

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

(Informe 2)



Elaborado por:

ING. PABLO JHOEL PEÑA TORRES

Noviembre 2020

Lima, Perú

I2: CONCRETO MASIVO

Indice

1. Introducción	5
2. Recomendaciones constructivas para vaciados de concreto masivo	6
2.1. Generalidades Normativas	7
2.2. Controles Térmicos	10
2.2.1. Instrumentación	11
2.2.2. Control de la Temperatura máxima en el núcleo del elemento (T_{MAX})	12
2.2.3. Control del diferencial térmico admisible ($\Delta T_{admisible}$)	19
2.2.4. Bloque Experimental	21
3. Método de cálculo para determinar la temperatura máxima en el núcleo de concreto (T_{MAX})	22
3.1. Datos para la estimación de la temperatura máxima en el núcleo de concreto	22
3.2. Etapas del cálculo	23
3.2.1. Estimación de la liberación de calor al infinito por el cemento	23
3.2.2. Consideración de la influencia de la relación a/c	24
3.2.3. Estimación del incremento de temperatura en estado adiabático	25
3.2.4. Consideración de los desperdicios térmicos	25
3.2.5. Estimación de la temperatura máxima en el núcleo de concreto	26
3.3. Ejemplos de aplicación	27
4. Método de cálculo para determinar el diferencial térmico admisible ($\Delta T_{admisible}$)	31
4.1. Etapas de calculo	31
4.2. Ejemplos de aplicación	36
4.3. Fisuración en elementos masivos	41
5. Bibliografía	43



I2: CONCRETO MASIVO

Lista de figuras

Figura 1: Ejemplo de secuencia de vaciado de concreto masivo	9
Figura 2: Ubicación de sensores de temperatura en la sección de concreto masivo.	11
Figura 3: Curva de evolución de la temperatura en el núcleo de concreto.....	12
Figura 4: Enfriamiento del concreto utilizando nitrógeno líquido (Fuente: Internet - ARGOS). 14	
Figura 5: Estructura masiva vaciada en varias secciones [9].	17
Figura 6: Variación de temperatura en el núcleo de elementos de concreto masivo de diferentes espesores [10].....	17
Figura 7: Esquema de distribución de la tubería de post enfriamiento del concreto [12].	18
Figura 8: Diferencia entre la generación de temperatura con tuberías y sin tuberías.....	19
Figura 9: Microclima instalado en vaciado de concreto masivo	20
Figura 10: Bloque experimental de sección de concreto masivo 0,6m x 0,6m x 0,6m [13]	21
Figura 11: Estimación del calor máximo generado a largo tiempo por el cemento (Qm)	24
Figura 12: Estimación del término correctivo ψ ligado a la relación a/c	25
Figura 13: Estimación del coeficiente de reducción R ligado a la liberación térmica	26
Figura 14: Muro contra terreno de 0,6m.	27
Figura 15: Cimentación de concreto masivo de 3m de espesor.	28
Figura 16: Cimentación de concreto masivo de 2m de espesor.	29
Figura 17: Abaco del grado de restricción por tracción en el centro de la sección [16, p. 207]. 34	
Figura 18: Influencia del tipo de agregado en el coeficiente de expansión térmica del concreto [18].	35
Figura 19: Diferencial térmico admisible vs. Evolución del $f'c$	38
Figura 20: Diferencial térmico admisible vs. Evolución del $f'c$	40
Figura 21: Evolución del Diferencial térmico admisible en el tiempo.....	40
Figura 22: Espesores de fisuras registradas en elementos masivos.....	41



I2: CONCRETO MASIVO

Lista de tablas

Tabla 1: Efecto de la temperatura de los materiales sobre la temperatura inicial del concreto... 15	15
Tabla 2: Efecto del hielo (60kg) sobre la temperatura del concreto..... 16	16
Tabla 3 : Diferenciales térmicos admisibles (°C) basados en valores típicos asumiendo α y capacidad de deformación a tracción (Bamforth y Price 2007) [2]..... 32	32
Tabla 4: Efecto del tipo de agregado en el coeficiente de expansión térmica del concreto (Davis, 1930) [19]..... 36	36
Tabla 5: Tolerancia de espesores de fisuras según la exposición (Tabla 4,1 ACI 224R-01) 42	42



I2: CONCRETO MASIVO

1. Introducción

El uso de concreto masivo en el mundo comenzó con la construcción de presas de concreto, los cuales aumentaron su frecuencia de forma significativa durante los primeros años del siglo XX con la mejora de las capacidades de colocación de concreto [1, p. 207]. A medida que aumentaba el tamaño de los proyectos, se comenzaron a observar fisuras significativas en grandes elementos de concreto recién colocados. En 1930, se formó un comité del American Concrete Institute (ACI) para examinar y resolver los problemas que se habían descubierto. En ese momento, la presa Hoover en Nevada se encontraba en las primeras etapas de planificación. Debido al tamaño sin precedentes de la presa, se llevó a cabo una investigación exhaustiva para determinar los factores que estaban causando el agrietamiento en estos grandes elementos de concreto. Los resultados del estudio en la presa Hoover fueron el uso de cementos de bajo calor de hidratación, el uso de tuberías de enfriamiento embebidas al interior del concreto (usadas por primera vez) y una nueva forma de construcción de presas (ACI 207.1R-05).

A lo largo de los años, a medida que la tecnología del concreto ha mejorado y las estructuras se han hecho más grandes, los elementos de concreto masivo se han convertido en estructura comunes, entre las cuales se incluyen los cimientos de puentes y de grandes edificios, así como muchos elementos de puentes y estructuras de proyectos mineros. De tal manera, las investigaciones sobre problemas asociados con la construcción y comportamiento del concreto masivo han aumentado debido a la demanda de estructuras con mejor desempeño [2].

En este documento se presentan recomendaciones constructivas que tienen como fin controlar la temperatura del concreto durante un vaciado masivo y así evitar las patologías relacionadas a este tipo de concreto. De igual manera se presentan métodos de cálculo, tanto para estimar la temperatura máxima en el núcleo del elemento vaciado (T_{MAX}) como para estimar el diferencial térmico admisible en el concreto ($\Delta T_{admisible}$). La estimación de la temperatura máxima en el núcleo de concreto servirá como parámetro de prevención ante la posible formación de etringita diferida (DEF) en el concreto y el cálculo del diferencial térmico admisible tiene como fin el control de la fisuración del concreto por efectos térmicos.



I2: CONCRETO MASIVO

2. Recomendaciones constructivas para vaciados de concreto masivo

Cuando se programa la construcción de elementos estructurales considerados como vaciados masivos, el planeamiento debe girar alrededor de la definición de actividades que ayuden a disminuir la temperatura máxima del concreto en estado endurecido; para este fin, uno de los parámetros a tomar en cuenta son las condiciones térmicas del medio ambiente, las cuales son difícilmente controlables. Es más, normalmente no es posible elegir la estación en la cual se vaciará el concreto debido a las limitaciones de la planificación general del proyecto (esto es de mucha importancia cuando existen grandes diferencias climáticas entre estaciones). Sin embargo, es recomendable elegir un momento favorable del día para minimizar la temperatura del concreto fresco, lo recomendable es vaciar al final del día o durante la noche para minimizar la temperatura de los componentes del concreto. Por ejemplo, la magnitud del impacto de este parámetro en la temperatura máxima del concreto (en el núcleo del elemento), en un vaciado de concreto nocturno (en época de verano) se traduce en una disminución de 5 °C aproximadamente [3].

Una vez definido el diseño de mezcla, el cual debe ser el menos exotérmico posible, se debe abarcar otro parámetro de gran importancia para disminuir la temperatura máxima del núcleo de concreto (T_{MAX}), este parámetro es la temperatura del concreto fresco al momento de su colocación. Para este fin es necesario enfriar todos los componentes del concreto (cementante, agua y agregados) y así obtener una temperatura inicial del concreto que contribuya a obtener una temperatura máxima (T_{MAX}) dentro de los límites permitidos.

Es recomendable que, en secciones de grandes dimensiones, no se economice en encofrados interiores detallados en los planos a fin de vaciar solo las secciones realmente necesarias para la resistencia de la estructura (por ejemplo, los pilares de los puentes). También es necesario evitar crear secciones masivas (a fin de facilitar vaciados) mientras que las secciones fueron diseñadas huecas. Otra recomendación para los elementos de grandes dimensiones donde se estiman temperaturas que superan los límites permisibles, es prever un fraccionamiento de la sección y realizar el vaciado en varias partes de tal manera que favorezca los intercambios térmicos. Sin embargo, el fraccionamiento solo es eficaz si se respeta un intervalo significativo (mínimo de una semana) entre vaciados sucesivos. Del mismo modo, es necesario permanecer dentro de los límites aceptables a fin de mantener un comportamiento monolítico de la estructura, colocar las juntas de construcción en zonas adecuadas desde el punto de vista estructural y respetar los estándares de calidad de un vaciado de concreto en una junta de construcción [3].



I2: CONCRETO MASIVO

Otra alternativa es la instalación de un circuito de enfriamiento, la cual interfiere con los trabajos de armado de acero por lo cual los tiempos de ejecución aumentan. Esta alternativa para el enfriamiento de la masa de concreto debe ser un último recurso (considerar que al final es necesario volver a sellar las tuberías con una lechada de cemento) [3].

Finalmente, el uso de microclimas como medio para realizar un control del diferencial térmico del concreto, es una alternativa bastante común en proyectos con vaciados de concreto masivo ubicado en climas fríos.

2.1. Generalidades Normativas

Esta sección detalla las recomendaciones y requerimientos dados por diversos comités del ACI referente a los vaciados de concreto masivo:

El ACI 224.3R-95 [4, p. 3] en el ítem 10 “Mass Concrete” detalla algunas recomendaciones preventivas, así como recomendaciones constructivas para la colocación de las juntas de construcción y juntas de contracción a fin de controlar los cambios volumétricos y para facilitar la construcción:

Las recomendaciones preventivas son las mencionadas a continuación:

- Uso de cemento de moderado calor de hidratación y puzolanas adecuadas;
- Uso de un contenido mínimo de cemento acorde a los requerimientos de resistencia y durabilidad;
- Selección cuidadosa de agregados y proporciones de la mezcla para producir concreto con la mejor resistencia a la fisuración o la mayor capacidad de deformación a tracción;
- Limitar la velocidad de colocación del concreto cuando no se usa refrigeración;
- Pre enfriamiento de ingredientes del concreto;
- Post enfriamiento luego de la colocación del concreto;
- Aislar las superficies expuestas durante el clima frío;
- Controlar la época del año en que se permite la colocación. Esto es especialmente útil cuando existen grandes diferencias estacionarias y el concreto se puede colocar en un periodo corto de tiempo.

El distanciamiento adecuado de las juntas es controlado por el tipo y tamaño de las estructuras, así como el clima predominante durante la construcción, requerimiento del cronograma de construcción y los requisitos de control de temperatura. Para las juntas de contracción se ha demostrado que un espaciamiento de 40 a 60 pies (12 a 18m) es satisfactorio



I2: CONCRETO MASIVO

y para las juntas de construcción el espaciado vertical recomendado es generalmente de 5 a 7 ½ pies (1,5 a 2,25m) para presas de gravedad y 10 pies (3m) o más para presas de arco delgado, pilares y estribos.

De lo antes mencionado se desprende que el distanciamiento recomendado tanto para las juntas de contracción como para las juntas de construcción son dadas para presas, las cuales son estructuras de bajo contenido de cemento (150kg en promedio) y sin acero estructural. Por lo que estos valores no son aplicables para el distanciamiento de juntas en elementos masivos estructurales que tienen acero de refuerzo embebido como parte de su diseño y un contenido de cemento superior a los 300kg.

El ACI 304R-00 [5, p. 304] en el ítem 5.6 “Mass Concreting” detalla recomendaciones constructivas para la colocación de concreto masivo:

- El equipo y el método utilizado para colocar el concreto masivo debe minimizar la segregación del agregado grueso del concreto. Aunque una pequeña segregación de agregado grueso no es objetable, las agrupaciones de agregado grueso deben ser dispersados antes de vaciar el concreto sobre ellos. El agregado segregado no será eliminado por operaciones posteriores de colocación y compactación.
- El concreto debe colocarse en capas horizontales que no excedan los 2 pies (610mm) de profundidad y deben evitarse las capas inclinadas y las juntas frías. Para la construcción monolítica, cada capa de concreto debe colocarse mientras la capa subyacente aun responde a la vibración y las capas deben ser lo suficientemente superficiales para permitir que las dos capas se integren mediante una vibración adecuada.
- El método de colocación escalonado debe usarse en estructuras masivas donde se involucran grandes áreas para minimizar la aparición de juntas frías. En este método, se construye ascendiendo en una serie de capas horizontales escalonadas de 12 a 18 pulgadas (300 a 450mm) de espesor. La colocación de concreto en cada capa se extiende por todo el ancho del bloque y las operaciones de colocación progresan desde un extremo superior hasta el otro, exponiendo solo pequeñas áreas de concreto a la vez. A medida que avanza la colocación, parte de la sección se completara mientras la colocación del concreto continua en el resto de la estructura.

Es necesario precisar que estas sugerencias que limitan el espesor de una capa de concreto son dadas en función de la capacidad del concreto para ser colocado sin segregación, así como bajo una correcta compactación. Por lo cual, estos espesores de capas pueden aumentar si es que se demuestra que el desempeño del concreto permite una correcta compactación sin segregación.



I2: CONCRETO MASIVO

Diseño de secuencia de vaciado / Fundación Stacker

N° Celda	Altura Acumulada (m)	Vista lateral															
10	3.20	17.45 Celda N° 52	18.00 832.0	19.30 Celda N° 59	19.45 944.0	21.00 Celda N° 65	21.15 1040.0	22.15 Celda N° 70	22.30 1120.0	23.15 Celda N° 74	23.30 1184.0	0.00 Celda N° 77	0.15 1232.0	0.30 Celda N° 79	0.45 1296.0	0.45 Celda N° 80	1.00 1280.0
9	2.88	15.45 Celda N° 44	16.00 704.0	17.30 Celda N° 51	17.45 816.0	19.15 Celda N° 58	19.30 928.0	20.45 Celda N° 64	21.00 1024.0	22.00 Celda N° 69	22.15 1104.0	23.00 Celda N° 73	23.15 1168.0	23.45 Celda N° 78	0.00 Celda N° 78	0.15 Celda N° 78	0.30 1248.0
8	2.56	13.45 Celda N° 36	14.00 576.0	15.30 Celda N° 43	15.45 688.0	17.15 Celda N° 50	17.30 800.0	19.00 Celda N° 57	19.15 912.0	20.30 Celda N° 63	20.45 1008.0	21.45 Celda N° 68	22.00 1088.0	22.45 Celda N° 72	23.00 1152.0	23.30 Celda N° 75	23.45 1200.0
7	2.24	11.45 Celda N° 28	12.00 448.0	13.30 Celda N° 35	13.45 560.0	15.15 Celda N° 42	15.30 672.0	17.00 Celda N° 49	17.15 784.0	19.00 Celda N° 56	19.15 896.0	20.30 Celda N° 62	20.45 992.0	21.45 Celda N° 67	22.00 1072.0	22.30 Celda N° 71	22.45 1136.0
6	1.92	10.00 Celda N° 21	10.15 336.0	11.30 Celda N° 27	11.45 432.0	13.15 Celda N° 34	13.30 544.0	15.00 Celda N° 41	15.15 656.0	17.00 Celda N° 48	17.15 768.0	18.30 Celda N° 54	18.45 880.0	20.00 Celda N° 61	20.15 976.0	21.15 Celda N° 66	21.30 1056.0
5	1.60	8.30 Celda N° 15	8.45 240.0	9.45 Celda N° 20	10.00 320.0	11.15 Celda N° 26	11.30 416.0	13.00 Celda N° 33	13.15 528.0	14.45 Celda N° 40	14.60 640.0	16.00 Celda N° 47	16.15 752.0	18.15 Celda N° 54	18.30 864.0	19.45 Celda N° 60	20.00 960.0
4	1.28	7.15 Celda N° 10	7.30 160.0	8.15 Celda N° 14	8.30 224.0	9.30 Celda N° 19	9.45 304.0	11.00 Celda N° 25	11.15 400.0	12.45 Celda N° 32	13.00 512.0	14.30 Celda N° 39	14.45 624.0	16.15 Celda N° 46	16.30 736.0	18.00 Celda N° 53	18.15 848.0
3	0.96	6.15 Celda N° 6	6.30 96.0	7.00 Celda N° 9	7.15 144.0	8.00 Celda N° 13	8.15 208.0	9.15 Celda N° 18	9.30 288.0	10.45 Celda N° 24	11.00 384.0	12.30 Celda N° 31	12.45 496.0	14.15 Celda N° 38	14.30 608.0	16.00 Celda N° 45	16.15 720.0
2	0.64	5.30 Celda N° 3	5.45 48.0	6.00 Celda N° 5	6.15 80.0	6.45 Celda N° 8	7.00 128.0	7.45 Celda N° 12	8.00 192.0	9.00 Celda N° 17	9.15 272.0	10.30 Celda N° 23	10.45 368.0	12.15 Celda N° 30	12.30 480.0	14.00 Celda N° 37	14.15 592.0
1	0.32	6.00 Celda N° 1	6.15 16.0	6.15 Celda N° 2	6.30 32.0	6.45 Celda N° 4	6.00 64.0	6.30 Celda N° 7	6.45 112.0	6.45 Celda N° 11	7.30 176.0	7.45 Celda N° 16	8.45 256.0	9.00 Celda N° 22	10.15 352.0	12.00 Celda N° 29	12.15 464.0
Avance Parcial		2.5		2.5		2.5		2.5		2.5		2.5		2.5		2.5	
Avance Acumulado		2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0								

Figura 1: Ejemplo de secuencia de vaciado de concreto masivo

El ACI 301-16 [6, p. 301] en el ítem 8 “Mass concrete” cubre los requisitos que debe cumplir el concreto masivo en la construcción. Adicionalmente a los procedimientos, requerimientos y documentación que debe darse para un concreto convencional, se debe cumplir con lo siguiente:

Con respecto a las restricciones térmicas y a menos que se especifique lo contrario, se aplicaran los siguientes criterios para la colocación de concreto masivo:

- La temperatura máxima en el núcleo de concreto (T_{MAX}) después de la colocación no debe exceder los 70 °C (158 °F); y
- La diferencia máxima de temperatura ($\Delta T_{admisible}$) entre el núcleo y la superficie de colocación no debe exceder los 19 °C (35 °F).

Sin embargo, estas limitaciones pueden ser modificadas en función a las características mecánicas del concreto, propiedades físico-químicas del cemento y la exposición a la que este estará expuesto durante su vida útil.

De igual manera, se debe presentar un plan de control térmico para cada colocación de concreto masivo. El plan de control térmico debe incluir los siguientes elementos:

- Dosificación de la mezcla de concreto;
- Aumento de temperatura adiabático del concreto ($\Delta T_{adiabatico}$) ya sea calculado o medido;
- Límite superior de la temperatura del concreto fresco al momento de la colocación;



I2: CONCRETO MASIVO

- Descripción de medidas y equipos específicos que se utilizaran para garantizar que la temperatura máxima de colocación (T_{FRESCO}), no exceda el límite de temperatura máxima especificada;
- Cálculo de la temperatura máxima de colocación, basada en las condiciones esperadas al momento de la colocación y el uso de medidas propuestas para controlar las temperaturas.
- Descripción de medidas y equipos específicos que se utilizaran para asegurar que el diferencial térmico no exceda el límite especificado;
- Cálculo del máximo diferencial térmico ($\Delta T_{\text{admisible}}$) basado en las condiciones esperadas al momento de la colocación, así como el uso de las medidas propuestas para controlar el diferencial térmico;
- Descripción de equipos y procedimientos que se utilizaran para monitorear y registrar las temperaturas y diferenciales térmicos;
- Plano o esquema que muestre la ubicación de los sensores de temperatura en la estructura;
- Descripción del formato y determinación de la frecuencia con la que proporcionara datos de temperatura al representante del propietario (Supervisión);
- Descripción de medidas a abordar para reducir las temperaturas excesivas y diferencial de temperatura, en caso ocurrieran;
- Descripción de los procesos de curado, incluido los materiales y métodos, así como la duración del curado, y;
- Descripción de los procedimientos de remoción del encofrado para asegurar que el diferencial de temperatura en la superficie expuesta temporalmente no exceda el límite de diferencial térmico y la descripción de la manera en la que se mantendrá el curado.

En caso se cambie la formulación de concreto, se debe actualizar el plan de control térmico.

2.2. Controles Térmicos

Para lograr cumplir con las restricciones térmicas establecidas para cada proyecto; es necesario realizar controles térmicos al concreto, ya sea en estado fresco controlando la temperatura de sus componentes, como en estado endurecido utilizando sistemas de medición que registren el incremento de temperatura en el concreto masivo, estas actividades tienen como fin monitorear y reducir las temperaturas que se obtendrán in situ durante los primeros días luego del vaciado.

En estado endurecido, se debe controlar la temperatura del concreto y el diferencial térmico dentro del concreto desde el momento en que se coloca hasta que la temperatura interna máxima haya descendido, a fin de que el diferencial térmico entre la temperatura ambiente diaria promedio y la



I2: CONCRETO MASIVO

temperatura interna al momento de la remoción del encofrado o microclima sea menor que el límite del diferencial térmico permitido [6, p. 30].

Los métodos para controlar las temperaturas del concreto masivo varían desde los relativamente simples a los complejos y de los económicos a los costosos. Dependiendo de cada situación particular, puede resultar ventajoso preferir uno o más métodos sobre otro. Estos métodos son:

- Uso de materiales que generen bajo calor de hidratación
- Pre enfriamiento del concreto
- Post enfriamiento del concreto
- Aislamiento de la superficie del concreto

2.2.1. Instrumentación

Para realizar el monitoreo de las temperaturas del concreto, el ACI 301-16 [6, p. 3] solicita colocar un sensor de temperatura en el núcleo de concreto y otro sensor de temperatura a una profundidad de 2 pulgadas del centro de la superficie exterior más cercana. Asimismo, se colocará un sensor adicional en cada ubicación para que sirva de respaldo en caso de que falle el otro sensor de temperatura. Además, se debe colocar un sensor de temperatura en un lugar sombreado para monitorear la temperatura ambiente del sitio.

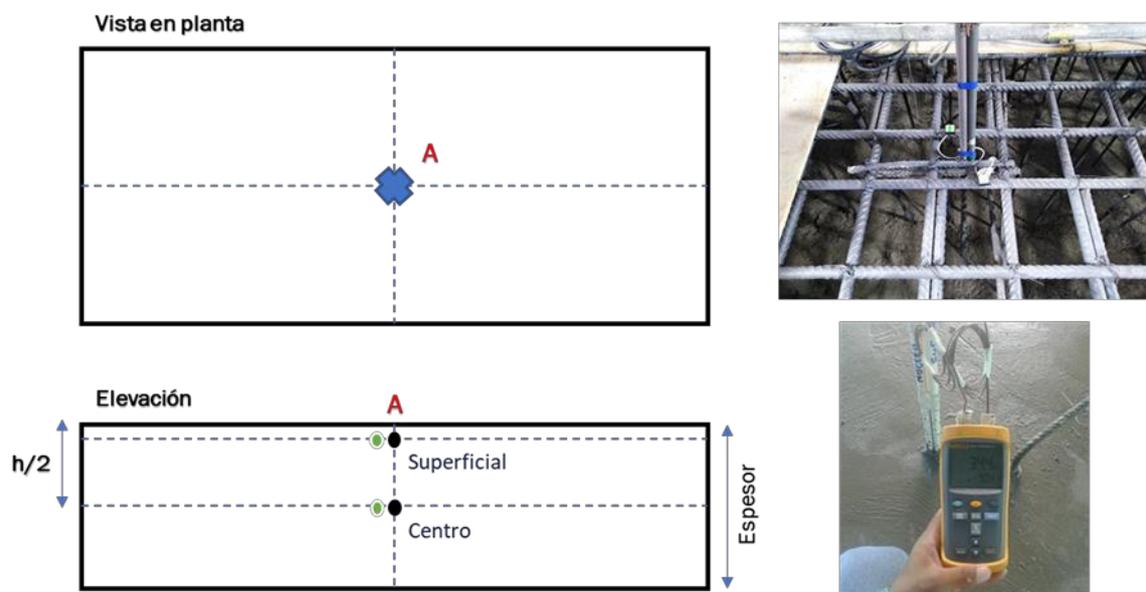


Figura 2: Ubicación de sensores de temperatura en la sección de concreto masivo.

Se debe controlar la temperatura cada hora utilizando sensores electrónicos capaces de medir la temperatura desde 0 °C (32 °F) a 100 °C (212 °F) con una precisión de 1,1 °C (2 °F). Resulta

I2: CONCRETO MASIVO

imprescindible verificar que los sensores de temperatura estén operativos antes de colocar el concreto. Diariamente se debe proporcionar los datos de los sensores al propietario.

Para controlar las excesivas temperaturas o diferenciales térmicos, se debe comparar estos parámetros cada 12 horas con los límites máximos especificados. Si alguno de los dos excede los límites especificados, se debe tomar medidas inmediatas tal cual se describe en el plan de control térmico aceptado para remediar estas situaciones. No debería colocarse concreto masivo adicional hasta que se haya identificado la causa de la excesiva temperatura o diferencial térmico y se haya adoptado las correcciones.

2.2.2. Control de la Temperatura máxima en el núcleo del elemento

(T_{MAX})

La temperatura máxima alcanzada en el núcleo de concreto depende de varias variables, las cuales están en función tanto del control de sus materiales y la dosificación del concreto como del proceso constructivo. Esta temperatura máxima se podría expresar en función de tres parámetros según lo indicado en la ecuación 1:

$$T_{MAX} = T_o + R \cdot \Delta T_{adiabatico} \quad \dots \quad (1)$$

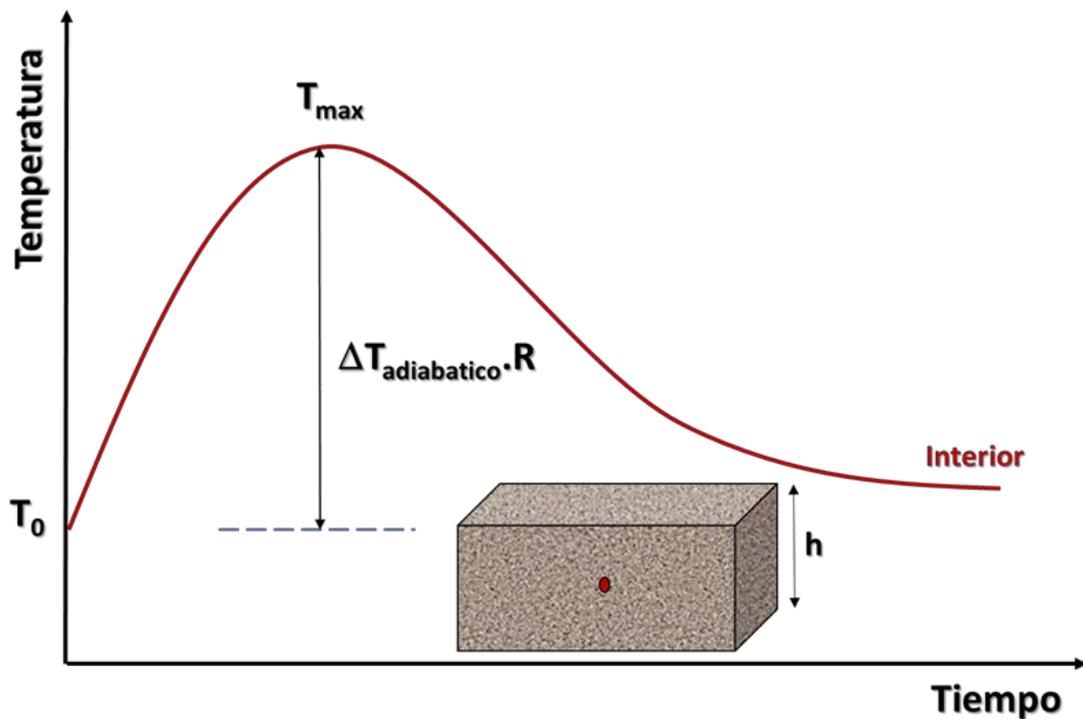


Figura 3: Curva de evolución de la temperatura en el núcleo de concreto

I2: CONCRETO MASIVO

Donde:

T_o : Temperatura inicial del concreto ($^{\circ}\text{C}$)

R: Coeficiente de reducción en función del espesor mínimo de la sección de concreto.

$\Delta T_{\text{adiabatico}}$: Incremento de temperatura generado por el concreto en estado adiabático ($^{\circ}\text{C}$)

Existen diferentes formas de reducir el desarrollo de calor dentro del concreto, estas están dadas por criterios de diseño y métodos constructivos.

A continuación, se describen actividades que tienen como objetivo disminuir el calor generado dentro del concreto en función de parámetros que afectan a las variables establecidas en la ecuación 1.

a) Incremento de temperatura adiabático ($\Delta_{\text{adiabatico}}$)

Como el cemento es el principal componente que produce calor, la primera medida debería ser optimizar la dosificación del concreto reduciendo su cantidad o sustituyéndolo por cementantes que liberen menor calor. Los ligantes más comunes son la micro sílice, cenizas volantes y puzolanas. Además de reducir la cantidad de cementante y/o sustituyéndolo por uno que genere menor calor de hidratación, se pueden usar agregados de mayor diámetro para reducir la pasta de cemento necesaria [7].

b) Temperatura inicial del concreto (T_o)

Siendo la temperatura inicial del concreto una de las variables relevantes para el control térmico; es usual utilizar el método de preenfriamiento de los componentes del concreto (agregados, agua y cemento) antes del mezclado para disminuir la temperatura del concreto fresco al momento de su colocación. La temperatura inicial del concreto se relaciona con la temperatura, calor específico y cantidad de cada material.

La Portland Cement Association [8] muestra expresiones para calcular la temperatura inicial del concreto fresco en función de las temperaturas de sus componentes según lo indicado en la ecuación 2 (NRMCA 1962).

$$T_o(^{\circ}\text{C}) = \frac{0.22(T_a M_a + T_c M_c) + T_w M_w}{0.22(M_a + M_c) + M_w} \quad \dots \quad (2)$$

Donde:

- T_o : temperatura del concreto fresco ($^{\circ}\text{C}$)
- T_c : temperatura del cemento ($^{\circ}\text{C}$)
- T_w : temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$)
- T_a : temperatura de los agregados totales ($^{\circ}\text{C}$)



I2: CONCRETO MASIVO

- M_c : peso del cemento (kg)
- M_w : peso del agua (kg)
- M_a : peso de los agregados totales (kg)

De todos los materiales en el concreto, el agua es el elemento más fácil de enfriar debido a que su proporción en el concreto es menor con respecto al resto de materiales, el agua fría va a producir una reducción moderada en la temperatura del concreto. Por lo que se debe usar agua de una fuente fría. El agua se debe almacenar en depósitos o tanques que no sean expuestos directamente a los rayos del sol. El agua se puede enfriar por refrigeración, nitrógeno líquido o hielo. Al enfriarse el agua cerca de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($3,4\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $4\text{ }^{\circ}\text{F}$), el concreto se enfría cerca de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1\text{ }^{\circ}\text{F}$). Sin embargo, como el agua representa solo un pequeño porcentaje de la mezcla, es difícil bajar la temperatura del concreto más de $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($8\text{ }^{\circ}\text{F}$), a través del enfriamiento del agua [8].



Figura 4: Enfriamiento del concreto utilizando nitrógeno líquido (Fuente: Internet - ARGOS).

En la Tabla 1 se muestra un ejemplo de cálculo para determinar la temperatura inicial del concreto.

I2: CONCRETO MASIVO

Tabla 1: Efecto de la temperatura de los materiales sobre la temperatura inicial del concreto

Material	Peso M (kg)	Calor específico (kJ/kg.K)	Joules para variar la temperatura, 1 °C	Temperatura inicial del material T (°C)	Joules totales en el material
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
			(1) x (2)		(3) x (4)
Cemento	420 (Mc)	0,92	386	40 (Tc)	15456
Agua	160 (Mw)	4,184	669	35 (Tw)	23430
Agregados totales	1860 (Ma)	0,92	1711	35 (Ta)	59892

$\Sigma = 2767$

$\Sigma = 98778$

Temperatura inicial del concreto = $98778/2767 = 35,7 \text{ }^\circ\text{C}$

Para disminuir 1°C en la temperatura inicial:

- La temperatura del cemento se debe reducir = $2767/386 = 7,2 \text{ }^\circ\text{C}$
- La temperatura del agua se debe disminuir = $2767/669 = 4,1 \text{ }^\circ\text{C}$
- Los agregados se deben enfriar = $2767/1711 = 1,6 \text{ }^\circ\text{C}$

De igual manera el uso de hielo en reemplazo del agua es una alternativa bastante común para reducir la temperatura del concreto. El hielo se puede usar como parte del agua de mezcla, siempre que se derrita completamente durante el mezclado. Cuando se adiciona hielo como parte del agua de la mezcla, se debe considerar el efecto del calor de fusión del hielo, esto modifica la ecuación para obtener la temperatura del concreto fresco; esta expresión modificada se muestra en la ecuación 3 [8].

$$T_o(^{\circ}\text{C}) = \frac{0.22(T_a M_a + T_c M_c) + T_w M_w - 80 M_i}{0.22(M_a + M_c) + M_w + M_i} \dots \quad (3)$$

Donde:

- M_i : peso de hielo (kg) (NRMCA 1962 y Mindess, y Young 1981)
- Calor de fusion del hielo : 335 kJ/kg

El hielo molido o en escamas es mas eficiente que el agua fria para disminuir la temperatura del concreto. Las cantidades de hielo y agua no deben exceder los requerimientos de agua de la mezcla total. El volumen de hielo no debe reemplazar más de 75% del agua total de la mezcla. La reducción máxima de temperatura con el uso de hielo se limita a cerca de 11°C ($20 \text{ }^\circ\text{F}$). En caso sea necesaria una reducción de temperatura mayor, la inyección de nitrógeno líquido puede ser la mejor alternativa. La tabla 2 muestra un ejemplo de cálculo de temperatura del concreto fresco cuando se adiciona 60kg. de hielo ($M_i=60\text{kg}$) [8].



I2: CONCRETO MASIVO

Tabla 2: Efecto del hielo (60kg) sobre la temperatura del concreto

Material	Peso M (kg)	Calor específico (kJ/kg.K)	Joules para variar la temperatura, 1 °C	Temperatura inicial del material T (°C)	Joules totales en el material
	1	2	3	4	5
			(1) x (2)		(3) x (4)
Cemento	420 (Mc)	0,92	386	40 (Tc)	15456
Agua	100 (Mw)	4,184	418	35 (Tw)	14644
Agregados totales	1860 (Ma)	0,92	1711	35 (Ta)	59892
Hielo	60 (Mi)	4,184	251	0 (Ti)	0

$$\Sigma = 2767$$

Menos 60 (Mi) x calor de fusión, (335 kJ/kg) = -20100
 $\Sigma = 69892$

$$\text{Temperatura del concreto} = 69892/2767 = 25,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Los agregados tienen un efecto marcado sobre la temperatura del concreto fresco debido a que representan del 70% al 85% del peso total del concreto. Para bajar la temperatura del concreto en 0,5 °C (1 °F) se hace necesaria una reducción de la temperatura del agregado de solamente 0,8 °C a 1,1 °C (1,5 °F a 2 °F). Hay muchos métodos sencillos para mantener el agregado a baja temperatura. Las reservas de los agregados se deben proteger del sol y se deben mantener húmedas a través de rociado con agua (no rociar con agua salada). El rociado del agregado se debe ajustar para prevenir grandes variaciones en el contenido de humedad de la superficie y así causar una pérdida de asentamiento uniforme [8].

La temperatura del cemento tiene solo un pequeño efecto en la temperatura del concreto debido a su bajo calor específico y su relativa pequeña proporción en el concreto. Un cambio de temperatura del cemento de 5 °C (9 °F) generalmente cambiará la temperatura del concreto en 0,5 °C (1 °F). Como el cemento pierde calor lentamente durante su almacenamiento, aún puede estar caliente al momento de la entrega. Dado que la temperatura del cemento afecta en cierto grado la temperatura del concreto fresco, algunas especificaciones presentan límites para su temperatura al momento de emplearlo (entre 66 °C a 82 °C según el ACI 305). Sin embargo, es preferible especificar la temperatura del concreto fresco a limitar la temperatura de sus ingredientes individuales (Lerch 1955) [8].

c) Coeficiente de reducción (R)

De la misma manera es usual realizar vaciados de secciones más delgadas (figura 5) con el propósito de reducir la temperatura máxima en el núcleo de concreto, así como acelerar la disipación de calor del elemento recién vaciado (figura 6). No obstante, esta alternativa debe ser



I2: CONCRETO MASIVO

verificada y válida por el diseñador estructural del proyecto, a fin de asegurar que la junta de construcción realizada en la estructura no altere el correcto desempeño estructural del elemento de concreto armado.



Figura 5: Estructura masiva vaciada en varias secciones [9].

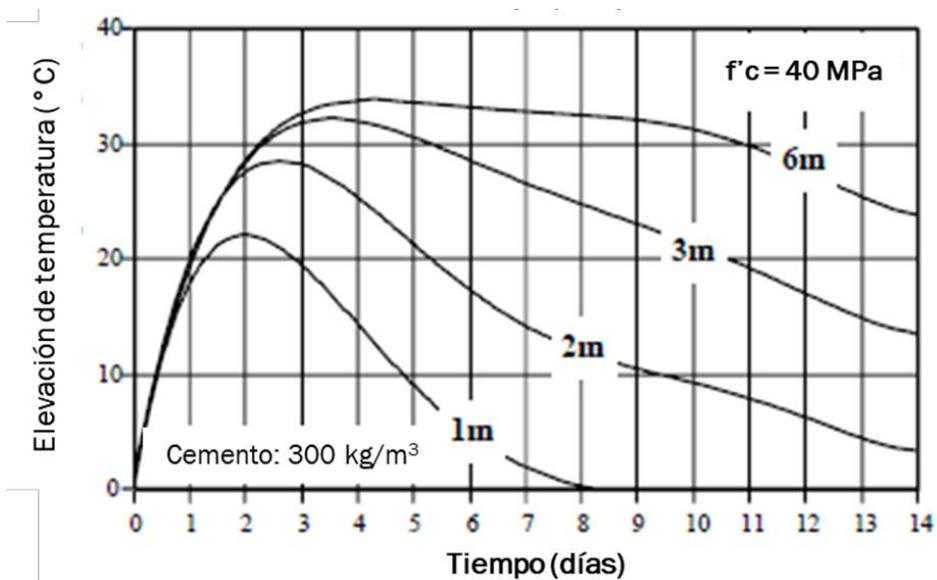


Figura 6: Variación de temperatura en el núcleo de elementos de concreto masivo de diferentes espesores [10].

I2: CONCRETO MASIVO

d) Método de Post enfriamiento ($R. \Delta_{adiabatico}$)

El post enfriamiento del concreto usando tuberías al interior del concreto en forma de serpentines es un procedimiento complementario para el enfriamiento del concreto durante la hidratación del cemento. Para esto, se construye un circuito de enfriamiento en la cual se hace circular agua fresca. Este método está explicado en el ACI 207.4R-93 [11, p. 4] y debe estar sujeto a un diseño del sistema de enfriamiento para evitar la aparición de gradientes térmicos dentro de la masa de concreto, particularmente en las zonas aledañas a los tubos, estos gradientes pueden generar fisuras radiales o tangenciales.

En la Figura 7 se muestra la distribución del sistema de enfriamiento en forma de serpentín en dos niveles. El primer nivel directamente sobre la superficie previa de concreto endurecido y el segundo nivel a una separación vertical de 1,5m con respecto al primero. La distribución horizontal se realizó manteniendo una separación de 1,5m entre la tubería, desarrollando una longitud no mayor de 300m por serpentín para asegurar un enfriamiento uniforme en toda la estructura. A fin de mantener la tubería en su posición durante la colocación del concreto, se empleó una armadura de soporte [12].

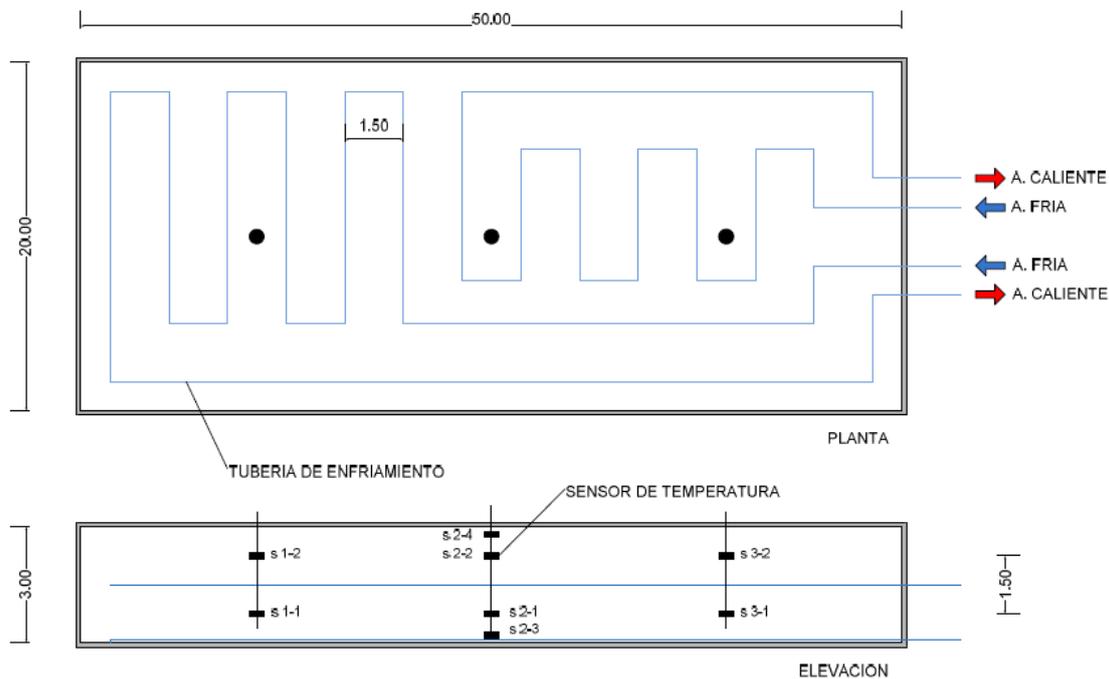


Figura 7: Esquema de distribución de la tubería de post enfriamiento del concreto [12].

Este método es realmente efectivo solo cuando el concreto presenta una exotermia moderada o baja. En el caso de un diseño de mezcla fuertemente exotérmico, no optimizado desde el punto de vista de los problemas térmicos específicos del elemento a vaciar; la liberación de calor (que

I2: CONCRETO MASIVO

se activa por la temperatura) es mucho más rápida que la evacuación de las calorías por el circuito de refrigeración [3].

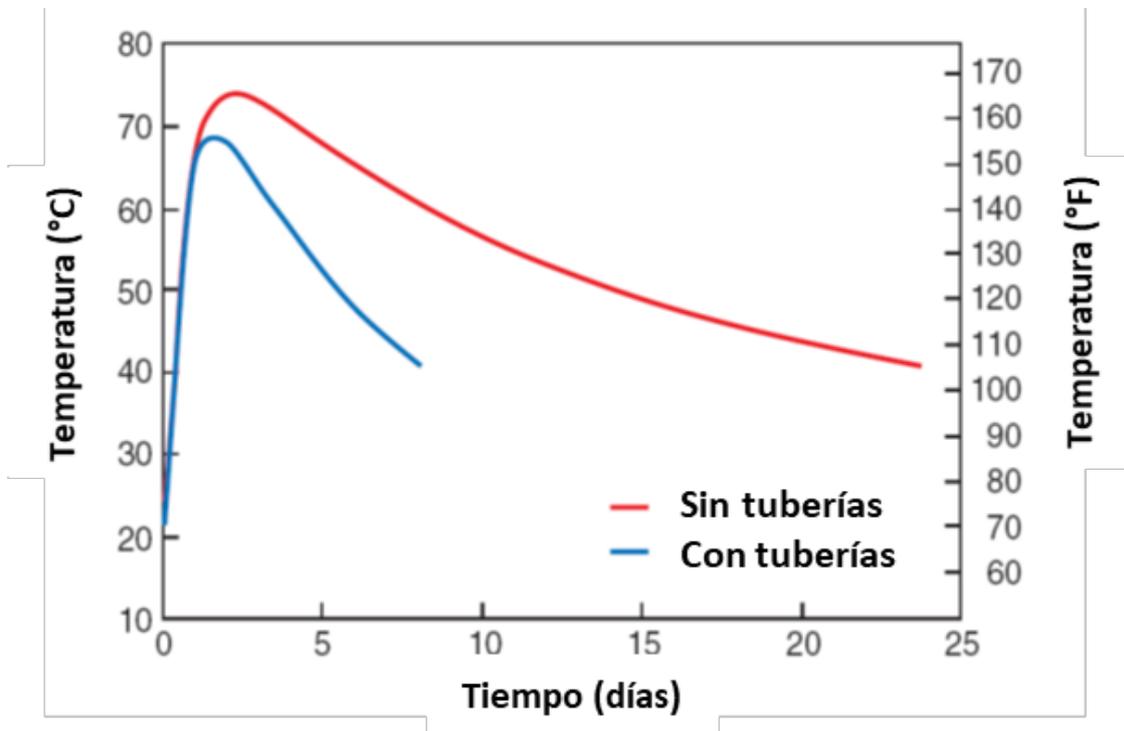


Figura 8: Diferencia entre la generación de temperatura con tuberías y sin tuberías.

La Figura 8 muestra la diferencia del registro de temperaturas de un vaciado de concreto masivo cuando se utiliza tuberías de enfriamiento y cuando no se usan. De la gráfica se observa que el registro térmico usando tuberías de enfriamiento genera una menor temperatura máxima pico y una disminución de temperatura en menor tiempo, lo cual contribuiría de manera positiva a la programación del proyecto.

2.2.3. Control del diferencial térmico admisible ($\Delta T_{\text{admisible}}$)

Se considera el uso de ambientes cerrados que incluyen calefactores como el medio más efectivo de protección para los climas fríos y lograr concretos de alta calidad. Estos microclimas tienen como fin mitigar cargas de viento, nieve y ser impermeables al aire para controlar el diferencial térmico y obtener un concreto durable. Los ambientes cerrados podrán construirse con materiales flexibles o con materiales rígidos.

I2: CONCRETO MASIVO



Figura 9: Microclima instalado en vaciado de concreto masivo

Para la conservación de la humedad, a menos que se especifique lo contrario, se debe curar y proteger el concreto un mínimo de 7 días según lo indicado en el ACI 301-16. La medición de la resistencia debe ser representativa a la resistencia del concreto a 2 pulg. de la superficie de la estructura. La humedad se conservará manteniendo los encofrados en su lugar; para superficies que no están en contacto con encofrados, aplique uno de los procedimientos específicos en el ACI 301-16 (encharcamiento, rociado o aspersion continua, aplicación de coberturas mantenidas continuamente húmedas, aplicación continua de vapor a menos de 65 °C, aplicación de un compuesto de curado conforme a la ASTM C309 o ASTM C1315 u otro método de curado aprobado). A menos que se especifique lo contrario, no utilice curado con agua [6, p. 30].

La elección del encofrado es un aspecto no menos importante, el cual contribuirá a la rápida liberación de calor del concreto. Para estructuras medianas, los encofrados favorecen la disipación térmica pudiendo limitar la temperatura máxima en el núcleo del concreto. A modo de ejemplo, una sección de 40cm con encofrado de madera de concreto de $f'_c = 40\text{MPa}$ utilizando 400 kg/m^3 de Cemento Tipo I podrá conducir a una elevación de temperatura de 40°C. En el caso de la utilización de un encofrado metálico, esta elevación no será mayor a 35°C [3].

I2: CONCRETO MASIVO

2.2.4. Bloque Experimental

En caso se requiera verificar experimentalmente cuáles serán los registros térmicos a obtener en un vaciado de concreto masivo, es recomendable realizar un bloque experimental de concreto, en el cual se simulará el comportamiento térmico de la estructura; en este elemento se utilizará la dosificación de concreto a emplear en el proyecto y se simulara las condiciones a tener en los elementos reales.

Las alternativas para obtener registros térmicos experimentales en cada proyecto antes de realizar los vaciados de las estructuras masivas son la realización de un bloque experimental en laboratorio (Figura 10) o el monitoreo de temperaturas en un elemento estructural provisional del proyecto (por ejemplo la zapata de una torre grúa), este bloque experimental no necesariamente debe tener las dimensiones de las secciones masivas del proyecto (debido a la variedad de espesores que puede existir en los elementos estructurales), sin embargo la lectura de estas temperaturas contribuirán al mejor análisis y predicción térmica de los vaciados masivos del proyecto.

Dentro de este bloque se colocará termocuplas ubicadas en los puntos donde se requieren conocer las temperaturas a analizar, en principio es recomendable colocarlas en el centro y a 2" de la superficie superior del bloque.

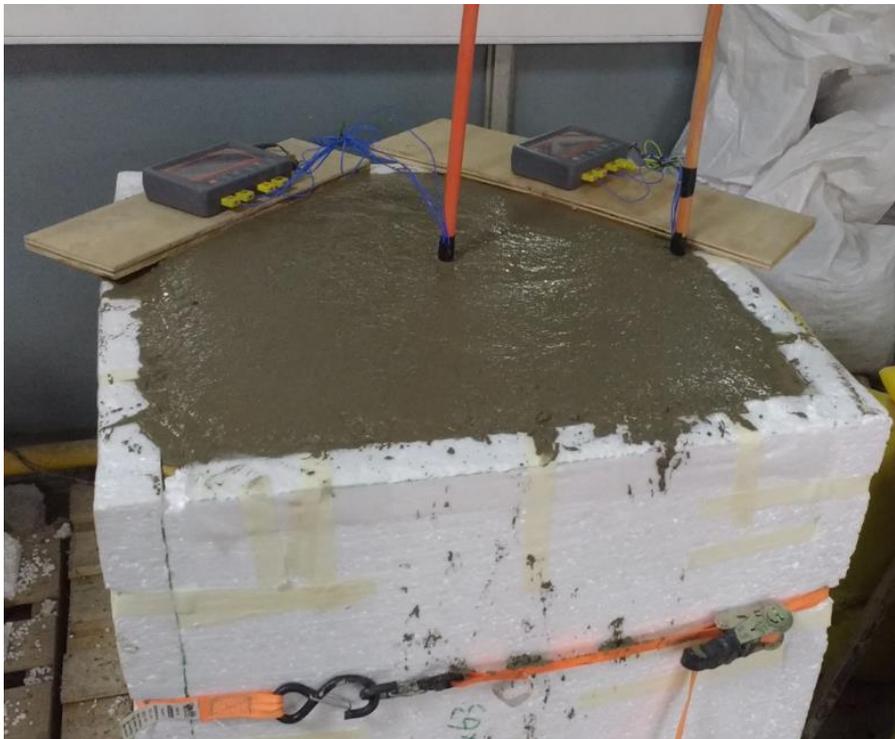


Figura 10: Bloque experimental de sección de concreto masivo 0,6m x 0,6m x 0,6m [13]

I2: CONCRETO MASIVO

3. Método de cálculo para determinar la temperatura máxima en el núcleo de concreto (T_{MAX})

Este capítulo tiene como objetivo proponer un método simplificado que permita evaluar la temperatura máxima en el núcleo de concreto; esta estimación podría servir para identificar si un vaciado de concreto masivo es considerado con riesgo a la formación de etringita diferida (DEF). Este método es una adaptación basada en el método desarrollado por la IFSTTAR [14], el cual se basa en la determinación del incremento máximo de temperatura en función del espesor mínimo del elemento y algunos datos básicos de la composición del concreto.

La precisión de este método es limitada puesto que este hace intervenir un pequeño número de parámetros (conocidos o fácilmente consultables en la etapa de colocación). El valor calculado con este método debe ser utilizado como una herramienta de alerta, si es que este valor conduce a concluir que el elemento masivo es crítico. En caso el elemento sea considerado como crítico, se debe realizar un estudio más detallado o se deben modificar los parámetros de entrada (dosificación del concreto, temperatura inicial del concreto fresco o dimensión mínima de la sección de concreto) a fin de disminuir la temperatura máxima en el núcleo.

3.1. Datos para la estimación de la temperatura máxima en el núcleo de concreto

Para determinar la estimación de la temperatura máxima en el núcleo, el método simplificado necesita conocer los siguientes parámetros:

- C: Cantidad de cemento en el concreto (kg/m^3)
- ρ_c : Densidad del concreto (kg/m^3)
- a/c: Relación agua - cemento
- $Q_{7\text{días}}$: Calor de hidratación del cemento a los 7 días (cal/g)
- $Q_{28\text{días}}$: Calor de hidratación del cemento a los 28 días (cal/g)
- EP: Espesor del elemento (m)

El espesor del elemento (EP) es la dimensión más pequeña (dirección preferencial para la disipación térmica). Los datos del cemento ($Q_{7\text{días}}$ y $Q_{28\text{días}}$) generalmente están disponibles en las fichas técnicas y/o obtenidas por solicitud al productor de cemento.

I2: CONCRETO MASIVO

3.2. Etapas del cálculo

La secuencia de pasos para el cálculo de la estimación térmica es mostrada a continuación:

- Estimación de la liberación de calor al infinito del cemento
- Consideración de la influencia de la relación a/c
- Estimación del incremento de temperatura en estado adiabático
- Consideración de los desperdicios térmicos
- Estimación de la temperatura máxima en el núcleo de concreto

3.2.1. Estimación de la liberación de calor al infinito por el cemento

Normalmente las fichas técnicas de los cementos en Perú indican la liberación de calor a los 7 y 28 días. La primera etapa es la estimación del máximo calor generado a largo tiempo por el cemento Q_m (cal/g). Para este fin, se consideran 2 casos:

- Si se dispone de $Q_{28\text{días}}$ o,
- Si solamente se dispone de $Q_{7\text{días}}$.

Si se dispone de $Q_{28\text{días}}$, se privilegiará este valor para la estimación de calor del cemento al infinito. La estimación de calor del cemento al infinito Q_m (cal/g) se obtiene por medio de la siguiente formula:

$$Q_m = \beta \cdot Q_{28\text{días}} \quad \dots \quad (4)$$

Donde:

- $\beta=1,01$: Para cementos de comportamiento de calor de hidratación normal, por ejemplo: Cementos Tipo I y GU.
- $\beta=1,03$: Para cementos de comportamiento de calor de hidratación moderado, por ejemplo: Cementos Tipo IP, MS, HS, II o V.

Sin embargo, en caso no se disponga de $Q_{28\text{días}}$, la estimación de Q_m (cal/g) en función de $Q_{7\text{días}}$ se calcula con la siguiente formula:

$$Q_m = Q_{41h} \cdot (\text{relación_}Q_m/Q_{41h}) \quad \dots \quad (5)$$

Donde el valor relación Q_m/Q_{41h} es dado por la expresión siguiente, la cual está en función a la relación R_{c2}/R_{c28} .

$$\text{relación_}Q_m/Q_{41h} = 1,71 - 1,16 \cdot R_{c2}/R_{c28} \quad \dots \quad (6)$$

Donde:

- Q_{41h} : Calor de hidratación del cemento a las 41 horas (cal/g)
- R_{c2} : Resistencia a la compresión del cemento a los 2 días (MPa)



I2: CONCRETO MASIVO

- R_{c28} : Resistencia a la compresión del cemento a los 28 días (MPa)

La estimación de calor del cemento Q_{41h} (cal/g) se obtiene por medio de las siguientes formulas:

$$Q_{41h} = \lambda \cdot Q_{7\text{días}} \dots \quad (7)$$

Donde:

- $\lambda=0,95$: Para cementos de comportamiento de calor de hidratación normal, por ejemplo: Cementos Tipo I y GU.
- $\lambda=0,93$: Para cementos de comportamiento de calor de hidratación moderado, por ejemplo: Cementos Tipo IP, MS, HS, II o V.

La Figura 11 muestra esta relación expresada en la Ec. 6.

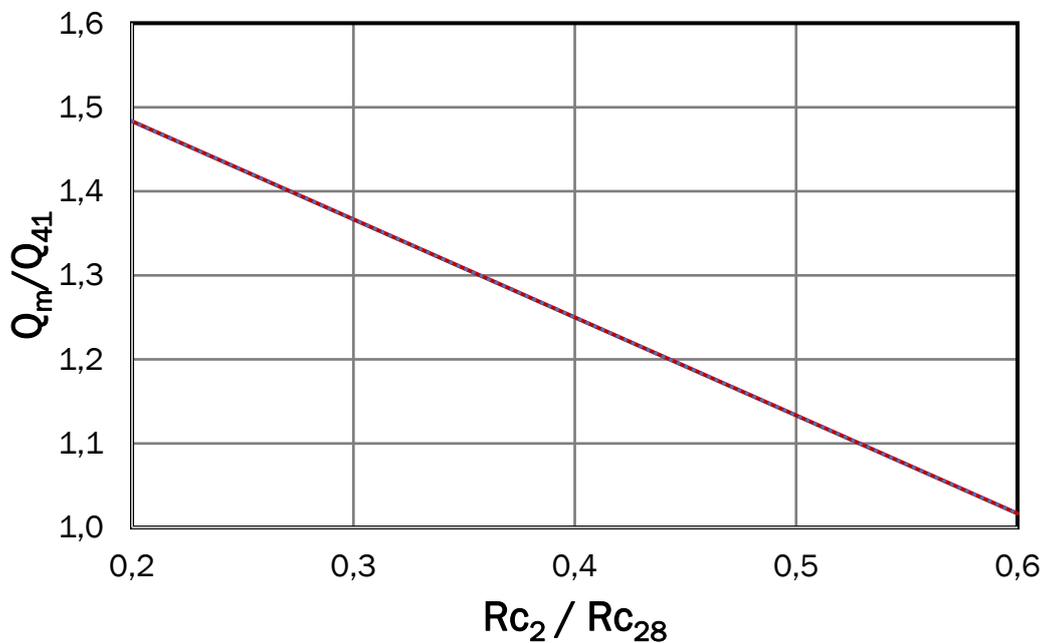


Figura 11: Estimación del calor máximo generado a largo tiempo por el cemento (Q_m)

Los cementos de alto calor de hidratación no son considerados debido a la ausencia de estos tipos de cemento en Perú.

3.2.2. Consideración de la influencia de la relación a/c

La elevación de temperatura resultante del calor liberado por el cemento también es función de la relación a/c que condiciona la tasa de hidratación máxima a largo tiempo: cuanto menor sea la relación, menor será la hidratación completa y menor será la liberación de calor. Esto se tiene en cuenta a través de un término correctivo $\psi(^{\circ}\text{C})$ dado por la ecuación 8:

I2: CONCRETO MASIVO

$$\psi = 1,29 \left(1 - e^{-3,3 \frac{a}{c}} \right) \quad \dots \quad (8)$$

La Figura 12 muestra la variación del término correctivo ψ con la relación a/c .

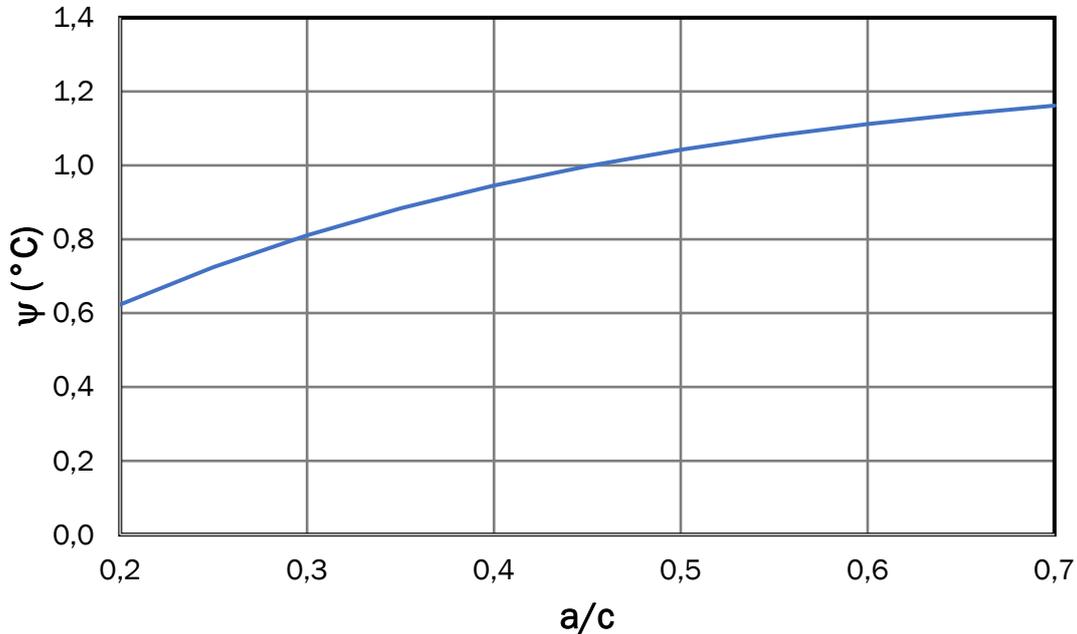


Figura 12: Estimación del término correctivo ψ ligado a la relación a/c

3.2.3. Estimación del incremento de temperatura en estado adiabático

Una vez determinado los parámetros necesarios, se puede evaluar el aumento de temperatura $\Delta T_{adiabático}$ (°C) en condiciones adiabáticas (aislamiento perfecto) a partir de la fórmula:

$$\Delta T_{adiabático} = \left(\frac{Q_m \cdot C}{C_p \cdot \rho_c} \right) \cdot \psi \quad \dots \quad (9)$$

Donde:

C_p es la conductividad térmica del concreto colocado

(para fines de cálculo, se considera 0,24 cal/(g.°C))

3.2.4. Consideración de los desperdicios térmicos

La liberación térmica depende en particular del calor generado por el cemento y del espesor del elemento. Con la Figura 13 se obtiene el coeficiente de reducción R (entre 0 y 1) que permite tomar en cuenta esta liberación, el calor generado por el cemento es expresado a través de Q_{41} :

Los cementos de alto calor de hidratación no son considerados debido a la ausencia de estos tipos de cemento en el Perú.

I2: CONCRETO MASIVO

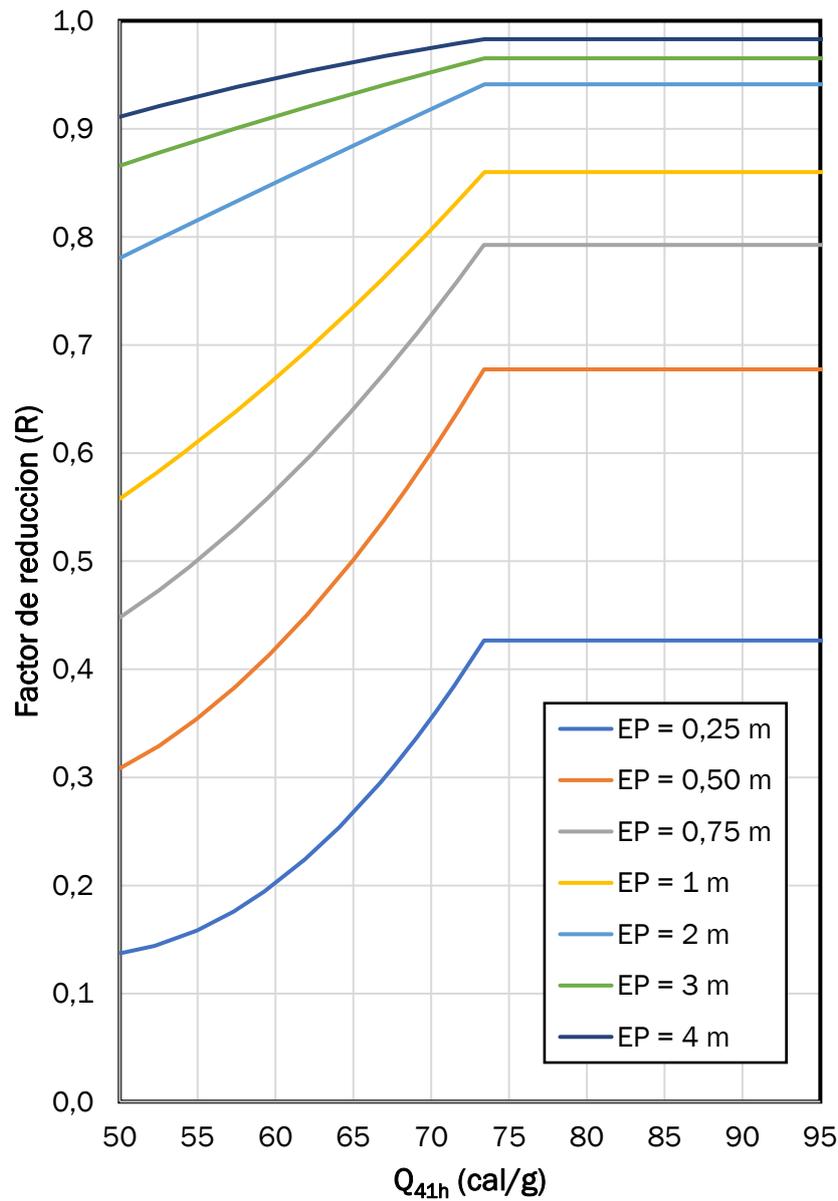


Figura 13: Estimación del coeficiente de reducción R ligado a la liberación térmica

Si el espesor EP es superior o igual a 5m, se toma R=1. El factor R permite estimar la elevación de temperatura ΔT (°C) con la fórmula:

$$\Delta T = R \cdot \Delta T_{adiabatico} \quad \dots \quad (10)$$

3.2.5. Estimación de la temperatura máxima en el núcleo de concreto
La temperatura máxima alcanzada en el núcleo de concreto se determinará con la ecuación 1. Si el valor de la T_{MAX} es superior al valor permitido, el elemento de concreto debe considerarse como crítico. En este caso se debe realizar un estudio más preciso para justificar que la temperatura máxima en el núcleo será aceptable del punto de vista de riesgos de DEF.

I2: CONCRETO MASIVO

3.3. Ejemplos de aplicación

A continuación, se muestran ejemplos de cálculo de estimación de la temperatura máxima en el núcleo de concreto tomando en cuenta las dimensiones de algunas estructuras típicas y características habituales del concreto.

Ejemplo N°1: Vaciado de muro contra terreno (Espesor: 0,6m)

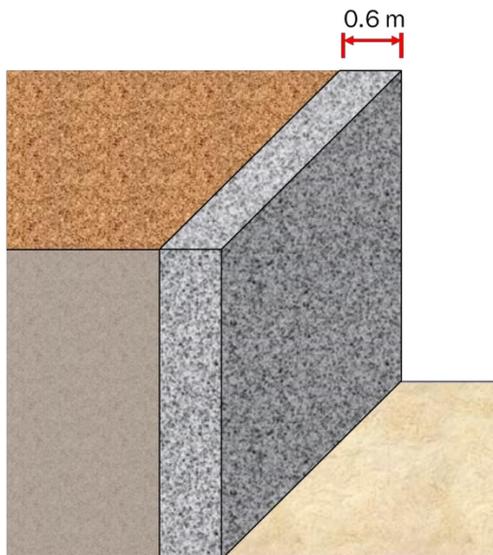


Figura 14: Muro contra terreno de 0,6m.

Datos:

Parámetros	Valores
Tipo de cemento	I
Cantidad de cemento (C)	300 kg.
Densidad del concreto (ρ_c)	2400 kg/cm ³
Relación a/c	0,6
Calor de hidratación a 7 días ($Q_{7\text{días}}$)	85 cal/g
Calor de hidratación a 28 días ($Q_{28\text{días}}$)	90 cal/g
Espesor del elemento (EP)	0,6 m.
Temperatura del concreto fresco (T_o)	30 °C

Etapa 1: Estimación de la liberación de calor al infinito del cemento

Utilizando la Ec. 4: $Q_m = 1,01 Q_{28\text{días}} = 1,01 \cdot (90 \text{ cal/g}) = 90,9 \text{ cal/g}$

I2: CONCRETO MASIVO

Etapa 2: Consideración de la influencia de la relación a/c

Utilizando la Ec. 8: $\psi = 1,29 \left(1 - e^{-3,3 \frac{a}{c}} \right) = 1,11$

Etapa 3: Estimación del incremento de temperatura en estado adiabático

Utilizando la Ec. 9: $\Delta T_{adiabatico} = \left(\frac{Q_m \cdot C}{C_p \cdot \rho_c} \right) \cdot \psi = \left(\frac{90,9 \times 300}{0,24 \times 2400} \right) \cdot 1,11 = 52,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Etapa 4: Consideración de los desperdicios térmicos

Utilizando la Ec. 7: $Q_{41h} = 0,95 Q_{7días} = 80,7 \text{ cal/g}$

Utilizando la Fig. 13: $R = 0,72$

Utilizando la Ec. 10: $\Delta T = R \cdot \Delta T_{adiabatico} = 0,72 * 52,5 \text{ } ^\circ\text{C} = 37,8 \text{ } ^\circ\text{C}$

Etapa 5: Estimación de la temperatura máxima en el núcleo de concreto

Utilizando la Ec. 1: $T_{MAX} = T_o + R \cdot \Delta T_{adiabatico} = 30^\circ\text{C} + 37,8^\circ\text{C} = 67,8 \text{ } ^\circ\text{C}$

Ejemplo N°2: Vaciado de cimentación de concreto masivo en clima frio (Espesor: 3m)

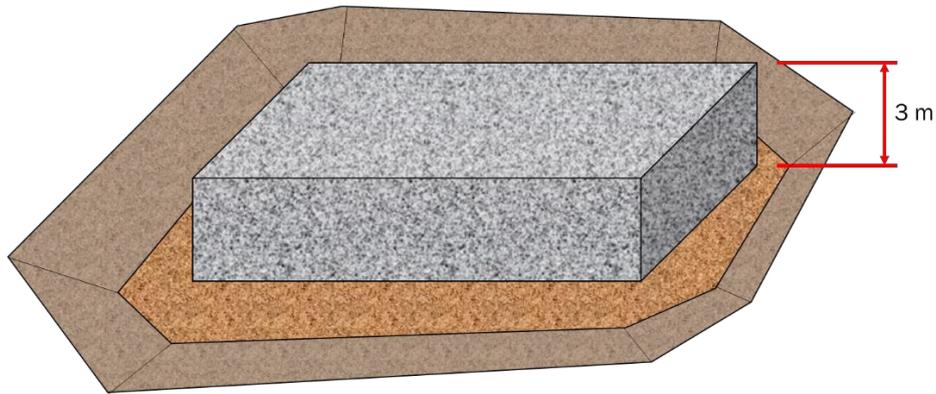


Figura 15: Cimentación de concreto masivo de 3m de espesor.

Datos:

Parámetros	Valores
Tipo de cemento	IP
Cantidad de cemento (C)	450 kg.
Densidad del concreto (ρ_c)	2230 kg/cm ³
Relación a/c	0,4
Calor de hidratación a 7 días ($Q_{7días}$)	66 cal/g

I2: CONCRETO MASIVO

Calor de hidratación a 28 días ($Q_{28\text{días}}$)	74 cal/g
Espesor del elemento (EP)	3 m.
Temperatura del concreto fresco (T_o)	17 °C

Etapa 1: Estimación de la liberación de calor al infinito del cemento

Utilizando la Ec. 4: $Q_m = 1,03 Q_{28\text{días}} = 1,03 \cdot (74 \text{ cal/g}) = 76,2 \text{ cal/g}$

Etapa 2: Consideración de la influencia de la relación a/c

Utilizando la Ec. 8: $\psi = 1,29 \left(1 - e^{-3,3 \frac{a}{c}} \right) = 0,95$

Etapa 3: Estimación del incremento de temperatura en estado adiabático

Utilizando la Ec. 9: $\Delta T_{\text{adiabático}} = \left(\frac{Q_m \cdot C}{C_p \cdot \rho_c} \right) \cdot \psi = \left(\frac{76,2 \times 450}{0,24 \times 2230} \right) \cdot 0,95 = 60,9 \text{ °C}$

Etapa 4: Consideración de los desperdicios térmicos

Utilizando la Ec. 7: $Q_{41h} = 0,93 Q_{7\text{días}} = 61,4 \text{ cal/g}$

Utilizando la Fig. 13: $R = 0,92$

Utilizando la Ec. 10: $\Delta T = R \cdot \Delta T_{\text{adiabático}} = 0,92 * 60,9 \text{ °C} = 56 \text{ °C}$

Etapa 5: Estimación de la temperatura máxima en el núcleo de concreto

Utilizando la Ec. 1: $T_{MAX} = T_o + R \cdot \Delta T_{\text{adiabático}} = 17 \text{ °C} + 56 \text{ °C} = 73 \text{ °C}$

Ejemplo N°3: Vaciado de cimentación de concreto masivo en clima cálido (Espesor: 2m)

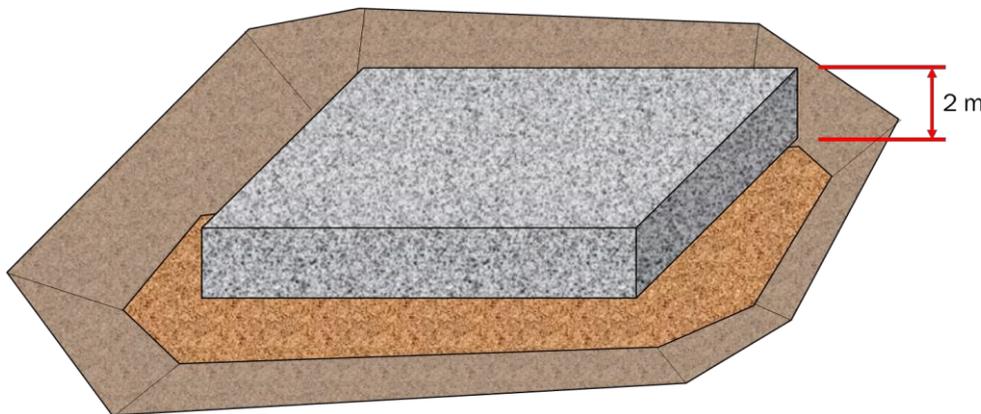


Figura 16: Cimentación de concreto masivo de 2m de espesor.

I2: CONCRETO MASIVO

Datos:

Parámetros	Valores
Tipo de cemento	MS
Cantidad de cemento (C)	420 kg.
Densidad del concreto (ρ_c)	2400 kg/cm ³
Relación a/c	0,4
Calor de hidratación a 7 días ($Q_{7\text{días}}$)	70 cal/g
Calor de hidratación a 28 días ($Q_{28\text{días}}$)	-
Relación R_{c2}/R_{c28}	0,4
Espesor del elemento (EP)	2 m.
Temperatura del concreto fresco (T_o)	25 °C

Etapa 1: Estimación de la liberación de calor al infinito del cemento

Utilizando la Ec. 7: $Q_{41h} = 0,93 Q_{7\text{días}} = 0,93 (70 \text{ cal/g}) = 65 \text{ cal/g}$

Utilizando la Ec. 5 y 6: $Q_m = Q_{41h} \cdot (1,71 - 1,16 \cdot R_{c2}/R_{c28}) = 1,25 \times 65 \text{ cal/g} = 81 \text{ cal/g}$

Etapa 2: Consideración de la influencia de la relación a/c

Utilizando la Ec. 8: $\psi = 1,29 \left(1 - e^{-3,3 \frac{a}{c}}\right) = 0,95$

Etapa 3: Estimación del incremento de temperatura en estado adiabático

Utilizando la Ec. 9: $\Delta T_{adiabatico} = \left(\frac{Q_m \cdot C}{C_p \cdot \rho_c}\right) \cdot \psi = \left(\frac{81 \times 420}{0,24 \times 2400}\right) \cdot 0,95 = 56,1 \text{ °C}$

Etapa 4: Consideración de los desperdicios térmicos

Utilizando la Fig. 13: $R = 0,88$

Utilizando la Ec. 10: $\Delta T = R \cdot \Delta T_{adiabatico} = 0,88 \times 56,1 \text{ °C} = 49,4 \text{ °C}$

Etapa 5: Estimación de la temperatura máxima en el núcleo de concreto

Utilizando la Ec. 1: $T_{MAX} = T_o + R \cdot \Delta T_{adiabatico} = 25 \text{ °C} + 49,4 \text{ °C} = 74,4 \text{ °C}$

I2: CONCRETO MASIVO

4. Método de cálculo para determinar el diferencial térmico admisible ($\Delta T_{\text{admisible}}$)

A causa de la velocidad más rápida de disipación de calor en el borde exterior del elemento, se crea una diferencia de temperatura entre el núcleo más caliente y el borde más frío. Esta diferencia de temperatura conduce a tensiones a lo largo de la sección transversal, que puede provocar agrietamiento térmico.

Según el ACI 207.1R-05, para controlar la fisuración del concreto por estrés térmico, se debe restringir el delta térmico entre 14 °C y 19 °C, esto tomando en cuenta que el concreto contiene en promedio 139 kg/m³ de cemento y que el concreto carece de acero de refuerzo (límite hecho para trabajos de presas no reforzadas en Europa hace más de 75 años) [1].

Normalmente mantener un diferencial térmico de concreto en estos rangos es una labor difícil durante la construcción tomando en cuenta que el concreto que se utiliza en elementos estructurales contiene más de 300 kg/m³ de cemento. Además, las tendencias recientes muestran secciones de mayor espesor y altos contenidos de cemento o bajas relaciones a/c, esto hace que el control de temperatura sea aún más difícil. De la misma manera, es necesario entender que la máxima diferencia de temperatura permitida está en función de las propiedades mecánicas del concreto, como la expansión térmica, la resistencia a la tracción y el módulo elástico, así como el tamaño y las restricciones del elemento de concreto [15]. Este límite aumenta con la edad del concreto debido a que el concreto aumenta su resistencia a la tracción.

Entonces, debido a que las condiciones de los vaciados masivos a realizar en los proyectos no cumplen las características de la definición de concreto masivo citada en el ACI 207.1R-05, no podríamos concluir que el diferencial térmico admisible ($\Delta T_{\text{admisible}}$) para controlar la fisuración sea 19 °C. Por lo cual es necesario realizar un cálculo a fin de delimitar el diferencial térmico admisible antes de que ocurra la fisuración.

4.1. Etapas de calculo

Para evaluar el esfuerzo a tracción que se genera por efectos térmicos en los vaciados de concreto masivo, se utiliza la ecuación 11 indicada en el ACI 207.2R [16], donde se incluye un factor de restricción en función del largo y la altura del elemento:

$$f_t = K_R \cdot K_f \cdot E_c \cdot \Delta c \quad \dots \quad (11)$$

Donde:



I2: CONCRETO MASIVO

f_t : Resistencia a tracción del concreto (kg/cm²)

K_f : Factor de restricción por la fundación

K_R : Factor de restricción por la geometría

E_c : Modulo de elasticidad del concreto (kg/cm²)

Δc : Contracción lineal del concreto si no hubiera restricción.

El factor de restricción ($K_R.K_f$) es una representación aproximada de la restricción interna en un elemento de concreto. Bamforth (2007) deriva un factor de restricción recomendado de 0,42 basado en valores límites de temperatura y datos de propiedades disponibles. Esta suposición corresponde a las condiciones de restricción que se encuentran en algunos elementos típicos de concreto masivo (ACI 207 2007), pero la restricción interna puede ser un factor muy difícil de cuantificar. Esto se debe a que el factor de restricción depende de la geometría del elemento, las condiciones de contorno y la edad del concreto. Bamforth (2007) proporciona pautas para determinar un factor de restricción aproximado basado en estas condiciones [2].

El diferencial térmico admisible, es la diferencia de temperatura máxima permitida entre el núcleo y la superficie de concreto. El ACI 207 define la diferencia de temperatura como “el enfriamiento de la superficie del concreto en relación con la temperatura interna más estable”. Como se indicó anteriormente, los elementos de concreto masivo pueden experimentar grandes diferenciales de temperatura. Un mayor diferencial térmico permisible depende de las variables enumeradas en la ecuación 11 [2]. La tabla 3 de Bamforth y Price (2007) proporciona algunos límites de diferenciales térmicos en edades tempranas cuando se utilizan varios tipos de agregados gruesos y diferentes factores de restricción.

Tabla 3 : Diferenciales térmicos admisibles (°C) basados en valores típicos asumiendo α y capacidad de deformación a tracción (Bamforth y Price 2007) [2]

Tipo de agregado	Grava	Granito	Caliza	Ligero
Coefficiente de expansión térmica ($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$)	13	10	9	9
Capacidad de deformación a tracción ($\mu\epsilon$)	65	75	85	115
Diferencial térmico admisible para diferentes factores de restricción ($K_R.K_f$) (°C)				
$K_R.K_f = 1,00$	6	9	12	20
$K_R.K_f = 0,80$	8	12	16	25
$K_R.K_f = 0,60$	11	17	22	34
$K_R.K_f = 0,42$	20	28	35	53
$K_R.K_f = 0,30$	24	36	46	71

12: CONCRETO MASIVO

El límite de temperatura de 20 °C es significativo porque este valor es ampliamente usado y se convirtió en el diferencial térmico admisible recomendado por el ACI 301-16 para todas las estructuras de concreto masivo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este límite propuesto por Bamforth y Price (2007) es el diferencial térmico admisible para el concreto que usa un agregado de grava (α más alto) con un factor de restricción $K_R \cdot K_f = 0,42$. Este límite recomendado de 20 °C (19 °C en algunos casos) ha sido adoptado por muchos reglamentos como el diferencial térmico admisible para todas las estructuras de concreto masivo, independientemente del tipo de agregado. Sin embargo, según el trabajo realizado por Bamforth, se pueden permitir límites de diferenciales térmicos más altos cuando se utilizan agregados como granito (28 °C) y piedra caliza (35 °C) debido a sus α más bajos y mayor capacidad de deformación a tracción [2].

El factor de restricción por la fundación se obtiene a partir de la ecuación 12 indicada en el ACI 207.2R:

$$K_f = \frac{1}{1 + \frac{A_g \cdot E_c}{A_F \cdot E_F}} \quad \dots \quad (12)$$

Donde:

E_c : Modulo de elasticidad del concreto (kg/cm²)

E_F : Modulo de elasticidad de la base (kg/cm²)

A_g : Área bruta de la sección transversal del concreto (m²)

A_F : Área de cimentación u otro elemento que restringe el acortamiento del elemento, generalmente tomado como una superficie plana en contacto (para roca maciza, A_F se puede asumir como 2,5 A_g) (m²)

Y la contracción lineal inducida por efectos térmicos se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\Delta c = \frac{\Delta L}{L} = \alpha \cdot \Delta T \quad \dots \quad (13)$$

Donde:

α : Coeficiente de expansión térmica (1/°C)

ΔT : Diferencial térmico (°C)

El factor de restricción (K_R) es un valor en función de las dimensiones relativas de la estructura (longitud del bloque y altura sobre la cimentación). La Figura 17 muestra el Abaco del ACI 207.2R que es usado para obtener los esfuerzos uniaxiales que se generan en la parte superior del

I2: CONCRETO MASIVO

bloque. Este Abaco ha evolucionado a partir de años de experiencia en evaluaciones de fisuración. Sus orígenes provienen de las derivaciones de datos de prueba registradas originalmente por Carlson (1937) y posteriormente publicadas por la U.S. Bureau of Reclamation (1965) [16].

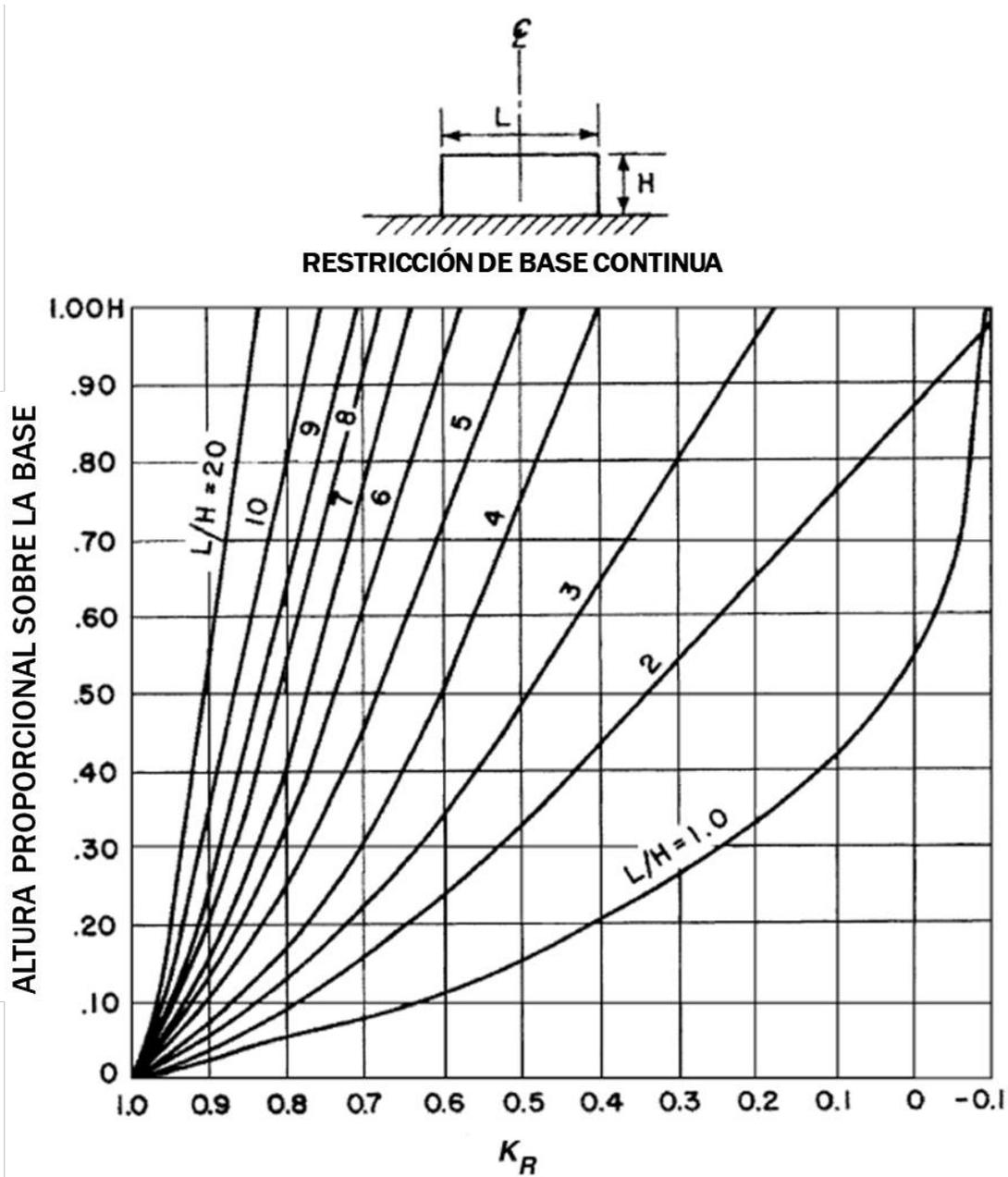


Figura 17: Abaco del grado de restricción por tracción en el centro de la sección [16, p. 207].

Tener en cuenta que los valores del módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción del concreto varían según su edad, ya que son directamente proporcionales a la resistencia del concreto, estos parámetros se pueden determinar con las expresiones dadas en el ACI 318:

I2: CONCRETO MASIVO

Para el módulo de elasticidad:

$$E_c = \rho_c^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad \dots \quad (14)$$

o

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad \dots \quad (15)$$

Para la resistencia a la tracción:

$$f_t = 0,56 \sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad \dots \quad (16)$$

El coeficiente de expansión térmica del concreto se basa principalmente en el tipo de agregado grueso utilizado (Browne 1972). Un coeficiente de expansión térmica de concreto más grande se traduce en un cambio de volumen mayor siempre que se induce un cambio de temperatura [2]. El coeficiente de expansión térmica a diferencia del módulo de elasticidad del concreto, no varía significativamente con la edad. La Tabla 4 y la Figura 18 muestran valores comunes de α para concretos que contienen agregados típicos.

Si se desconoce α , se usa a menudo el valor de $10 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ como valor “predeterminado” para el concreto. Esto significa que un ΔT de por ejemplo $40 \text{ }^\circ\text{C}$ de enfriamiento provocará una contracción térmica, ϵ de $10 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C} \times 40 \text{ }^\circ\text{C} = 400 \cdot 10^{-6}$ ($0,4 \cdot 10^{-4} = 4\text{mm}$). Si la restricción es lo suficientemente alta, el resultado puede ser fisuras verticales aparentes [17].

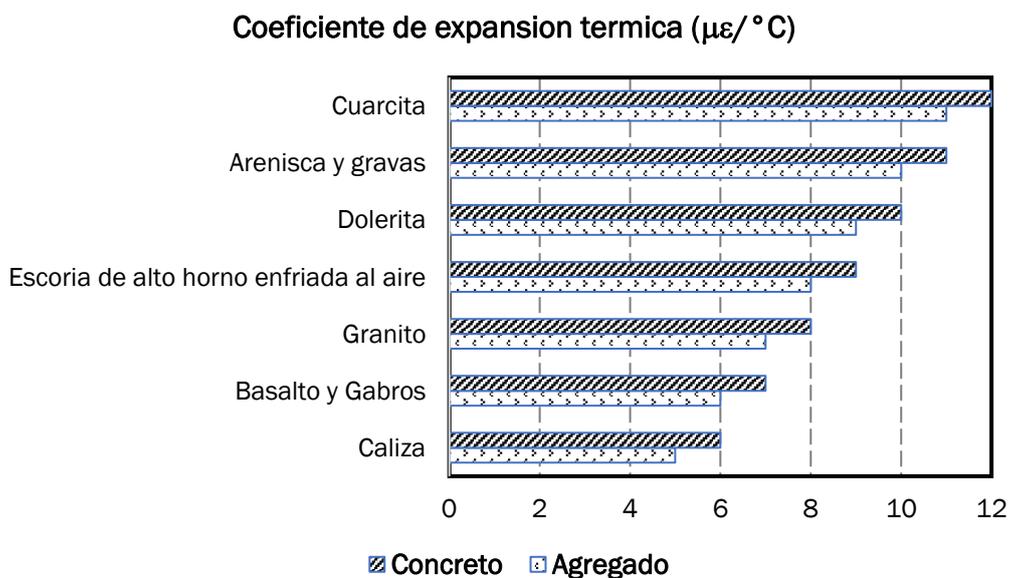


Figura 18: Influencia del tipo de agregado en el coeficiente de expansión térmica del concreto [18].

I2: CONCRETO MASIVO

Tabla 4: Efecto del tipo de agregado en el coeficiente de expansión térmica del concreto (Davis, 1930) [19].

Tipo de agregado	Coefficiente de expansión térmica del concreto ($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$)
Cuarzo	11,9
Arenisca	11,7
Grava	10,8
Granito	9,5
Basalto	8,6
Caliza	6,8

Dado que el coeficiente de expansión térmica el concreto está directamente relacionado con el coeficiente de expansión del agregado utilizado en el concreto masivo, la selección de un agregado con un coeficiente más bajo proporciona otro enfoque para reducir la deformación por efectos térmicos. Sin embargo, a diferencia del módulo de elasticidad, el coeficiente de expansión térmica (α) no varía significativamente con la edad.

Utilizando los valores calculados y las ecuaciones (11), (12) y (13), se obtiene el diferencial térmico admisible antes de la fisuración:

$$\Delta T = \frac{f_t}{K_R \cdot K_f \cdot E_c \cdot \alpha} \quad (^\circ\text{C}) \quad \dots \quad (17)$$

4.2. Ejemplos de aplicación

A continuación, se muestran ejemplos de cálculo de estimación del diferencial térmico admisible del concreto tomando en cuenta las dimensiones de algunas estructuras típicas y características habituales del concreto.

Ejemplo N°1: Se realiza un vaciado de una cimentación de concreto en clima cálido, cuyas dimensiones (largo x ancho x alto) son 23,5m x 24,4m x 3m. Se utilizó un concreto con $f'_c = 35$ MPa, densidad de 2350 kg/m^3 y uso de granito como agregado grueso para el concreto ($\alpha = 9,5 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$). La cimentación es vaciada sobre un solado de un $f'_c = 10\text{MPa}$.

12: CONCRETO MASIVO

Etapa 1: Determinación de parámetros y cálculo de diferencial térmico admisible.

Para fines de cálculo, se analizará el diferencial térmico admisible a los 2 días; con lo cual tendríamos una resistencia a la compresión de aproximadamente 12 MPa.

Utilizando las ecuaciones del ACI 318 obtenemos:

$$\text{Utilizando la Ec. 14: } E_c = \rho_c^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f'_c} = 16969 \text{ MPa}$$

$$\text{Utilizando la Ec. 16: } f_t = 0,56 \sqrt{f'_c} = 1,94 \text{ MPa}$$

En este caso, tendremos en la base un concreto de $f'_c=10$ MPa (Solado), entonces:

$$\text{Utilizando la Ec. 14: } E_F = \rho_c^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f'_c} = 15491 \text{ MPa}$$

Debido a la geometría del elemento, se considera $A_g = A_F$; de aquí obtenemos:

$$\text{Utilizando la Ec. 12: } K_f = \frac{1}{1 + \frac{E_c}{E_F}} = \frac{1}{1 + \frac{16969}{15491}} = 0,48$$

Para obtener el valor K_R , utilizamos el Abaco del ACI 207.2R (Figura 17): el elemento tiene las siguientes dimensiones 23.5m x 24.4m x 3m; de aquí obtenemos valores de L/H de 7,8 y 8,1 (para fines de cálculo se considera L/H=8). Para nuestro elemento, tenemos un factor de restricción por la geometría (K_R) de 0,67.

Utilizando los valores calculados, se obtiene el diferencial térmico admisible antes de la fisuración para un $f'_c = 12$ MPa.

$$\text{Utilizando la Ec. 17: } \Delta T = \frac{f_t}{K_R \cdot K_f \cdot E_c \cdot \alpha} = \frac{1,94}{(0,67) \cdot (0,48) \cdot (16969) \cdot (9,5 \cdot 10^{-6})} = 37,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Etapa 2: Cálculo de diferencial térmico admisible versus la evolución de la resistencia a la compresión del concreto.

Con el mismo procedimiento de cálculo, se realiza una gráfica en donde se indica el diferencial térmico admisible versus la resistencia a la compresión del concreto.



I2: CONCRETO MASIVO

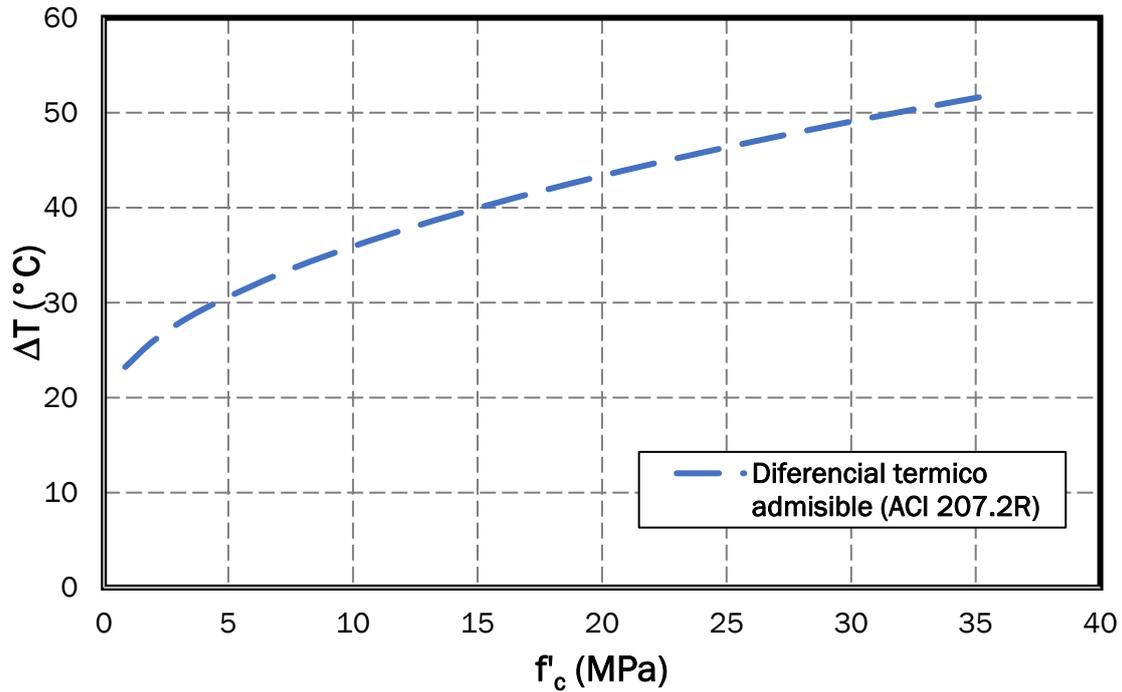


Figura 19: Diferencial térmico admisible vs. Evolución del f'_c .

Con la gráfica de la Figura 19, se puede determinar el ΔT admisible versus la evolución de la resistencia a compresión del concreto.

Ejemplo N°2: Vaciado de una sección masiva en clima frío, cuyas dimensiones del elemento (largo x ancho x alto) son 15m x 12m x 2m. Se utilizó un concreto con $f'_c = 42$ MPa, densidad de 2250 kg/cm^3 y uso de grava como agregado grueso para el concreto ($\alpha = 10,8 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$). El elemento masivo es vaciado sobre un concreto de la misma sección y resistencia.

Etapa 1: Determinación de parámetros y cálculo de diferencial térmico admisible

Para fines de cálculo, se analizará el diferencial térmico admisible a los 3 días; con lo cual tendríamos una resistencia a la compresión de aproximadamente 19,2 MPa.

Utilizando las ecuaciones del ACI 318 obtenemos:

$$\text{Utilizando la Ec. 14: } E_c = \rho_c^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f'_c} = 20128 \text{ MPa}$$

$$\text{Utilizando la Ec. 16: } f_t = 0,56 \sqrt{f'_c} = 2,5 \text{ MPa}$$

I2: CONCRETO MASIVO

En este caso, tendremos en la base un concreto de $f'c=42$ MPa (concreto de la misma calidad), entonces:

$$\text{Utilizando la Ec. 14: } E_F = \rho_c^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f'c} = 29742 \text{ MPa}$$

Debido a la geometría del elemento, se considera $A_g = A_F$; de aquí obtenemos:

$$\text{Utilizando la Ec. 12: } K_f = \frac{1}{1 + \frac{E_c}{E_F}} = \frac{1}{1 + \frac{20128}{29742}} = 0,60$$

Para obtener el valor K_R , utilizamos el Abaco del ACI 207.2R (Figura 17): el elemento tiene las siguientes dimensiones 15m x 12m x 2m; de aquí obtenemos valores de L/H de 6 y 7,5 (se tomará L/H=7,5 por ser el valor más restrictivo). Para nuestro elemento, tenemos un factor de restricción por la geometría (K_R) de 0,66.

Utilizando los valores calculados, se obtiene el diferencial térmico admisible antes de la fisuración para un $f'c = 19,2$ MPa.

$$\text{Utilizando la Ec. 17: } \Delta T = \frac{f_t}{K_R \cdot K_f \cdot E_c \cdot \alpha} = \frac{2,5}{(0,66) \cdot (0,60) \cdot (20128) \cdot (10,8 \cdot 10^{-6})} = 29 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Etapa 2: Cálculo de diferencial térmico admisible versus la evolución de la resistencia a la compresión del concreto

Con el mismo procedimiento de cálculo, se realizan gráficas en donde se indica el diferencial térmico admisible versus la resistencia a la compresión del concreto (figura 20) y la evolución del diferencial térmico admisible en el tiempo (figura 21).

En climas fríos, se recomienda el uso de un microclima para mantener el diferencial térmico controlado y evitar fisuración excesiva.



I2: CONCRETO MASIVO

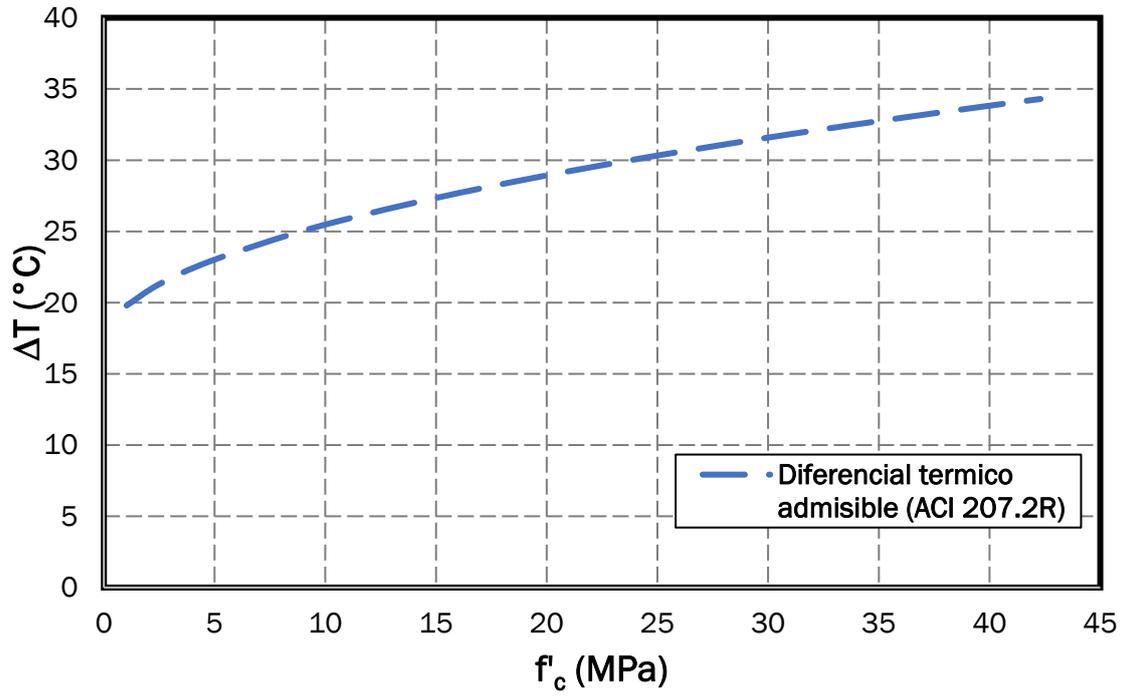


Figura 20: Diferencial térmico admisible vs. Evolución del f'_c .

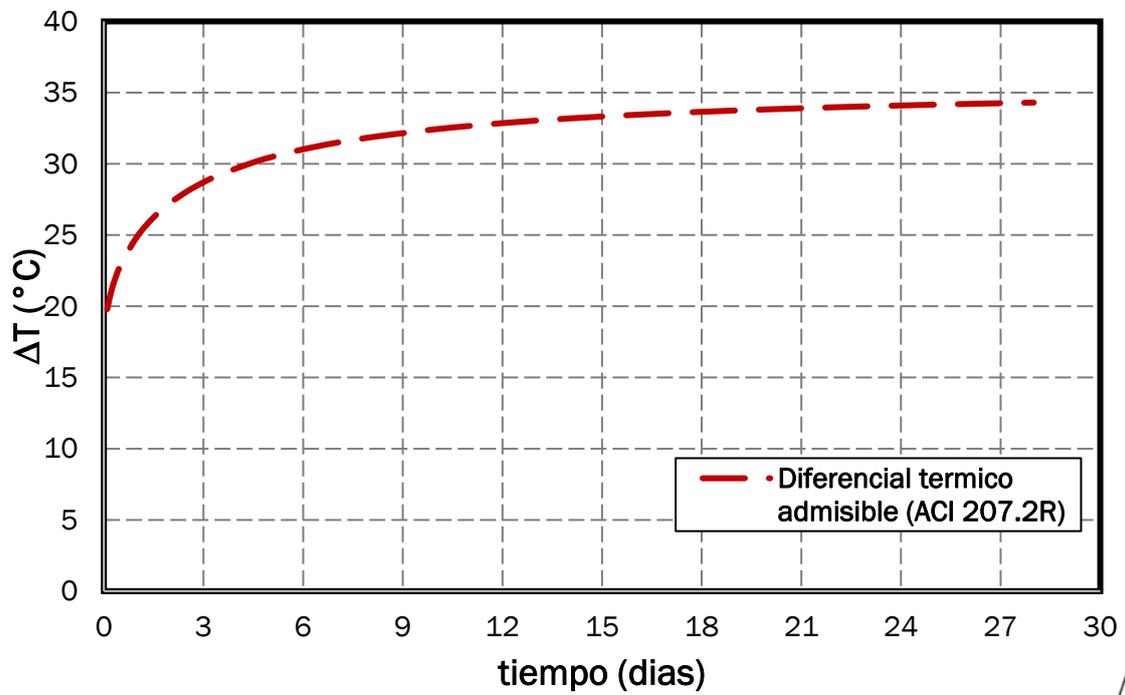


Figura 21: Evolución del Diferencial térmico admisible en el tiempo.

I2: CONCRETO MASIVO

4.3. Fisuración en elementos masivos

Según el ACI 224R-01 [20, p. 224], “la fisuración en estructuras de concreto masivo puede ser el resultado de causas relacionadas a los materiales, causas estructurales o una combinación de ambas. Las fisuras inducidas por el material resultan de la contracción por secado, un gradiente térmico severo no lineal iniciado por el calor de hidratación y/o la reacción del agregado alcalino. La fisuración de la superficie puede aparecer como un agrietamiento patrón y es el resultado de una disminución en el volumen del material cerca de la superficie o un aumento en el volumen debajo de la superficie. La fisuración aleatoria por causas relacionadas con los materiales puede pasar a través de un elemento masivo, y los anchos de fisuración pueden variar desde apenas perceptibles hasta valores muy elevados. La fisuración estructural puede deberse a una carga individual o una combinación de las mismas, tal como las cargas gravitatorias, presión de líquidos e impactos severos”. De aquí se desprende que las fisuras provocadas en concretos masivos por el diferencial térmico, como un agrietamiento producido por efectos del material se considera como un problema de durabilidad mas no una patología que pueda alterar el desempeño estructural del elemento de concreto armado. El ACI 224R-01 también define a la microfisuración como un evento ocurrido en el concreto bajo cargas últimas a compresión; con lo cual se descarta este tipo de fisuración por efectos térmicos (esfuerzos a tracción).

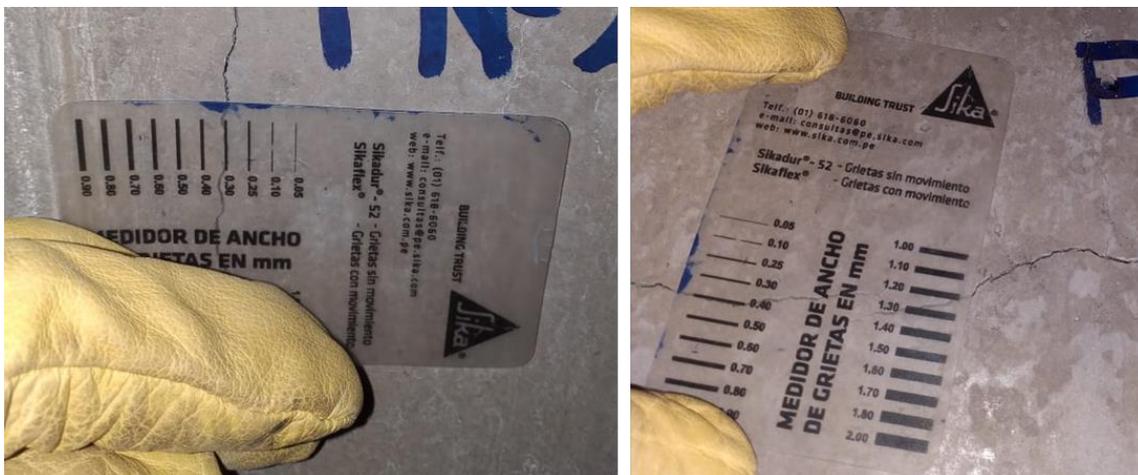


Figura 22: Espesores de fisuras registradas en elementos masivos.

Debido al tamaño de los elementos de concreto masivo, la contracción diferencial provocara una acumulación máxima de esfuerzos de tracción en la superficie y compresión en el interior, similar a los efectos de los diferenciales térmicos (Base y Murray 1979). Base y Murray (1978) investigaron varios elementos restringidos de estructuras reforzadas de espesores entre 0,5m y 1.0m (20” a 40”) con configuraciones similares. Observaron que en algunos casos el concreto contenía grietas anchas que se propagaban por todo el elemento y en otros casos no se producían

I2: CONCRETO MASIVO

grietas. La dificultad para controlar la fisuración radica en determinar la cantidad de refuerzo a proporcionar [2]. Estas fisuras causadas por la contracción de secado del concreto tienen como causa la ausencia de juntas (contracción y construcción) en el elemento estructural.

Estas fisuras originadas por efectos de contracción del concreto ya sean por secado o de temperatura, son patologías indeseables, pero a veces inevitable debido a las características de la sección de concreto y el diseño de mezcla a utilizar; esto viene a ser sobre todo una preocupación de durabilidad debido a la posible corrosión del acero, por lo cual el ACI 224R-01 limita los espesores de fisuras tolerables en la Tabla 5:

Tabla 5: Tolerancia de espesores de fisuras según la exposición (Tabla 4,1 ACI 224R-01)

Condición de exposición	Ancho de fisura	
	in.	mm.
Aire seco o membrana protectora	0,016	0,41
Humedad, aire húmedo, suelo	0,012	0,30
Productos químicos descongelantes	0,007	0,18
Agua de mar y rocío de agua de mar, humedecimiento y secado	0,006	0,15
Estructuras para retención de agua	0,004	0,10

Entonces, según lo indicado anteriormente, el efecto térmico de un vaciado masivo genera esfuerzos a tracción que podrían generar una fisuración que dan inicio en la superficie expuesta o en la base del elemento debido a su restricción a deformarse. De la misma manera es necesario precisar que las fisuras por efectos térmicos se dan en los primeros días de vaciado, cuando el concreto en estado endurecido muestra un esfuerzo a tracción por efectos térmicos superior al esfuerzo de tracción resistente.



I2: CONCRETO MASIVO

5. Bibliografía

- [1] C. 207 ACI, *ACI 207.1R-05 Guide to Mass Concrete*. 2005.
- [2] E. D. Gross, « Development of a Mass Concrete Specification for Use in ALDOT Bridge Construction », Auburn University, Alabama, EEUU, 2017.
- [3] LCPC, « Guide technique - Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne. » 2007.
- [4] C. 224 ACI, « ACI 224.3R-95 Joints in Concrete Construction », in *Concrete Construction Engineering Handbook*, E. Nawy, Éd. CRC Press, 2008.
- [5] C. 304 ACI, *ACI 304R-00 Guide For Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete*, vol. 82. 2000.
- [6] C. 301 ACI, *ACI 301-16 Specifications for Structural Concrete*. 2016.
- [7] S. Lagund, « Temperature reduction during concrete hydration in massive structures », p. 132, 2017.
- [8] PCA, *Diseño y control de mezclas de concreto*, Primera edición. EEUU, 2004.
- [9] J. Gajda, « Construction of Mass Concrete Transportation Infrastructure », présenté à The National Academies of Sciences - Engineering - Medicine, de agosto 2018.
- [10] L. EPFL, « Chaleur d'hydratation et fissurabilité ».
- [11] C. 207 ACI et al., *ACI 207.4R-93 Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete*. 1993.
- [12] M. Valarezo A., « Instrumentacion de bloques de concreto masivo para verificar el sistema de enfriamiento, caso practico. », *ACI Seccion Centro y Sur de Mexico*, Mexico, 2014.
- [13] D. Paz Lara, « Evaluacion de metodos predictivos del comportamiento termico de elementos masivos de hormigon confeccionados con cementos de origen nacional », Santiago, Chile, 2018.
- [14] IFSTTAR, « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne ». oct. 2017.
- [15] J. Gajda et M. Vangeem, « Understanding mass concrete is the key to controlling temperatures and ultimately saving time, effort, and money », *Concrete International*, p. 4, janv. 2002.
- [16] C. 207 ACI, *ACI 207.2R-07 Report on thermal and volume change effects on cracking of mass concrete*. Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute, 2007.
- [17] Norwegian Public Roads Administration, « Basis for and practical approaches to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures – State of the art », SINTEF Building and Infrastructure 2011, 2011.
- [18] P. K. Mehta et P. J. M. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [19] A. Al-Ostaz, « EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON THE COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION OF CONCRETE », p. 76, sept. 2007.
- [20] C. 224 ACI, *ACI 224R-01 Control of Cracking in Concrete Structures*. EEUU, 2001.

