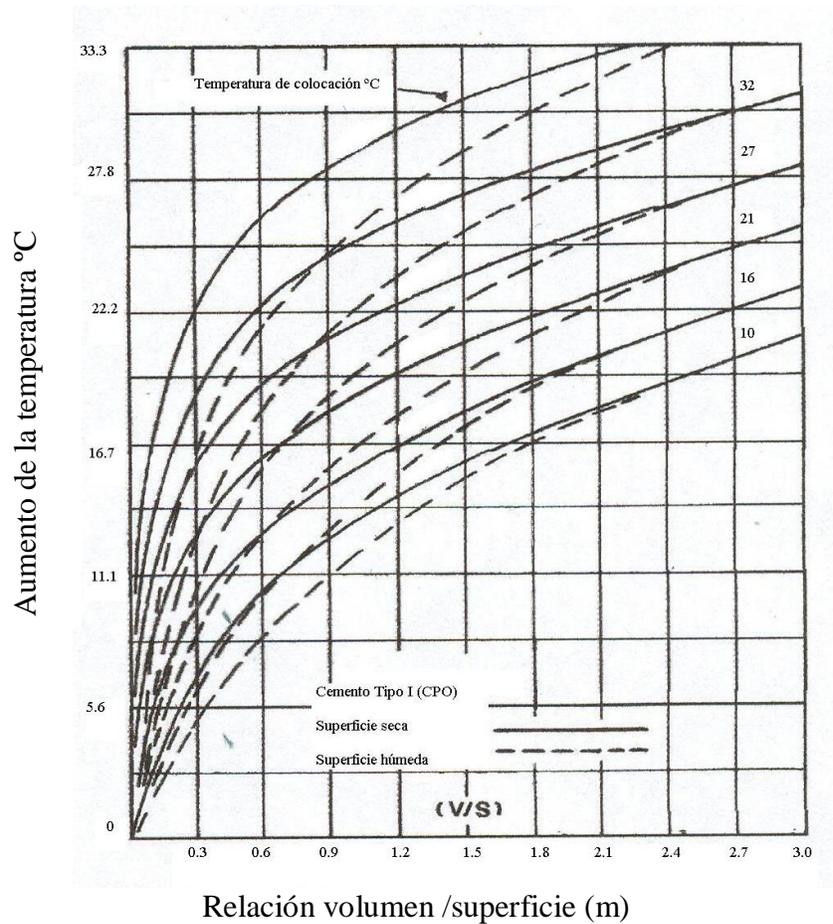


Fig. 4.3 Aumento de la temperatura del concreto para diversas temperaturas de colocación
 223 kg/m³ de cemento
 Difusividad 0.0046 m/hora
 Temperatura de colocación igual a la del aire
 ACI 207.2R 95

Estimación de la temperatura del concreto fresco.

A continuación se presentan las ecuaciones para estimar la temperatura **T** del concreto recién mezclado. (ACI-305R-99)

Sin agregar hielo (unidades SI):

$$T = \frac{0.22 (T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_w a}{0.22 (W_a + W_c) + W_w + W_w a} \quad (1)$$

Con hielo (unidades SI):

$$T = \frac{0.22 (T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_{wa} - 79.6 W_i}{0.22 (W_a + W_c) + W_w + W_i + W_{wa}} \quad (2)$$

donde:

T_a = temperatura del agregado

T_c = temperatura del cemento

T_i = temperatura del hielo (se utilizará en la expresión 3)

T_w = temperatura del agua dosificada de mezclado tomada de la fuente de abastecimiento normal sin incluir el hielo.

(Nota: Se supone que la temperatura de agua libre y del agua absorbida por el agregado es igual a la temperatura del agregado. Todas las temperaturas están expresadas en grados Celsius.)

W_a = peso seco del agregado

W_c = peso del cemento

W_w = peso del agua de mezclado dosificada

W_{wa} = peso del agua libre y absorbida por el agregado a la temperatura T_a

W_i = peso del hielo

(Nota: Todos los pesos están expresados en kg)

Para aplicar la ecuación (2) al cálculo de la temperatura del concreto con hielo se supone que el hielo está en su punto de fusión. Una forma más exacta sería recurriendo a la ecuación (3) que incluye la temperatura del hielo.

Con hielo incluyendo su temperatura (unidades SI):

$$T = \frac{0.22 (T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w}{0.22 (W_a + W_c) + W_w + W_i + W_{wa}} + \frac{T_a W_{wa} - W_i (79.6 - 0.5 T_i)}{0.22 (W_a + W_c) + W_w + W_i + W_{wa}} \quad (3)$$

Los cuatro elementos principales para un efectivo programa de control de temperatura que pueden ser usados para un proyecto de concreto masivo son:

1. El control del contenido de materiales cementantes, opciones de tipos (cementos Pórtland y puzolanas) y cantidades para minimizar la generación de calor en el concreto
2. El preenfriamiento, que busca bajar la temperatura de colado del concreto por medio del enfriamiento de sus ingredientes.
3. El posenfriamiento, que pretende limitar el aumento de la temperatura de la estructura, removiendo el calor por medio de un serpentín frió embebido en el concreto.
4. El procedimiento constructivo, para proteger a la estructura de excesivos diferenciales de temperatura debido al manejo del concreto y programa de construcción.

El control de temperatura para una estructura pequeña puede no necesitar mas que una medida, como pudiera ser un colado nocturno, pero en el otro extremo algún gran proyecto puede justificar un amplio uso de medidas que incluyan los cuatro elementos arriba mencionados.

El aumento de la temperatura interna del concreto se puede controlar de varias maneras:

- (1) bajo contenido de cemento, 120 a 270 kg/m³,
- (2) agregados grandes, 75 a 150 mm,
- (3) alto contenido de agregado grueso, hasta 80% del contenido total de agregados,
- (4) cemento de bajo calor de hidratación,
- (5) puzolanas, el calor de hidratación de la puzolana puede ser del 25% al 75% del cemento
- (6) reducción de la temperatura inicial del concreto para aproximadamente 10°C a través del enfriamiento de los ingredientes del concreto,
- (7) enfriamiento del concreto, a través de la inserción de tubería de enfriamiento,
- (8) cimbras de acero para la disipación rápida del calor,
- (9) curado con agua y
- (10) colados pequeños, 1.5 m o menos.

4.1 Características Térmicas del Concreto

4.1.1 Coeficiente de expansión térmica.- La composición mineral de los agregados, que forman del 70 al 85% del volumen del concreto, son el mayor factor que afecta el coeficiente lineal de la expansión del concreto. La pasta de cemento endurecido tiene un mayor coeficiente que el agregado, y es particularmente influenciado por su contenido de humedad. El coeficiente de la pasta de cemento endurecido en condición de secada al aire podría ser dos veces menor que secado en horno o en condición de saturación. El coeficiente de expansión para el concreto es esencialmente constante sobre el rango de temperatura normal y tiende a incrementarse con el incremento del contenido de cemento y decrece con la edad. El rango típico de valores dados en la tabla 4.1 representa mezclas de

concreto con relación arena - grava de 30 - 70, un alto grado de saturación, y un contenido de cemento de 237 kg/m³.

Agregado grueso	Coefficientes de expansión térmica millonésimas por °C
Cuarcita	13.5
Con Sílice	9.4 – 11.7
Basalto	8.3
Caliza	5.4 – 8.6

Tabla 4.1 Coeficientes de expansión térmica del concreto (ACI 207.4R)

4.1.2 Calor específico (capacidad térmica del concreto) esta definido como la cantidad de calor requerido para elevar una unidad masa un grado de temperatura. La capacidad térmica específica en el concreto es aproximadamente 0.963 kJ/kg °K, aunque puede variar desde 0.840 a 1.170 kJ/Kg K para un amplio rango de condiciones y materiales. Los valores para componentes de la mezcla pueden ser tan bajos como 0.67 para algunos cementos y agregados hasta 4.18 para el agua. La temperatura de la mezcla de concreto se ve influenciada por cada componente de la mezcla y el grado de la influencia depende del componente de temperatura individual, calor específico y proporción en la mezcla.

4.1.3 Conductividad térmica.- La conductividad térmica es una medida de la capacidad del concreto para conducir calor, se define como la relación entre el flujo de calor y el gradiente de temperaturas, causante del movimiento del calor. Las características mineralógicas de los agregados, y su contenido de humedad, la densidad, y la temperatura del concreto influyen la conductividad. Para las temperaturas normales del concreto en construcciones de concreto masivo, y por el alto contenido de humedad existente en el concreto a temprana edad, en la tabla 4.2 se presentan conductividad térmica típicas.

Tipo de agregado	Conductividad térmica (Kt) W/m°K
Cuarcita	3.5
Dolomita	3.2
Caliza	2.6-3.3
Granito	2.6-2.7
Riolita	2.2
Basalto	1.9-2.2

Tabla 4.2 Valores típicos de la conductividad térmica del concreto (ACI 207.4R)

4.1.4 Coeficiente de difusión térmica.- La difusión térmica es un índice de la facilidad o dificultad con la que el concreto experimenta los cambios de temperatura, y numéricamente el coeficiente de difusión δ es la conductividad térmica Kt dividida entre el producto de la densidad p y el calor específico S

$$\delta = Kt / p S$$

Para el concreto de peso normal, donde la densidad y las variaciones del valor del calor específico se presentan en rangos estrechos, la difusión térmica refleja los valores de la conductividad. La conductividad alta indica mayor facilidad en ganar o perder calor.

Agregado grueso	Coefficiente de difusión térmica m ² /h
Cuarcita	0.0054
Dolomita	0.0047
Caliza	0.0046
Granito	0.0040
Riolita	0.0033
Basalto	0.0030

Tabla 4.3 Difusión térmica de acuerdo al tipo de roca (ACI 207.4R)

4.2 Propiedades Elásticas del Concreto.

Antes de medir el módulo de elasticidad, los cambios de volumen ocurren sin el desarrollo de tensiones. En algún momento después del colado el concreto empezará a tener comportamiento elástico. Esto puede ocurrir en pocas horas para mezclas con alto contenido de cemento sin aditivos retardantes y colocado a temperaturas cálidas de alrededor de 24° C. Para mezclas de bajo contenido de cemento con retardantes y colocadas a muy baja temperatura, esto ocurrirá después de uno o dos días.

Ante todo, por conveniencia, un día, es el tiempo frecuentemente usado como más temprano durante el cual la tensión causada por la temperatura puede ocurrir. La edad exacta no es importante, porque el módulo de elasticidad será de inicio bajo. En la tabla 4.4 están dados valores típicos de módulos de elasticidad en gigapascuales para carga instantánea y sostenida, para 4 concretos masivos convencionales con diferentes agregados gruesos.

Edad de carga, (días)	GPa							
	Basalto		Andesita-pizarra		Arenisca		Arenisca-cuarcita	
	E	E'	E	E'	E	E'	E	E'
2	12	5.7	9.7	3.7	19	10	9.7	4.3
7	16	7.6	14	6.9	29	13	15	6.5
28	24	12	24	12	31	18	25	12
90	28	17	30	19	36	22	29	18
365	34	21	32	24	39	25	32	21

TMA de 38 mm.

E: módulo de elasticidad instantáneo

E': módulo de elasticidad sostenido después de 365 días bajo carga

ACI 207.4R

Tabla 4.5 Módulos de elasticidad instantáneos y sostenidos para concretos masivos convencionales

4.2.1 Capacidad de deformación

Diseños basados en la capacidad de deformación más que en el esfuerzo son convenientes donde el criterio de diseño está expresado en términos de cambios lineales o volumétricos, por ejemplo el fenómeno de contracción por secado o altas temperaturas por el calor de hidratación. Para estos casos se emplean pruebas de módulo de ruptura como una medida de la capacidad del concreto masivo para resistir deformaciones por tensión.

Las vigas para pruebas de deformación por tensión son de 300x300x1600 mm no reforzadas, probadas a la falla bajo carga en tres puntos. Los esfuerzos en la fibra extrema en tensión son medidos directamente en el espécimen de prueba. En el periodo de carga inicial a los 7 días, un espécimen es cargado a la falla en unos pocos minutos (prueba rápida). Al mismo tiempo, se inicia la carga para probar una viga compañera, con carga semanalmente adicionada en una magnitud 0.17 Mpa/semana, la cual va a resultar en la falla de la viga en alrededor de 90 días.

Los resultados de la capacidad de deformación por tensión típicos se muestran en la tabla 4.6 que son de gran ayuda en el establecimiento de los procesos de control de grietas del concreto.

El comité ACI 207 4R propone el siguiente ejemplo, para determinar la máxima diferencia de temperatura entre el interior y exterior del elemento de concreto con el fin de evitar deformaciones que den por resultado agrietamientos indeseables, suponiendo que el primer concreto en la tabla 4.6 tuviera el coeficiente de expansión térmico de 9.9 millonesimas/°C (Tabla 4.1), debe usarse suficiente aislamiento para evitar una caída brusca de la temperatura en la superficie mayor que $64/9.9 = 6.5$ °C en tempranas edades, y $88/9.9 = 8.9$ °C en edades de tres meses o mayores. En el caso de usar tubería embebida para el enfriamiento la caída total de temperatura no debe exceder de $118/9.9 = 11.9$ °C en el periodo inicial de tres meses.

Un proceso de predicción de la capacidad de deformación abreviada a sido reportado (Liu 1978), pero el sistema es empírico, aproximado y no promete mas de una moderada correlación con los valores medidos.

Componentes del Concreto	Deformación por Tensión (millonésimas)		
	Prueba Rápida (inicio)	Prueba Lenta	Prueba Rápida (final)
Diorita de cuarzo (natural) w/c = 0.66	64	118	88
Diorita de cuarzo (natural) w/(c + p) = 0.63	52	88	73
Granito (triturado) w/(c + p) = 0.60	86	245	110
Caliza (triturada) Arena de cuarzo (natural) w/(c + p) = 0.63	45	95	73
Caliza (triturada) Arena de cuarzo (natural) w/(c + p) = 0.47	62	107	80

Las pruebas se inician a los 7 días
w/c relación agua-cemento
w/(c + p) relación agua- cemento + puzolana
ACI 207.4R

Tabla 4.6 Capacidad de deformación del concreto

4.3 Preenfriamiento

La posibilidad de agrietamiento por tensión térmica debe ser considerada tanto para la superficie como dentro de la masa. Una de las influencias más fuertes para evitar el agrietamiento térmico es el control de la temperatura de colocación del concreto. Generalmente, a menor temperatura del concreto cuando pasa del estado plástico al endurecido, menor será la tendencia a agrietarse. En estructuras masivas, cuando la temperatura de colocación esta 6° C por debajo del promedio de la temperatura del aire, resultará en una baja de alrededor de 3 °C de la máxima temperatura que el concreto alcanzará.

La temperatura de colocación del concreto puede ser elegida de acuerdo a la potencial deformación que resulta del descenso de la temperatura desde el valor del pico inicial hasta la temperatura estable final siempre que no exceda la capacidad de esfuerzos del concreto. El procedimiento es descrito por la siguiente expresión:

$$T_i = T_f + (100 \times C / e_t \times R) - A_t$$

Donde:

T_i = Temperatura de colocación
T_f = Temperatura final estable
C = Capacidad de deformación (en millones)

et = Coeficiente de expansión térmica por grado de temperatura (en millones)

R = Grado de restricción en porcentaje

At = Elevación inicial de la temperatura del concreto

El objetivo del programa de preenfriamiento es imponer un grado de control sobre la influencia de los cambios de temperatura del concreto en la producción de grietas. El diseñador debe saber el tipo y extensión del agrietamiento que puede ser tolerado en la estructura. El propio diseño puede dar cabida a anticipar el agrietamiento. En la mayoría de las circunstancias no es realista esperar que el agrietamiento no ocurra, por lo tanto deben ser implementadas acciones de prevención para combatirlo.

Debido a que los agregados son la mayor parte de la mezcla de concreto, un cambio en la temperatura de los agregados, efectuara un cambio mayor (excepto cuando se usa hielo) en la temperatura del concreto. Como la cantidad de cemento es relativamente pequeña en una típica mezcla de de concreto masivo, su enfriamiento no será significativo para un programa de control de temperatura.

Por conveniencia, la cantidad de concreto y las cantidades de sus componentes, pueden ser consideradas en términos de agua equivalente, en relación a sus capacidades térmicas (calor específico). Un ejemplo del agua equivalente para un metro cúbico de concreto masivo se muestra enseguida.

Materiales	Cantidad/m3	Capacidad térmica	Cantidad de calor/m3	Agua equivalente
	kg	kJ/kg K	kJ/K	Kg
Agregado grueso con 1% de humedad	1672	0.75	1254	300
	17	4.18	71	17
Agregado fino con 5% de humedad	528	0.75	396	95
	26	4.18	109	26
Cemento	117	0.88	103	25
Fly ash	50	0.84	42	10
Agua	82	4.18	343	82
	2492		2318	555

Tabla 4.7 Agua equivalente

En otras palabras un metro cúbico de este concreto requerirá la misma cantidad de enfriamiento para cambiar su temperatura un grado centígrado como requerirá 555 kg de agua.

Puede hacerse un cálculo sencillo de la capacidad de refrigeración que se requeriría para reducir la temperatura de una mezcla a 10° C. Usando la misma mezcla de concreto masivo, de la tabla anterior, el requerimiento de refrigeración para un metro cúbico de mezcla se muestra enseguida.

Materiales	Temperatura inicial (°C)	Diferencia para 10° C (°C)	Agua equivalente (kg)	kJ para 10° C (kJ) *
Agregado grueso húmedo	24	14	317	18551
Agregado fino húmedo	23	13	121	6575
Cemento	49	39	25	4076
Fly ash	23	13	10	543
Agua	21	11	82	3770
Calor por mezclado				1390
				34905

* Producto de: (diferencia para 10° C) x (Agua equivalente) x (4.18)

Se observará que si este concreto es mezclado bajo las condiciones de temperatura inicial, la temperatura de la mezcla de concreto será:

$$10^{\circ} \text{C} + 34,905 \text{ kJ} / (2,318 \text{ kJ /deg K}) = 10^{\circ} \text{C} + 15^{\circ} \text{C} = 25^{\circ} \text{C}$$

Para bajar la temperatura del concreto a 10° C será necesario remover 34,905 kJ del sistema. La temperatura de la mezcla de concreto puede ser disminuida reemplazando toda o una porción del agua de mezclado con hielo, o por el preenfriamiento de los componentes del concreto o por una combinación de ambos procedimientos.

4.3.1 Métodos para el preenfriamiento de los componentes del concreto.

La construcción de estructuras de concreto masivo, principalmente presas, ha conducido a desarrollar y mejorar los procedimientos para reducir la temperatura del concreto mientras permanece plástico, así como de sus componentes, dando como resultado la disminución del agrietamiento del concreto cuando esta endurecido.

Los componentes del concreto pueden ser preenfriados de muchas maneras. El agua puede ser enfriada o sustituir una parte del agua por hielo. En este caso debe darse atención al suministro de los materiales al mezclador y al tiempo de mezclado. Los almacenes de agregados pueden ser sombreados. Los agregados pueden ser procesados y clasificados utilizando agua fría. Métodos para enfriar los agregados, los cuales son potencialmente una gran forma de remover el calor de la mezcla, puede consistir desde esparcir agua en los almacenes para suministrar enfriamiento por evaporación, esparcir agua fría sobre los agregados que se mueven en la banda transportadora, inmersión de los agregados en tanques con agua fría, soplar aire enfriado a través de las tolvas hasta forzar la evaporación del agua en almacenes aislados. Mientras que el uso más común del nitrógeno líquido es para enfriar el concreto durante su mezcla, el éxito de enfriar la mezcla es resultado del enfriamiento de agregados con nitrógeno y enfriamiento del concreto en puntos de transferencia. Introducción de nitrógeno líquido dentro del cemento y ceniza volante durante la transferencia de los materiales de los tanques a los silos de almacenamiento ha

sido también efectivo. Es frecuentemente necesaria la combinación de varias de estas prácticas o métodos de enfriamiento y por lo tanto se deben analizar las diferentes alternativas teniendo en cuenta los cambios de temperatura estacionales, sobre todo cuando éstos son extremos y decidir el o los procedimientos aplicables más económicos.

4.3.2 Agua de mezclado

Las condiciones de humedad de los agregados, deben ser considerados no solo para el diseño de la cantidad de agua para la mezcla sino también para calcular el balance de calor para controlar la temperatura de colocación. La cantidad de agua requerida para la mezcla de concreto masivo no siempre provee la capacidad por ella misma para bajar adecuadamente la temperatura del concreto, solo si el hielo es usado en lugar de casi toda el agua.

Un kilogramo de agua absorbe 4.18 kJ cuando la temperatura se eleva un grado centígrado. Un cambio unitario en la temperatura del agua, dará aproximadamente 5 veces el efecto en la temperatura del concreto, comparado con el mismo cambio unitario de temperatura del cemento o los agregados. Esto se debe al gran calor específico del agua con respecto de los otros materiales. El equipo para enfriar agua es menos complicado que el equipo para hacer hielo. Estas consideraciones son siempre indicadas para enfriar el agua o en combinación con otros aspectos de un programa para el control de la temperatura, por ejemplo: inundación con agua fría, clasificación en frío de los agregados o posenfriamiento del concreto endurecido con un serpentín embebido por donde circule agua fría.

De esta forma, utilizando la mezcla de concreto masivo de la tabla 4.7, y suponiendo que se enfría el agua de 21° a 2° C la temperatura del concreto se reducirá en alrededor de 3° C, lo que se calcula multiplicando los kilogramos de agua por la diferencia de temperaturas del agua y dividiendo entre el agua equivalente del concreto.

$$82 \text{ kg} \times (21^\circ - 2^\circ) / 555 \text{ kg} = 2.8^\circ \text{ C}$$

Por otro lado, un kilogramo de hielo absorbe 334 kJ cuando cambia al estado líquido, por lo que el uso de hielo es uno de los métodos básicos y mas eficientes para bajar la temperatura de colocación del concreto. Lo anterior involucra el uso de bloques de hielo que será triturado inmediatamente antes de ser dosificado o la elaboración de escarcha de hielo. Lo importante es que todo el hielo se derrita antes de terminar el mezclado y que el tiempo de mezcla sea suficiente, permitiendo una adecuada homogenización. Cuando los agregados se han procesado secos, no más de tres cuartas partes del agua se añadirán en forma de hielo. Cuando los agregados son procesados húmedos, la totalidad de agua añadida podrá ser hielo.

Si los 82 kg de agua, en la mezcla de ejemplo, es añadida como hielo el efecto del cambio de estado bajaría la temperatura del concreto en unos 12° C

$$\text{El cálculo sería: } 82 \text{ kg} \times (334 \text{ kJ/kg}) / 555 \text{ kg} \times (4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}) = 11.8^\circ \text{ C}$$

4.3.3 Agregados

Los agregados forman la porción más grande de la mezcla en el concreto, por eso, la temperatura de los agregados tiene gran influencia en su temperatura, así, el control de temperatura del concreto masivo no puede ser logrado sin el enfriamiento de los agregados, ya sea por métodos tan sencillos como el sombreado que puede disminuir la temperatura o evitar que suba en unos 3° C hasta métodos que implican la utilización de otros elementos y equipos.

Una de las formas mas eficientes para enfriar el agregado fino es utilizar agua enfriada, ya sea como roseado o inmersión en la etapa final del manejo del agregado o en el clasificador, el agua que ha pasado por el agregado es conducida a un tanque donde se le retira los finos para ser nuevamente enfriada y entonces volver a donde el agregado. Por este método la arena puede ser producida a temperaturas entre 4 y 7° C.

Si el total de los 554 kg/m³ de arena (incluyendo la humedad) de la mezcla de la tabla 2.7 se lleva de los 23° C a 7° C el resultado será una baja de la temperatura del concreto en alrededor de 4° C

Calculando:

$$(121 \text{ kg agua equiv de A. F. húmedo}) \times (23-7^\circ \text{ C}) / 555 \text{ kg agua equiv de concreto} = 3.5^\circ \text{ C}$$

También el agregado grueso puede enfriarse por medio de la inmersión en tanques donde circula agua fría, el ciclo de enfriado consiste en llenar el tanque con agua fría, descargar el agregado en el tanque, circular el agua a través del agregado, drenar el agua del tanque y descargar por la parte inferior el agregado; por medio de una cama vibratoria se le extrae el exceso de humedad.

Con este método usando agua a 2° C en concretos masivos se puede enfriar hasta 3° C con un tiempo de circulación de 45 minutos, sin embargo el ciclo completo incluye el llenado y descarga con un tiempo total de 2 horas.

Si se reduce la temperatura de los 1689 kg de agregado grueso, incluyendo su humedad, de la mezcla de ejemplo de 24 a 3° C, dará como resultado una baja de temperatura en el concreto de 12° C.

Calculando:

$$(317 \text{ kg agua equiv de A. G. húmedo}) \times (24-3^\circ \text{ C}) / 555 \text{ kg agua equiv de concreto} = 12^\circ \text{ C}$$

Humedecer los almacenes de agregados es una forma barata pero limitada de reducirles la temperatura, el grado de enfriamiento depende del efecto de enfriamiento por la evaporación, que a su vez depende de las condiciones de temperatura ambiente, viento y humedad relativa, con este método se puede reducir la temperatura unos 3° C.

Otra forma que se ha utilizado es hacer circular aire enfriado en el agregado, se utilizan depósitos, donde por la parte baja y por medio de un ventilador se hace pasar el aire frío a

unos 2° C el cual sale por la parte superior para ser nuevamente enfriado. El sistema es lento, aunque se tiene la ventaja de no existir problemas por exceso de humedad. Con este método se puede llegar hasta una temperatura del agregado de 4.5° C.

El enfriamiento por vacío consiste en introducir en un tanque sellado el agregado (fino o grueso) húmedo para luego disminuir la presión interior, haciendo casi el vacío (6mmHg), en esta condición de presión el agua se vaporiza a 4° C tomando del agregado el calor necesario y por lo tanto enfriándolo, con este procedimiento se ha llegado a 1° C de temperatura.



Imagen 4.1 Chiflón para humedecer y enfriar los agregados



Imagen 4.2 Sombreado de agregados

4.3.4 Materiales cementantes

Los materiales cementantes usados en concretos deben ser manejados en seco. Si la temperatura del cemento es llevada por debajo del punto de condensación atmosférica, la humedad puede condensarse y tener efectos adversos en la calidad del cemento.

Aunque la temperatura del cemento en su entrega es alrededor de los 60° C, como regla general no es necesario enfriar el cemento para lograr la temperatura adecuada de colocación, ni influye demasiado en la temperatura del concreto ya que es una porción relativamente pequeña de la mezcla y por otro lado enfriar el cemento no es muy económico ni práctico.

Un método alternativo de enfriamiento de alguno de los componentes del concreto, generalmente el agua, o de la mezcla es el uso del nitrógeno líquido que es un fluido inerte a una temperatura de -196° C.

El nitrógeno líquido se puede inyectar del tanque aislado que lo contiene al tanque de almacenamiento de agua para bajar su temperatura a 1° C, para grandes enfriamientos, la inyección se hará justo antes que el agua entre a la mezcladora provocando que parte se congele y por lo tanto tenga la necesidad de absorber mayor cantidad de calor para licuarse. Otra forma del uso del nitrógeno es inyectarlo dentro del mezclador, para este caso se deberá aumentar el tiempo de mezclado, hasta 10 minutos para obtener un enfriamiento significativo.

Adicional a lo expuesto se debe tomar en cuenta la ganancia de calor que tanto los ingredientes del concreto masivo como la mezcla, puedan absorber durante su almacenamiento, mezclado y manejo en general, lo cual influirá en la temperatura de colocación y la máxima que alcance ya colocado (pico).

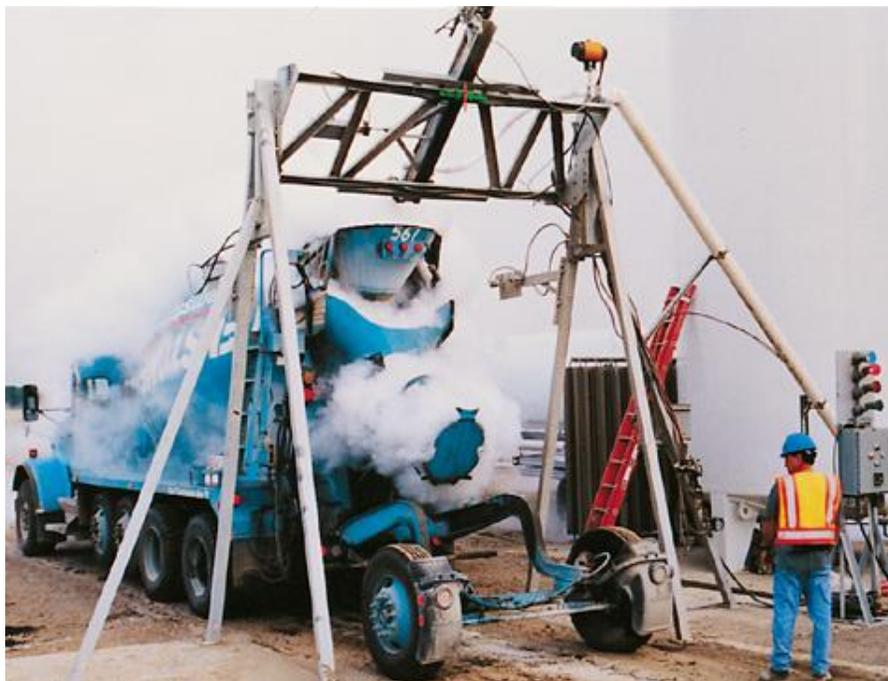


Imagen 4. Uso del nitrógeno líquido para el preenfriamiento del concreto

Algunas acciones para disminuir la ganancia de calor son: aislamiento, sombreado, forros reflejantes, instalaciones y equipos en color blanco, tiempos de recorrido y colocación reducidos, evitar retrasos, colar de noche, etc.

4.4 Sistemas de posenfriamiento

El objetivo del posenfriamiento es evitar diferencias de temperatura entre las capas superficiales y el interior de la estructura, realizando un enfriamiento progresivo y uniforme de la masa de concreto hasta una temperatura similar a la temperatura media anual del sitio, evitando el choque térmico y el fisuramiento consecuente y manteniendo dentro de los límites de diseño las grietas que por contracción se presentarán.

El control de la temperatura del concreto masivo puede ser realizado por medio de la circulación de líquido, usualmente agua, a través de tubos de pared delgada embebida en el concreto. Dependiendo de las dimensiones de la tubería, del volumen y temperatura del fluido circulante, el calor removido durante el proceso, puede reducir en una cantidad significativa el máximo de temperatura (pico) y además acelerará el enfriamiento hasta la temperatura ambiente.

Alrededor de cada tubo se forman isotermas que forman un patrón de temperatura complejo, no uniforme y cambiante. Tubos pequeños con agua muy fría crearán una condición más severa que tubos más grandes con agua menos fría. Bajo condiciones de rápido e intenso enfriamiento se provocarán grietas radiales o en circunferencia. Después de que la temperatura pico ocurre en la vecindad de los tubos, no es necesario restringir la velocidad de enfriamiento.

Es común continuar con el proceso de enfriamiento después del máximo de temperatura hasta que alguna de las siguientes condiciones ocurra:

- a. La velocidad de enfriamiento del concreto alcanza el máximo que puede ser tolerada sin agrietarse.
- b. La temperatura del concreto decrece 17°C por abajo del valor del pico inicial. Este es un valor empírico en base a pruebas lentas de deformación por temperatura.
- c. El concreto se ha enfriado hasta su temperatura estable final u otra temperatura intermedia especificada por el diseñador.

Este periodo de enfriamiento inicial puede ser corto de varios días o largo como un mes, posteriormente la temperatura del concreto crecerá otra vez, si el incremento es significativo, uno o más periodos de enfriamiento será necesario.

Se pueden usar otros métodos como el enfriado por evaporación por medio de un roscado fino de agua, agua de curado fría y el sombreado con ciertos beneficios, pero el efecto en el interior del concreto masivo es prácticamente nulo cuando la relación de superficie expuesta a volumen es menor a $1/\text{m}$.

Los materiales empleados en las tuberías que formarán los serpentines, que quedarán embebidas en el concreto y por las que se hará circular agua para el posenfriamiento, pueden ser de aluminio, acero, plástico o PVC, con dimensiones usuales de 25.4 mm de diámetro y 1.5 mm de espesor de pared. (El material usado en las dos últimas grandes presas de concreto masivo construidas en México, Zimapán y Huites fue el PVC por su ligereza, facilidad de colocación y unión de secciones y por su costo). Los serpentines son colocados directamente sobre la capa de concreto endurecido, por lo que el espaciamiento vertical de la tubería es igual al espesor de la capa, una distancia igual en el sentido horizontal dará como resultado un patrón uniforme en la colocación de la tubería pero se pueden tener variaciones en las separaciones. Las fig 5.4.2 a, b y c de ACI 207.1R se pueden usar como guía para establecer el espaciamiento y la cantidad de enfriamiento para el control de la temperatura.

La longitud de los serpentines es del orden de 250 m que es una longitud adecuada para propósitos de diseño, deberá servir para que el flujo y el enfriamiento sean constantes, cada serpentín deberá probarse antes de ser cubierto por el concreto y contar con un medidor de flujo. Se recomienda hacer circular el agua al mismo tiempo que el concreto la va recubriendo para asegurar el inicio del enfriamiento a edad temprana, para minimizar posibles daños en la tubería y para evitar que flote en el concreto fresco.

Para que el sistema de posenfriamiento sea eficiente se requiere las instalaciones adecuadas de bombeo y refrigeración lo que está determinado por el número de serpentines en operación al mismo tiempo, por la temperatura de entrada establecida en el diseño y la necesidad de ser flexible en la duración esperada de la operación de enfriamiento del concreto. Se ha utilizado agua a 3° C para el posenfriamiento y hasta 1°C mezclando agua con anticongelante en proporción 70 : 30 respectivamente. En tubería de 25 mm un gasto de 15 a 17 litros por minuto es recomendable para un adecuado intercambio de calor. Si el agua se toma de un río, deberá filtrarse para quitar sedimentos que puedan dañar al sistema.

Adicionalmente a lo comentado, la operación del sistema de posenfriamiento es de suma importancia ya que de ella depende el adecuado enfriamiento y la deformación del concreto dentro de los límites que admite sin agrietamientos peligrosos.

La primera recomendación es iniciar el posenfriamiento a partir del primer día, para reducir entre 5 y 10° C la temperatura pico. En esta etapa de enfriamiento es recomendable usar el equipo a toda su capacidad ya que siempre la generación de calor será mayor que la capacidad de desalojarlo. Es común que la temperatura pico se alcance entre el segundo y sexto día.

Posteriormente, entre los días 10 y 16 se deberá reducir la temperatura para no alcanzar la temperatura pico nuevamente, aún cuando queda mucho calor por liberarse. Debe controlarse la velocidad de enfriamiento del concreto, la recomendación en esta etapa es de no más de 0.6° C por día, para evitar deformaciones que excedan la capacidad de deformación del concreto.

Por último entre los 30 y 60 días siguientes se continuará con el enfriamiento del concreto hasta la temperatura final estable a una velocidad máxima recomendada de entre 0.3 y 0.4 °C por día.

Se recomienda, por lo menos una vez al día, cambiar el sentido del flujo del agua para uniformizar el enfriamiento.

Capítulo 5

Casos Prácticos en el uso del Concreto Masivo

5. Casos Prácticos en el Uso del Concreto Masivo

A continuación se presentan algunos casos en la utilización del concreto masivo tanto en México como en el extranjero, se notará que no se presenta la información con la misma profundidad en los diferentes casos debido a la dificultad de su consecución pero de hecho se complementan unos con otros y se puede inferir las medidas necesarias para contrarrestar la influencia del aumento de la temperatura en algunas elementos.

5.1 Temperatura Máxima en Cubos de Concreto

Como primer caso práctico se presentan los resultados de un ejercicio, que la empresa Apasco realizó, para determinar las temperaturas máximas alcanzadas en tres cubos de concreto de un metro por lado. Este tipo de ensayos sirven de apoyo para trabajos de construcción como los realizados en la cimentación de una planta de sedimentación en la central Petacalco II de la CFE que más adelante se tratará.

En la Tabla 5.1, se presenta las cantidades de materiales de cada una de las tres mezclas experimentadas, todos los materiales y cantidades son iguales, con excepción de la cantidad de cemento en la mezcla 3 que se redujo en 25 Kg. El cemento CPEG 30 RS BRA se comporta como un cemento de moderado calor de hidratación, además de ser resistente al ataque de sulfatos y de baja reactividad álcali agregado. El consumo de cemento es alto para las consideraciones de concretos masivos sin embargo para fines de este estudio se consideró adecuado para analizar una condición mas severa en cuanto a la generación de calor. La resistencia promedio alcanzada a los 7 días fue de 460 Kg/cm².

La grava es de río (canto rodado) de TMA 25 mm, la arena también de río y el agua es de la red municipal. Una notable diferencia, entre las tres mezclas, es la cantidad de hielo que se utilizó como sustituto de agua de mezclado. (Tabla 5.2)

Se utilizaron dos tipos de aditivos reductores de agua - plastificantes que la empresa ha experimentado con resultados adecuados en la trabajabilidad y la reducción de agua.

MATERIAL	MEZCLA 1	MEZCLA 2	MEZCLA 3
Cemento CPEG 30 RS BRA	450 Kg/m ³	450 Kg/m ³	425 Kg/m ³
Agua	212 L/m ³	212 L/m ³	212 L/m ³
Arena	758 Kg/m ³	758 Kg/m ³	758 Kg/m ³
Grava	894 Kg/m ³	894 Kg/m ³	894 Kg/m ³
Aditivo Sikament 190 CR	7 cm ³ /Kg c	7 cm ³ /Kg c	7 cm ³ /Kg c
Aditivo Sikament 307	5 cm ³ /Kg c	5 cm ³ /Kg c	5 cm ³ /Kg c

Tabla 5.1 Dosificación de Mezclas

En la Tabla 5.2 se consignan las condiciones de temperatura en el concreto, sus componentes y el ambiente, para las tres mezclas, cabe resaltar la pérdida de revenimiento y el aumento de la temperatura de las mezclas entre el término de la fabricación y el inicio de la colocación, aproximadamente 30 minutos, lo que se cuidará para que la trabajabilidad y la temperatura de colado sean las adecuadas,

Mezcla	1	2	3
Fecha	15-03-07	27-03-07	27-03-07
Revenimiento en planta (cm)	10.5	8	15
Temp ambiente fabricación (°C)	30.5	27.5	28
Temp concreto fabricación (°C)	23	16.7	14
Temp agua (°C)	27	14	15.6
Temp grava (°C)	32	26	28.5
Temp arena (°C)	29	29	29
Temp cemento (°C)	66		
Revenimiento colado (cm)	9	7	12
Temp ambiente colado (°C)	30	28	28.5
Temp concreto colado (°C)	23.5	21	17
Hielo en sustitución de agua (kg)	98.5	130	150

Tabla 5.2 Condiciones de temperatura para las tres mezclas

A continuación, en las tablas: 5.3, 5.4 y 5.5, están los resultados de las mediciones de temperatura del medio ambiente y del centro de los cubos de concreto, de las que se pueden hacer las siguientes observaciones:

- La máxima temperatura registrada en cada uno de los cubos se dio entre las 44 y 60 horas es decir, entre el fin del segundo día y el tercero.
- El pico de temperatura, (76, 73 y 66 °C respectivamente), como era de esperarse varió de acuerdo a la temperatura de colado que al mismo tiempo fue una consecuencia de la cantidad de hielo que se le añadió a la mezcla; a mas hielo menor temperatura de colado y menor temperatura máxima (pico).
- La diferencia de temperatura pico entre las mezclas 2 y 3 (7° C) también se vio influenciada por la disminución de la cantidad de cemento
- La diferencia máxima de temperaturas entre el cubo y el medio ambiente se presentó en horas en que la temperatura ambiente desciende al punto más bajo, a las 5:00 horas.
- Si se asume que la temperatura del medio ambiente es igual a la temperatura de la superficie exterior del concreto, el gradiente de temperaturas registradas en muchos lecturas, rebasa en forma notable el diferencial máximo recomendado de 20 °C para evitar agrietamientos, por lo que, si estos cubos fueran elementos de una estructura, se deberían tomar medidas adicionales para evitar esta situación.

CONCRETOS APASCO, S.A. DE C.V.

Planta MANZANILLO

Determinación de la elevación de temperatura en Cubo de 1 m³ **No. 1**

Se empezó el colado a las 13:00 AM con temperatura ambiente de 30° y de 23.5° en el concreto al momento de colarse el Cubo

Dias	Hora de Lectura	Edad en Hrs	Temperatura Ambiental y del Concreto	
			Medio Ambiente	A 1/2 Cubo
15-Mar-2007	17:00	4	31	26
15-Mar-2007	21:00	8	26	26.5
16-Mar-2007	01:00	12	23	29
16-Mar-2007	05:00	16	22	42.3
16-Mar-2007	09:00	20	25	53.1
16-Mar-2007	13:00	24	32	60.8
16-Mar-2007	17:00	28	32	66.2
16-Mar-2007	21:00	32	25	70.5
17-Mar-2007	01:00	36	25	73.5
17-Mar-2007	05:00	40	21	74.9
17-Mar-2007	09:00	44	25	76
17-Mar-2007	13:00	48	31	75.8
17-Mar-2007	17:00	52	33	75.8
17-Mar-2007	21:00	56	27	75.2
18-Mar-2007	01:00	60	22	74.5
18-Mar-2007	05:00	64	20	73.5
18-Mar-2007	09:00	68	24	72.5
18-Mar-2007	13:00	72	29	71.5
18-Mar-2007	17:00	76	32	70.5
18-Mar-2007	22:00	81	25	69.5
19-Mar-2007	09:00	92	25	67
19-Mar-2007	13:00	96	33	65.5
19-Mar-2007	20:00	103	26	64.0
20-Mar-2007	08:00	115	23.5	62.0
20-Mar-2007	17:00	124	31.0	60.0
21-Mar-2007	20:00	127	26.0	59.5
21-Mar-2007	08:00	139	25.2	57.5
22-Mar-2007	20:00	151	25.0	55.5
22-Mar-2007	08:00	163	24.8	53.5

Temperatura máxima alcanzada en el concreto 76 °C

Gradiente máximo entre el medio ambiente y el concreto 53.9 °C

Tabla 5.3 Mediciones en la mezcla 1

CONCRETOS APASCO, S.A. DE C.V.

Planta MANZANILLO

Determinación de la elevación de temperatura en Cubo de 1 m³ No. 2

El colado se terminó a las 12:00 hrs con Temperatura Ambiente de 28 °C y

Temperatura del Concreto de 21 °C

Dias	Hora de Lectura	Edad en Hrs	Temperatura Ambiental y del Concreto	
			Medio Ambiente	A ½ Cubo
27-Mar-2007	17:00	5	28.5	22.0
27-Mar-2007	21:00	9	23.0	23.0
28-Mar-2007	01:00	13	18.0	24.0
28-Mar-2007	05:00	17	17.3	30.0
28-Mar-2007	09:00	21	22.0	39.0
28-Mar-2007	13:00	25	27.5	49.0
28-Mar-2007	17:00	29	30.0	57.0
28-Mar-2007	21:00	33	24.0	62.0
29-Mar-2007	01:00	37	20.7	65.0
29-Mar-2007	05:00	41	16.5	69.0
29-Mar-2007	09:00	45	24.5	70.0
29-Mar-2007	13:00	49	32.7	71.0
29-Mar-2007	17:00	53	30.0	72.0
29-Mar-2007	21:00	57	22.0	73.0
30-Mar-2007	01:00	61	20.0	72.0
30-Mar-2007	05:00	65	17.6	71.0
30-Mar-2007	09:00	69	23.0	70.0
30-Mar-2007	13:00	73	28.0	70.0
30-Mar-2007	17:00	77	32.0	69.0

Temperatura máxima alcanzada en el concreto 73 °C

Gradiente máximo entre el medio ambiente y el concreto 53.4 °C

Tabla 5.4 Mediciones en la mezcla 2

CONCRETOS APASCO, S.A. DE C.V.

Planta MANZANILLO

Determinación de la elevación de temperatura en Cubo de 1 m³ **No. 3**

El colado se terminó a las 13:00 hrs con Temperatura Ambiente de 28.5 °C y

Temperatura del Concreto de 17 °C

Dias	Hora de Lectura	Edad en Hrs	Temperatura Ambiental y del Concreto	
			Medio Ambiente	A ½ Cubo
27-Mar-2007	17:00	4	28.50	18.00
27-Mar-2007	21:00	8	23.00	19.50
28-Mar-2007	01:00	12	18.00	20.00
28-Mar-2007	05:00	16	17.30	22.50
28-Mar-2007	09:00	20	22.00	27.00
28-Mar-2007	13:00	24	27.50	37.00
28-Mar-2007	17:00	28	30.00	44.50
28-Mar-2007	21:00	32	24.00	49.50
29-Mar-2007	01:00	36	20.70	54.00
29-Mar-2007	05:00	40	16.50	57.00
29-Mar-2007	09:00	44	24.50	59.00
29-Mar-2007	13:00	48	32.70	61.00
29-Mar-2007	17:00	52	30.00	62.50
29-Mar-2007	21:00	56	22.00	64.00
30-Mar-2007	01:00	60	20.00	66.00
30-Mar-2007	05:00	64	17.60	64.50
30-Mar-2007	09:00	68	23.00	64.50
30-Mar-2007	13:00	72	28.00	64.00
30-Mar-2007	17:00	76	32.00	64.00

Temperatura máxima alcanzada en el concreto 66 °C

Gradiente máximo entre el medio ambiente y el concreto 46.9 °C

Tabla 5.5 Mediciones en la mezcla 3

5.2 Losa de Cimentación

El elemento colado con concreto masivo corresponde a la base de una planta de sedimentación o decantamiento, dentro de la central Petacalco II de la CFE. Las dimensiones del elemento son de 36 m x 45 m de área con espesor de 0.5 m, con lo cual fue necesario utilizar alrededor de los 800 m³ de concreto con una resistencia $f'c = 250$ kg/cm², TMA 25 mm, revenimiento 14 cm y se colocó por medio de bomba.

Se utilizaron 2 parrillas de armado de acero de refuerzo de 13 mm de diámetro con una separación de 20 x 20 cm, en toda el área.



Imagen 5.1 Aspecto del colado de la base de la planta de sedimentación

5.2.1 Análisis para definir la cantidad de hielo

De acuerdo con las especificaciones, la temperatura del concreto a la llegada en la obra debe ser de 23 °C máximo, para lo cual, se realizó lo siguiente:

Se procedió a estimar la temperatura del concreto utilizando la ecuación A-3 indicado en la publicación ACI-305R-99 “Colocación del Concreto en Clima Caluroso” (ecuación (2) del capítulo 4 de este trabajo). Los datos de la temperatura de los componentes del concreto (cemento, agregados y agua), fueron tomados directamente en los almacenes de la planta de concreto.

De acuerdo con información de campo, tales como: distancia de recorrido de planta a obra, tiempo de recorrido, volumen máximo de concreto en cada carga de la revolvedora, se determinó manejar una temperatura máxima de planta de 21 °C, y de acuerdo a las condiciones de los materiales se determinó utilizar 60 kg de hielo por metro cúbico, ver Tabla 5.6

También se contó con equipo de enfriamiento del agua (Schiller), con lo cual se logra mantener una temperatura máxima del agua de 10 °C, lo que ayuda enormemente al control de la temperatura del concreto. La grava y la arena se manejaron a la temperatura ambiente.

Se contó con equipo para triturar y depositar el hielo directamente a la unidad revolvedora. Previo a la incorporación del hielo, se realizó el pesaje del mismo para medir la cantidad exacta en cada carga. A la cantidad de agua de mezclado se le descontó los 60 kg de hielo para mantener constante la relación agua/cemento. Se consideró que 1 kilogramo de hielo es equivalente a 1 litro de agua.

**ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL CONCRETO
(ACI 305)**

Temperatura del concreto SIN HIELO

No.	Ta	Tc	Tw	Wa	Wc	Ww	Wwa	Wi	T _{CON.}	Hielo/agua, %
1	31	64	10	1930	250	104	62	0	30.5	0

Temperatura del concreto CON HIELO

No.	Ta	Tc	Tw	Wa	Wc	Ww	Wwa	Wi	T _{CON.}	Hielo/agua, %
1	31	64	10	1930	250	104.5	62	0	30.5	0
2	31	64	10	1930	250	104.5	62	10	28.8	6
3	31	64	10	1930	250	104.5	62	15	28.0	9
4	31	64	10	1930	250	104.5	62	20	27.2	12
5	31	64	10	1930	250	104.5	62	25	26.4	15
6	31	64	10	1930	250	104.5	62	30	25.6	18
7	31	64	10	1930	250	104.5	62	35	24.8	21
8	31	64	10	1930	250	104.5	62	40	24.1	24
9	31	64	10	1930	250	104.5	62	45	23.3	27
10	31	64	10	1930	250	104.5	62	50	22.6	30
11	31	64	10	1930	250	104.5	62	55	21.9	33
12	31	64	10	1930	250	104.5	62	60	21.1	36
13	31	64	10	1930	250	104.5	62	65	20.4	39
14	31	64	10	1930	250	104.5	62	70	19.7	42
15	31	64	10	1930	250	104.5	62	75	19.0	45
16	31	64	10	1930	250	104.5	62	80	18.4	48
17	31	64	10	1930	250	104.5	62	85	17.7	51
18	31	64	10	1930	250	104.5	62	90	17.0	54
19	31	64	10	1930	250	104.5	62	95	16.4	57

Tabla 5.6 Estimación de la temperatura de colado en el concreto

Ta: Temperatura del agregado

Tc: Temperatura del cemento

Tw: Temp del agua de mezclado, excluyendo el hielo

Wa: Peso seco del agregado

Wc: Peso del cemento

Ww: Peso del agua de mezclado dosificada

Wwa: Peso del agua libre y humedad absorbida x el agregado

Wi: Peso del hielo

Nota: Todos los pesos están en kg; las temperaturas, en °C.

5.2.2 Pruebas para Validar la Temperatura del Concreto Previo al Colado

Con la finalidad de asegurar que, el concreto cumpliera con las condiciones de temperatura establecida a la llegada en la obra, se realizaron mezclas de prueba a escala industrial previo al colado. Para ello, se consideró el intervalo de horario más crítico para realizar la prueba que fue entre 13:30 y 14:30 horas, porque de acuerdo a monitoreo previo, es en este intervalo donde se tiene la temperatura máxima.

De acuerdo con lo resultados de la prueba, se confirmó que el incremento de la temperatura del concreto de la planta a la obra fue de entre 1 a 1.5 °C en un tiempo promedio de recorrido y descarga de de 35 minutos. Con lo cual se pudo comprobar que de acuerdo con las condiciones de los materiales, dosificación de hielo, temperatura del agua, tamaño de la carga y tiempo de recorrido de la unidad revolvedora, se cumplía con los requisitos de temperatura del concreto.

El colado se inició a las 10:00 horas del día 4 de Diciembre y concluyó a las 9:00 horas del día 5 del mismo mes, con una duración de 23 horas aproximadamente. Durante el proceso de colado se realizaron ajustes mínimos en el contenido de hielo debido a las condiciones de temperatura ambiente, sobretodo en la noche se pudo reducir hasta 15 kg de hielo por metro cúbico sin afectar la temperatura especificada del concreto.

El posenfriamiento se realizó con el curado del concreto con agua a temperatura ambiente durante 7 días posteriores al colado.



Imagen 5.2 Equipo para triturar el hielo e introducirlo como parte de agua de mezclado



Imagen 5.3 Rociado de agua al concreto para curar manteniendo condiciones de humedad y temperatura adecuadas.



Imagen 5.4 Determinación de la temperatura del concreto previo al colado

5.3 Presa Huites

La presa Huites se localiza sobre el río Fuerte en el estado de Sinaloa. Es una presa recta de tipo gravedad en el tramo central, con una altura de 154.75 metros y un volumen de 2.1 millones de metros cúbicos, que continúa hacia la margen izquierda con el vertedor con un

ligero quiebre y se complementa con una cortina de arco que se apoya en un contrafuerte sobre el tajo de desvío y en la pared rocosa en la margen derecha.

La estructura principal la forma la cortina de gravedad, cuyo tramo central tiene una longitud de 318.30 m, con un ancho de corona de 8 m y espesor máximo en el desplante de 125 m. Fue dividida en 16 bloques de 15 a 24 metros de ancho por medio de juntas de contracción con el objeto de evitar grietas por tensión, formando monolitos separados que tienen la libertad de deformarse.

En la construcción de la cortina de gravedad se especificaron resistencias del concreto masivo de 180, 160 y 120 kg/cm² colocado en capas de 2 m para permitir el adecuado control de la temperatura, que a su vez se dividieron en “hiladas” de 50 cm para evitar juntas frías sin embargo por requerimientos del programa se llegaron a colocar capas de 2.5 y 3 m, respetando la altura de la “hilada”.

Previamente a la colocación de concreto se verificó que la instalación de los serpentines a base de tubería de plástico para el sistema de poseenfriamiento estuvieran adecuadamente colocados y sujetos para evitar su movimiento durante el proceso de colado.

5.3.1 Enfriamiento del Concreto Masivo

Recordemos que la reacción química que se produce al hidratarse el cemento es exotérmica, la cantidad de calor que se genera en este proceso varía entre 70 y 80 calorías por gramo de cemento de bajo calor de hidratación dando como resultado un gran aumento de la temperatura en el interior del elemento de concreto. La disipación de este calor en forma natural, desde el interior hasta la cara exterior puede durar varios años.

El objetivo en las operaciones de construcción en este tipo de obra y material, es llegar lo más rápido posible a la condición de temperatura de equilibrio final con el medio ambiente, para, de esta forma, inyectar las juntas de contracción y embalsar el agua sin que se produzcan esfuerzos indeseables. Se especificó una temperatura máxima de colocación de 26° C y temperatura pico de 52° C.

5.3.2 Preenfriamiento

Para lograr las temperaturas antes mencionadas y dadas las condiciones climáticas del sitio de alta temperatura, baja humedad relativa y fuertes velocidades del viento, fue necesario utilizar los métodos de preenfriamiento siguientes:

1. Aislar térmicamente los gusanos transportadores de hielo y preparar áreas de almacenamiento temporal del hielo.
2. Poner bajo sombra los almacenes de agregados.
3. Rociar los agregados en las pilas de almacenamiento.
4. Reducir el contenido de cemento sin alterar las resistencias de proyecto.
5. Incorporar hielo en la mezcla.
6. Enfriamiento de la grava

Para la producción de hielo en escamas se instalaron cuatro plantas, con una producción total de 8 t/h. Se comparó la capacidad diaria instalada de producción de hielo, 192 t, con la producción diaria de concreto (promedio) y se consideraron los consumos de agua de diseño y de hielo; los resultados fueron:

Producción de concreto	6100 m ³ /día
Agua de diseño	130 l/m ³
Hielo, 40% del agua	53 kg/m ³
Hilo necesario por día	317 t

Del análisis anterior se concluye que la capacidad de hielo instalada es deficitaria en casi un 40 % es decir en 125 t.

En la realidad el consumo de hielo varió dependiendo de la temperatura ambiente, de los horarios de colado, época del año y distancia de transporte.

El uso de hielo se complemento con el sistema de enfriamiento de la grava, con una planta de enfriamiento de agua con capacidad de 120 L/s. El procedimiento consistió en regar la grava con agua a 2° C, requiriendo la instalación de bandas transportadoras, tanques de decantación para desalojar los finos acumulados en el agua y una línea de 20.3 cm de diámetro (8") con válvulas aspersoras a lo largo de la banda, bajando la temperatura de 28 a 18° C en promedio en verano.

5.3.3 Posenfriamiento

En Huites, el posenfriamiento del concreto se realizó por medio de agua circulante dentro de serpentines de tubos de PVC del tipo flexible de 25.4 mm de diámetro, separados a 1.5 m entre si, se aplicó en dos etapas (sistemas): la primera con agua procedente del río a 20° C por 60 días o hasta que el concreto tuviera una temperatura de 33° C y en la segunda se utilizó agua refrigerada cuya temperatura al ingreso del serpentín fue de 6° C durante 17 días o el tiempo necesario para alcanzar los 24° C (temperatura media anual de la región). Se recomendó invertir el sentido del flujo cada 24 horas. El gasto de cada serpentín se fijó en 0.2 l/s en ambos sistemas. La longitud máxima del serpentín fué 280 m. (ver Figura 5.1)

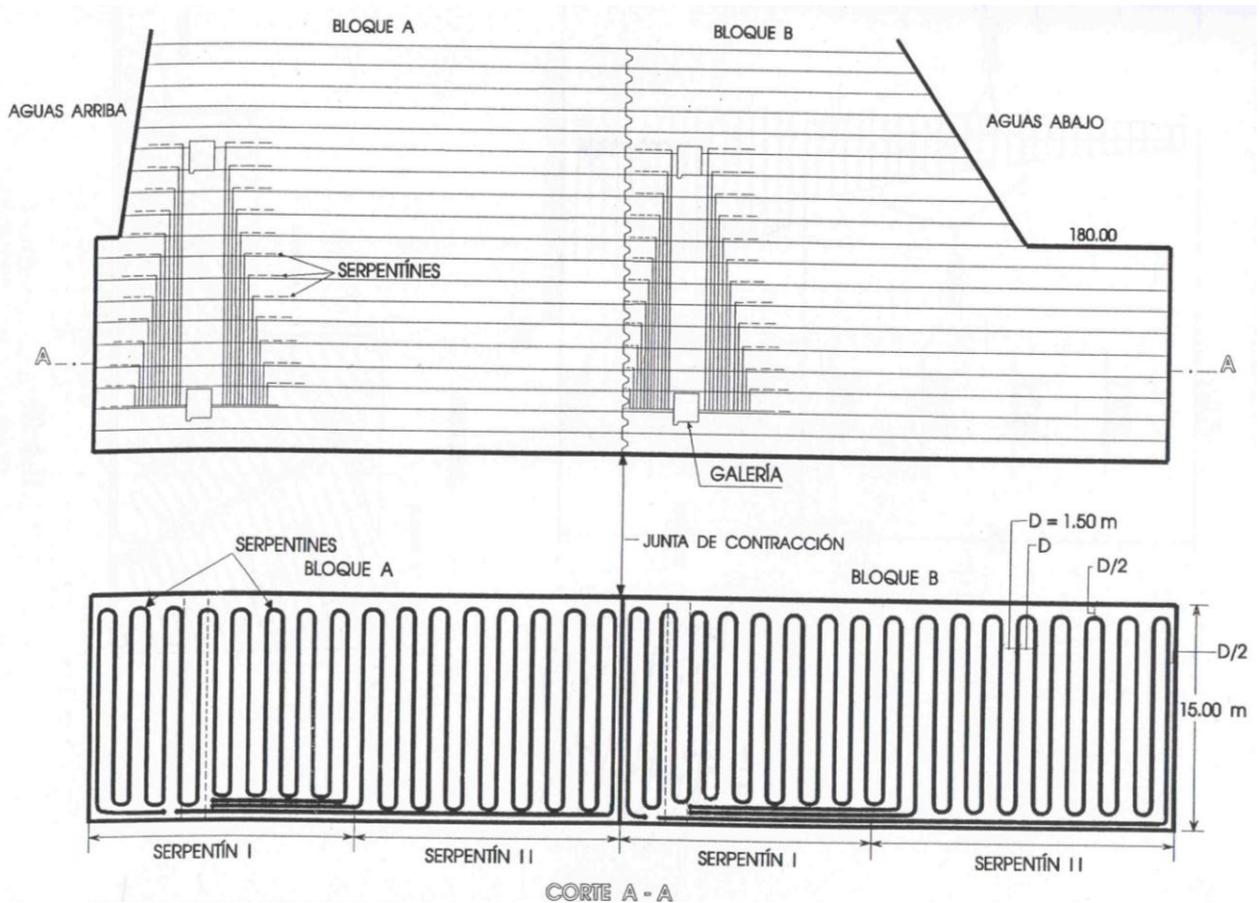


Figura 5.1 Ejemplo de las características de los serpentines y su disposición típica en la Presa Huites

Para establecer el método de posenfriamiento mencionado, se requirió la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales de transmisión de calor que toman en cuenta:

- Las propiedades térmicas de la roca y de los concretos empleados.
- La forma (geometría) de cada bloque de la cortina.
- La posición de cada serpentín.
- El programa de obra, considerando la fecha de cada colado.
- Las temperaturas ambiente promedio mensuales del aire y del agua del río.
- Las condiciones de insolación de cada colado.
- El curado por riego de la superficie.
- Los sistemas de enfriamiento (agua de río y agua refrigerada).

Obteniendo resultados como:

- Longitud de los serpentines.
- Temperatura máxima del concreto.
- Calor de hidratación total.
- Calor de hidratación a eliminar.

- Calor de insolación.
- Calor substraído por sistema (agua de río y agua refrigerada), diario y total.
- Calor dispersado por la superficie libre del concreto
- Gastos de cada sistema (agua de río y agua refrigerada).

Durante la operación del sistema de posenfriamiento se presentaron diversos problemas que disminuyeron en forma notable la eficiencia y ocasionaron esfuerzos no deseados en el concreto, por ejemplo:

- El posenfriamiento se suspendió en varias ocasiones por deficiencias en el bombeo.
- Los gastos en los serpentines eran muy variables, por perdidas, ya se por goteo o por grandes chorros, lo cual indicaba falta de cuidado en el manejo de las válvulas de regulación.
- Varios serpentines estaban tapados con sedimentos transportados por el agua, debido a que se utilizaba agua de río sin decantar.
- No se invirtió el sentido del flujo de acuerdo a la recomendación.
- Algunos serpentines resultaban dañados durante la colocación del concreto

Por lo anterior las temperaturas del concreto variaban de un sitio a otro, lo que generó o aumentó las tensiones en la masa del concreto, se llegó a detectar temperaturas de mas 40° C en tanto que según programa, en esa zona el concreto ya debería estar a 24° C.



Imagen 5.5 Cortina y vertedor de la Presa Huites vista aguas abajo

5.4 Puente Viaducto de la Unidad, Monterrey, N. L.

El Puente Viaducto de la Unidad, que cruza el río Santa Catarina, aporta múltiples soluciones viales al permitir la interconexión directa del bulevar Rogelio Cantú Gómez, en Monterrey, con la avenida Humberto Lobo, en el municipio de San Pedro Garza García.

El Puente de la Unidad está formado por dos estructuras fáciles de identificar: el mástil o pilón, de 155 m de altura desde su base y el puente o viaducto cuya longitud es de 304 m, teniendo el claro mayor 186 m. La cimentación del mástil se desplanta en las márgenes del río, en un suelo de boleo, al que después de compactarlo se le preparó con inyecciones de lechadas de cemento y una plantilla de concreto ciclópeo, antes de colocar el acero de refuerzo de la zapata única que sirve de apoyo al mástil.

La zapata de concreto armado y postensado responde a una sección trapezoidal de tres a cinco metros de alto, 20 a 30 m de ancho y 80 m de largo. El volumen de concreto para hacer este colado ascendió a 8000 m³, de 300 kg/cm², los que se colocaron en tres etapas, la primera de 1500m³, la segunda de 2000 m³ y la tercera con 4500 m³.

Esta última constituyó el colado masivo más importante que se haya hecho de manera continua, en 22 horas, para un puente en el país, para controlar el calor de hidratación de un colado de estas dimensiones y evitar los agrietamientos por el diferencial térmico hubo cuidados muy especiales con el concreto, al añadir hielo en la mezcla, reducir al máximo la temperatura de los agregados y «arroparlo con colchonetas de fibra de vidrio» para así evitar el shock térmico. Por otra parte, también se mantuvo una rígida observación de la variación de las temperaturas con termopares. No se hizo necesario un sistema de posenfriamiento

El mástil, sobre el que recae la estética de esta obra vial, se realizó totalmente en concreto blanco con agregado de mármol y se le dio un acabado lavado que se logra aplicando a la cimbra un retardante, la cual al descimbrar permite que el concreto se lave con agua a presión para dejar el agregado expuesto. Con 150 m de altura desde su base tiene una inclinación de 60 grados hacia el lado sur y se desplanta de la zapata sobre una sección base de 15 m de ancho por ocho m de largo, que se reduce según la altura. El tramo curvo inicia a partir del tercer nivel hasta el 19, y el tramo recto del 20 al 35. Entre el cuarto y el sexto nivel se encuentra el primer mirador conocido como “El Sol”, y en la cúspide se diseñó otro de dimensiones más pequeñas.

El colado en concreto de $f'c$ 500 kg/cm² se hizo por tramos con la ayuda de una cimbra autodeslizante y para lograr un acabado perfecto, se realizó un colado por niveles, y el fuste del mástil se subdividió en dos partes: la curva, que inicia en el tercer tramo al 19, y el recto que va del 20 al 34. Cabe mencionar que el fuste es hueco y sus paredes tienen 1.5 m de espesor.

En esta etapa, los volúmenes del colado se hicieron de 200 a 300 m³ en un solo evento y para evitar cualquier afectación debida a la generación de calor, que se estimó generaría un diferencial de la temperatura de 17 a 20°C en las primeras horas, entre el centro del mástil y

su superficie expuesta, nuevamente se usó hielo en la mezcla y los termopares, e incluso en el verano los colados se realizaron en la noche para bajar aún más la carga térmica.



Imagen 5.6 Detalle de la construcción del mástil del Puente de la Unidad



Imagen 5.7 Vista panorámica del Puente de la Unidad

5.5 Cimentación para Puente en el Norte de California, USA.

Se trata de una zapata de forma de un octágono no regular cuyas dimensiones extremas son 18.5 m por 18.5 m por 4.75 m de peralte.

La resistencia del concreto requerida de proyecto fue de 35 MPa a los 28 días pero por otros requerimientos como contenido mínimo de cemento y relación agua cemento, resultó en un concreto con resistencia de 55 MPa.

Se limitó, por especificación, la máxima temperatura del concreto durante su curado a 65° C y el máximo diferencial de temperatura entre cualquier superficie externa y el centro a 20° C en cualquier momento después del colado. Se requirió un aislamiento y que este permaneciera hasta que la porción mas caliente del concreto enfrió a menos de 20° C de la temperatura ambiente mas baja del día. El agrietamiento por temperatura se prohibió por especificación.

Para cumplir con las especificaciones arriba señaladas se seleccionó los elementos del concreto y sus cantidades para minimizar la elevación de la temperatura del concreto y lograr rápidamente la resistencia, se utilizó 250 Kg/m³ de cemento Tipo II de bajo calor y 135 Kg/m³ de ceniza volante clase F. El agregado grueso fue de basalto con un coeficiente de expansión térmica bajo.

Se desarrollaron dos planes para cumplir con las especificaciones el primero consistió en determinar la temperatura de colado, a partir de la máxima temperatura que alcanzaría el concreto que se estimó en 55° C lo que significaba una temperatura de colocación de 10° C y la utilización del nitrógeno líquido para enfriar la mezcla, adicionalmente era necesario aislar la superficie por 40 días aproximadamente según el modelo térmico para el enfriamiento.

Durante este tiempo poco o nada de trabajo se podría realizar en la columna u otra parte de la estructura, ésta situación y el costo del preenfriamiento llevaron al segundo plan que tomó en cuenta el incremento de la resistencia del concreto durante los primeros 10 días que a su vez incrementaba la resistencia al agrietamiento por temperatura, lo que permitió modificar la especificación del diferencial de temperaturas de 20° C, además se eliminó el preenfriamiento y se minimizó el tiempo de aislamiento, a cambio se diseñó un sistema de posenfriamiento por medio de tubería ahogada.

El resultado de este segundo plan fue la colocación del concreto a temperatura ambiente (22° C) y un aislamiento durante 9 días, recortando 31 días en el programa y disminuyendo sensiblemente los costos por el tiempo ahorrado y por no usar el sistema de preenfriamiento de nitrógeno líquido.



Imagen 5.8 Vista de la zapata octagonal y su columna para puente en California, USA

Capítulo 6

Conclusiones

6. Conclusiones

El concreto masivo no es un material nuevo ya que prácticamente se ha usado durante un siglo, aunque en México su uso tiene algo más de 70 años, sin embargo es poco conocido entre los ingenieros civiles y en muchos casos confundido con grandes volúmenes de concreto colado o como se le denomina, “colado masivo”, que no es lo mismo ya que por ejemplo se puede tener gran cantidad de concreto colado en una carpeta de un camino sin que éste presente problemas por el calor de hidratación ya que es delgada (máximo 30 cm) y tiene una gran superficie por donde se disipa el calor, por lo que no se hace necesario implementar ninguna medida especial para hacer frente a la generación de calor.

También es común que al concreto masivo se le asocie solamente con proyectos de presas rígidas de gravedad o de arco, sin embargo su aplicación se da en otros elementos de proyectos hidroeléctricos o de aprovechamientos hidráulicos como vertedores, casas de máquinas, etc, en donde, a veces y dependiendo del espesor del elemento de concreto se le denomina semimasivo, pero con cuidados similares en cuanto a la temperatura de colado como el concreto masivo, además de otros elementos como cimentaciones para equipos en centrales termoelectricas, eólicas, nucleares, cimentaciones y pilas o mástiles en puentes, etc.

En relación a los materiales para la elaboración del concreto masivo, debe tenerse en cuenta que el agregado grueso deberá ser el de mayor tamaño posible de acuerdo a las dimensiones del elemento, su armado y los equipos que se utilicen para su manejo, logrando disminuir la superficie específica y el volumen de lechada necesaria y por ende la cantidad de cemento y el calor generado.

El cemento mas recomendado será aquel que tenga como característica especial bajo calor de hidratación (BCH) pero también se recomienda el Cemento Pórtland Puzolánico, y el Escoria Granulada de Alto Horno (CPEG y CEG) o inclusive el Compuesto (CPO) siempre reduciendo al mínimo la cantidad de cemento en la mezcla, sin perjuicio de la calidad, para minimizar la producción de calor, además que se ganará en economía.

El empleo de puzolanas como parte del material cementante es recomendable ya que de esta forma se puede reducir hasta el 50% de la producción de calor si se utilizara la misma cantidad de cemento.

En lo referente a los aditivos, los reductores de agua – plastificantes y los reductores de agua de alto rango – superplastificantes son los mas recomendados para su aplicación en concretos masivos por la posibilidad que se da de disminuir la cantidad de agua al mismo tiempo que se disminuye la cantidad de cemento es decir sin variar la relación agua / cemento y por lo tanto se reduce la generación de calor de hidratación.

Como en toda obra de concreto se deberá cuidar todas las etapas en la tecnología del concreto, es decir, el almacenamiento de materiales, dosificación, mezclado, transporte, colocación, compactación, curado, terminado y protección o aislamiento del elemento así como el preenfriamiento y posenfriamiento en el caso del concreto masivo, a fin de garantizar la calidad del mismo. Se deberá contar con los equipos adecuados en capacidad y

cantidad de acuerdo a los volúmenes de concreto, a las temperaturas del concreto durante el colado y la máxima prevista (pico) y la del medio ambiente, sin olvidar las características propias de la estructura y del medio en que se desarrollaran los trabajos.

Los sistemas de preenfriamiento (sombreado y humedecido de almacenes de agregados, utilización de agua enfriada o hielo, procesado de agregados en agua fría, utilización de nitrógeno líquido, etc.) serán debidamente analizados para implementar aquel o aquellos que garanticen alcanzar la temperatura de colado especificada, teniendo en cuenta que de acuerdo a la temperatura del medio ambiente la proporción de hielo, por ejemplo, tendrá que ser ajustada, para garantizar la calidad y temperatura del concreto. De acuerdo a lo observado en la mayoría de casos del uso de concreto masivo en estructuras que no sean presas, el preenfriamiento será suficiente para garantizar una adecuada temperatura del concreto durante el tiempo de fraguado y ganancia de resistencia, logrando disminuir los cambios volumétricos y el agrietamiento.

El sistema de posenfriamiento utilizado en todos los casos que lo requieren, es el que consiste en hacer circular agua enfriada y/o a temperatura ambiente por una tubería ahogada en el concreto, este sistema ha demostrado ser adecuado para mantener la diferencia de temperaturas entre el interior de la masa de concreto y su superficie en niveles adecuados para evitar grandes deformaciones por temperatura diferencial y las grietas asociadas, adicionalmente se logra que en un lapso relativamente corto que va de 60 a 80 días el concreto masivo tenga una temperatura tal que no implique ningún riesgo de agrietamiento.

Se deberá poner especial atención en la instalación de la tubería de posenfriamiento para evitar que ésta se mueva o se rompa y se llene de concreto ocasionando taponaduras y/o filtraciones del agua de enfriamiento y al mismo tiempo mucho cuidado en la operación del sistema para asegurar la temperatura y el gasto especificados. De esta forma evitaremos ineficiencias y esfuerzos no deseados en el concreto

Finalmente, un buen resultado en cuanto a la calidad, el comportamiento, el tiempo y la economía de una estructura de concreto masivo será producto de una serie de medidas en relación al programa de obra, a los materiales, a la disminución de la temperatura de colado y aun adecuado pre y posenfriamiento.

Bibliografía

Bibliografía

- ACI 116 R-00 Terminología del Cemento y del Concreto, IMCYC
- ACI 207.1R-05 Guide to Mass Concrete
- ACI 207.2R-95 Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete
- ACI 207.4R-98 Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete
- ACI 211.1 Proporcionamiento de Mezclas. Concreto Normal, Pesado y Masivo, IMCYC 2004
- ACI 305, ACI 306 Elaboración, Colocación y Protección del Concreto en Clima Caluroso y Frío, IMCYC 1995
- Arcila, Carlos, Concretos Masivos, Noticreto 63 abril, mayo y junio y 64 julio, agosto y septiembre 2002
- CFE e Instituto de Ingeniería, UNAM, Manual de Tecnología del Concreto, Limusa, México, 1994.
- CFE 40 Años de Experiencia en la Construcción de Centrales Hidroeléctricas en México, 1994
- CNA Memoria Técnica Proyecto Luis Donaldo Colosio (Huites) 1996
- Gajda, John and Vangeem Martha, Controlling Temperatures in Mass Concrete, Concrete International, January 2002
- Gajda, John; Save Time and Money on Mass Concrete Construction, Concrete Technology, September- December 2003
- IMCYC Control del Agrietamiento de Estructuras de Concreto, 1981
- IMCYC Nuevo Perfil para Monterrey Puente de la Unidad, Construcción y Tecnología, marzo 2004
- Kosmatka, Steven et al; Diseño y Control de Mezclas de Concreto, PCA 2004
- Mangel – Seeling Preparación y Empleo del Hormigón
- Mehta, Kumar y Monteiro, Paulo; Concreto: Estructura, Propiedades y Materiales, IMCYC, 1998

- Moreno, Erick et al; Construcción del Muelle de Progreso, Ingeniería Revista Académica, UAY, enero-abril 2004
- Neville, Adam; Tecnología del Concreto, IMCYC 1984
- No author, Cooling Concrete Mixes with Liquid Nitrogen, CONCRETE CONSTRUCTION MAGAZINE 1977-05-01
- Norma Mexicana NMX – C – 414 – ONNCCE – 1999 CEMENTOS HIDRÁULICOS
- Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2004 AGREGADOS PARA CONCRETO
- Norma Mexicana NMX-C-122-ONNCCE-2004 AGUA PARA CONCRETO
- PCA, Concrete Information, Concrete for Massive Structures, 1987
- Jon Poole, Kyle Riding, Ralph Browne, and Anton Schindle, Temperature Management of Mass Concrete Structures, CONCRETE CONSTRUCTION MAGAZINE 2006-11-01
- <http://www.hormigonerospr.org/CHOR06-2.pdf> 10 de marzo de 2007
- http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0306106-091931/03Jaol03de15.pdf 10 de marzo de 2007