



**MANUAL DE
RECOMENDACIONES
TECNICAS PARA
VACIADOS DE
CONCRETO MASIVO**

Elaborado por:
Dr. Pablo Jhoel Peña Torres
Ingeniero Civil

Diciembre 2020

Lima, Perú

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

Índice

1. Introducción	5
2. Definición de concreto masivo	7
3. Normativas relacionadas.....	8
4. Problemática de los vaciados de concreto masivo	9
4.1. Fisuración por efectos térmicos	10
4.2. Formación de Etringita Diferida (DEF).....	12
5. Recomendaciones constructivas para vaciados de concreto masivo	17
5.1. Generalidades Normativas.....	18
5.2. Controles Térmicos	21
5.2.1. Instrumentación	21
5.2.2. Control de la Temperatura máxima en el núcleo del elemento (T_{MAX})	22
5.2.3. Control del diferencial térmico admisible ($\Delta T_{admisible}$)	33
5.2.4. Bloque Experimental	35
6. Clasificación de los límites de temperatura máxima del concreto según su exposición. ...	37
7. Método de cálculo para determinar la temperatura máxima en el núcleo de concreto ...	43
7.1. Datos para la estimación de la temperatura máxima en el núcleo de concreto	43
7.2. Etapas del cálculo	44
7.2.1. Estimación de la liberación de calor al infinito por el cemento	44
7.2.2. Consideración de la influencia de la relación a/c.....	45
7.2.3. Estimación del incremento de temperatura en estado adiabático	46
7.2.4. Consideración de los desperdicios térmicos	46
7.2.5. Estimación de la temperatura máxima en el núcleo de concreto	47
7.3. Ejemplos de aplicación	48
8. Método de cálculo para determinar el diferencial térmico admisible	52
8.1. Etapas de calculo	52
8.2. Ejemplos de aplicación	57
8.3. Fisuración en elementos masivos	62
9. Bibliografía	64

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

Lista de figuras

Figura 1: Ejemplo de agrietamiento térmico severo en la superficie superior de una cimentación [16]	11
Figura 2: Una diamantina de concreto extraído de la base de una cimentación muestra el grado de fisuración térmica.[16]	11
Figura 3: Mecanismo de la expansión del DEF (Taylor et al. 2001)	12
Figura 4: DEF en una columna en San Antonio, Texas [19]	13
Figura 5: Fisuras producidas por DEF en Pilar de Puente [20]	13
Figura 6: (a) Etringita primaria no expansiva en pasta de cemento, vista bajo un microscopio electrónico de barrido; (b) Etringita secundaria no expansiva en un poro (1), vista con un microscopio electrónico de barrido; (c) Etringita expansiva (1 y 2) en contacto con un agregado (3), visto bajo un microscopio electrónico de barrido [21].	14
Figura 7: Ubicación de sensores de temperatura en la sección de concreto masivo.	22
Figura 8: Curva de evolución de la temperatura en el núcleo de concreto.....	23
Figura 9: Aumento de temperatura del concreto masivo que contiene 223 kg/m ³ de cemento [4].	25
Figura 10: Enfriamiento del concreto utilizando nitrógeno líquido (Fuente: Internet - ARGOS).	28
Figura 11: Estructura masiva vaciada en varias secciones [25].	31
Figura 12: Variación de temperatura en el núcleo de elementos de concreto masivo de diferentes espesores [26].....	31
Figura 13: Esquema de distribución de la tubería de post enfriamiento del concreto [27].	32
Figura 14: Diferencia entre la generación de temperatura con tuberías y sin tuberías.....	33
Figura 15: Microclima instalado en vaciado de concreto masivo	34
Figura 16: Bloque experimental de concreto [18].	35
Figura 17: Vaciado de bloque experimental de concreto [18].	36
Figura 18: Estimación del calor máximo generado a largo tiempo por el cemento (Q _m)	45
Figura 19: Estimación del término correctivo ψ ligado a la relación a/c	46
Figura 20: Estimación del coeficiente de reducción R ligado a la liberación térmica	47
Figura 21: Muro contra terreno de 0,6m	48
Figura 22: Cimentación de concreto masivo de 3m de espesor.	49
Figura 23: Cimentación de concreto masivo de 2m de espesor.	50
Figura 24: Abaco del grado de restricción por tracción en el centro de la sección [8].	55

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

Figura 25: Influencia del tipo de agregado en el coeficiente de expansión térmica del concreto [17].	56
Figura 26: Diferencial térmico admisible vs. Evolución del $f'c$.	59
Figura 27: Diferencial térmico admisible vs. Evolución del $f'c$.	61
Figura 28: Evolución del Diferencial térmico admisible en el tiempo.	61
Figura 29: Espesores de fisuras registradas en elementos masivos.	62

Lista de tablas

Tabla 1: Efecto de la temperatura de los materiales sobre la temperatura inicial del concreto...	28
Tabla 2: Efecto del hielo (60kg) sobre la temperatura del concreto.....	29
Tabla 3: Medidas recomendadas para reducir el potencial para DEF en concreto expuesto a elevadas temperaturas a edades tempranas	37
Tabla 4: Categoría de la obra	39
Tabla 5: Clases de exposición del elemento de la obra frente a la DEF	40
Tabla 6: Requisito de temperatura máxima admisible en el núcleo	41
Tabla 7 : Diferenciales térmicos admisibles ($^{\circ}C$) basados en valores típicos asumiendo α y capacidad de deformación a tracción (Bamforth y Price 2007) [2].....	53
Tabla 8: Efecto del tipo de agregado en el coeficiente de expansión térmica del concreto (Davis, 1930) [31].....	57
Tabla 9: Tolerancia de espesores de fisuras según la exposición (Tabla 4,1 ACI 224R-01)	63

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE 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]. 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).

Actualmente en nuestro país se presentan proyectos de gran infraestructura (sector minero, hidro energético, industrial, etc), donde se colocan grandes volúmenes de concreto para distintos tipos de estructuras. Alrededor del 40% del volumen de concreto en estos proyectos están en vaciados considerados como masivos.

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].

Estos tipos de concretos deben tener consideraciones especiales para así cumplir las características de desempeño requeridas en las Especificaciones Técnicas del Proyecto (EETT). Sin embargo, el problema muchas veces está en la definición y las tolerancias de estas consideraciones debido al poco entendimiento de las causas y los efectos de las patologías que generan estos vaciados de concreto en el elemento estructural.

Luego de realizar una revisión bibliográfica de la literatura existente sobre normativas y recomendaciones que involucran la construcción de elementos de concretos masivos, se encontraron lineamientos y consideraciones en documentación internacional basado en las características del concreto a utilizar y su posterior exposición en su vida útil. Sin embargo, se constató la ausencia de estos lineamientos en la Norma Nacional de Concreto Armado (E-0.60).

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

A priori, los vaciados de concreto masivo generan un considerable aumento de temperatura en el concreto a edades tempranas producto de la hidratación del cemento, por lo cual es necesario realizar un monitoreo constante durante los primeros días y así evitar patologías indeseables en la estructura. Cuando no existe un control térmico adecuado del elemento a vaciar, la generación de calor del concreto podría provocar dos problemas en la estructura:

- I. Se podría generar un elevado gradiente térmico entre el interior del concreto y la superficie expuesta, lo cual causaría fisuras en el concreto.
- II. La elevada temperatura en el núcleo de concreto a edades iniciales podría provocar la formación de etringita diferida (DEF), que es un compuesto expansivo que tendería a microfisurar y posteriormente fisurar el concreto.

En este documento se pretende dar lineamientos para identificar a los elementos considerados como vaciados de concreto masivo y explicar la problemática que este involucra; así como dar consideraciones a tomar en cuenta durante las etapas de diseño y construcción a fin de obtener una estructura que cumplan las características de desempeño de las EETT de cada Proyecto.

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.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

2. Definición de concreto masivo

El American Concrete Institute (ACI) en cuatro de sus comités define al concreto masivo de la siguiente manera:

- Según el ACI 116 “Terminología del cemento y del hormigón” [3] el concreto masivo es “cualquier elemento de grandes dimensiones que genere que se tomen medidas preventivas para contrarrestar la generación de calor interior debido a la hidratación de cemento causando cambios volumétricos y con esto, fisuras o grietas”
- Según el ACI 207.1-05 “Guide to Mass Concrete” [1] “(...) El diseño de estructuras de concreto masivo se basa generalmente en la durabilidad, economía y la acción térmica, siendo la resistencia a menudo una preocupación secundaria, más que primaria. La única característica que distingue al concreto masivo del resto de concretos convencionales es su comportamiento térmico”.
- Según el ACI 211.1R-91 “Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete” [4] indica lo siguiente respecto a la definición del concreto masivo “muchos elementos estructurales de grandes dimensiones pueden ser lo suficientemente masivos como para que se tome en cuenta la generación de calor, particularmente cuando las dimensiones mínimas de la sección transversal de un elemento estructural se aproximan o exceden de 2 a 3 pies (0,61 a 0,91m) o cuando se utilizan contenidos de cemento por encima de 600 lb/yd³ (356 kg/m³)”. Se debe dar consideraciones similares a otras colocaciones de concreto que cumplan con estas definiciones pero que contienen cemento de alto calor de hidratación.
- Según el ACI 301-16 “Specifications for Structural Concrete” [5] el concreto masivo es cualquier “Volumen de concreto estructural en el que la combinación de las dimensiones del elemento a vaciar, las condiciones de contorno, las características del concreto y las condiciones ambientales pueden provocar esfuerzo térmicos indeseables, agrietamiento, reacciones químicas nocivas o reducción de resistencia a largo plazo como resultado de la elevada temperatura del concreto debido al calor de hidratación”.

De lo mencionado líneas arriba, se puede desprender que el criterio para considerar un vaciado de concreto como masivo es el riesgo a la fisuración por cambios volumétricos originados por el calor generado debido a la propia hidratación del cemento (comportamiento térmico), el espesor de la sección mínima del elemento a vaciar, la cantidad y el tipo de cemento (calor de hidratación) a utilizar en la dosificación de la mezcla.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

De las experiencias registradas en diferentes tipos de proyectos, se ha notado variaciones en los registros de temperaturas según las características del elemento a vaciar. Por ejemplo, una zapata de 1,5m de espesor, en el cual se utilizó un concreto de $f'c = 21\text{MPa}$ con 320 kg/m^3 de cemento Tipo V, generó una temperatura máxima en el núcleo de 58°C y en el vaciado de un muro de 0,6m de espesor, en el cual se utilizó un concreto de $f'c = 35\text{MPa}$ con 460 kg/m^3 de cemento Tipo I, generó una temperatura máxima en el núcleo de 71°C . Por lo que es importante enfatizar que este comportamiento térmico de elevada temperatura depende de la cantidad de cemento, tipo de cemento, espesor del elemento y no necesariamente del volumen del elemento a vaciar.

A modo de ejemplo, en un vaciado de 1200 m^3 de concreto y utilizando una misma dosificación de concreto podríamos tener comportamientos térmicos diferentes en función de las dimensiones del elemento. Si ese volumen de concreto es utilizado en una losa de concreto de 0,2m de espesor con una sección en planta de 60m x 100m tendríamos mucho menor generación de temperatura en el núcleo que, en una sección de concreto de una fundación de 2m de espesor con una sección en planta de 20m x 30m. Sin embargo, realizando una evaluación normativa de este ejemplo, notamos que la losa de 0,2m de espesor no cumple el requerimiento de espesor mínimo del ACI 211.1 para ser considerado con un vaciado de concreto masivo, por lo cual solo la fundación de 2m de espesor es considerada como un vaciado masivo.

Dentro de las estructuras que también deberían considerarse de comportamiento masivo están los elementos prefabricados, debido a que el concreto utilizado en este tipo de elementos es sometido a un tratamiento térmico que genera una elevada temperatura inicial para su puesta en servicio en plazos de tiempo reducidos respecto a los elementos convencionales de concreto [6].

3. Normativas relacionadas

Luego de la revisión bibliográfica, a continuación, se enlista las principales normas y especificaciones técnicas referidas al diseño y construcción del concreto masivo

- ACI 211.1-91 “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete” [4]
- ACI 207.1R-05 “Guide to Mass Concrete” [1]
- ACI 201.2R-16 “Guide to Durable Concrete” [7]
- ACI 207.2R-07 “Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete” [8]

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

- ACI 207.3R-94 “Practices for Evaluation of Concrete in Existing Massive Structures for Service Conditions” [9]
- ACI 207.4R-93 “Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete” [10]
- ACI 207.5R-99 “Roller-Compacted Mass Concrete” [11]
- ACI 301-16 “Especificaciones para concreto estructural” [5]
- ICH “Especificación para hormigón masivo estructural” [12]
- CIMbéton “Guide de prescription des ciments pour des constructions durables : Cas des bétons coulés en place” [13]
- Eurocode 2 “Design of concrete structures – Part 3: Liquid retaining and containment structures” [14]
- Guía Técnica “Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne” [15].

4. Problemática de los vaciados de concreto masivo

La problemática envuelta en los vaciados de concreto masivo se da debido a la generación de calor del concreto provocada por el proceso de hidratación del cementante, el cual debe ser controlado adoptando las medidas adecuadas a fin de cumplir los requerimientos de desempeño de los elementos estructurales involucrados. Estas medidas condicionaran el diseño, las especificaciones del concreto y la ejecución de la estructura.

El concreto genera calor debido al proceso de hidratación del material cementicio, lo cual es provocado por la reacción química que proporciona resistencia al concreto. Al igual que el desarrollo de la resistencia, la mayor parte de la generación de calor ocurre en los primeros días después de la colocación. Para elementos delgados como pavimentos rígidos, la energía térmica se libera casi tan rápido como se genera; sin embargo, para secciones más gruesas, específicamente concreto masivo, el calor no puede liberarse tan rápido como se genera, este calor queda atrapado y genera un aumento de temperatura en el concreto. A medida que aumenta la temperatura del concreto, se genera más calor acumulado, lo cual aumenta aún más la temperatura del núcleo de concreto. Posteriormente, el concreto comienza a enfriarse porque hay una cantidad finita de energía térmica en los materiales cementicios [16]. Esta cantidad total de energía térmica depende de la cantidad y del tipo de materiales cementicios.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

Existen dos preocupaciones que involucran a los vaciados de concreto masivo: el agrietamiento por efectos térmicos y la formación de etringita diferida (DEF). A continuación, se describe con más detalle el desarrollo de los fenómenos térmicos en los vaciados de concreto masivo.

4.1. Fisuración por efectos térmicos

Los problemas de fisuración térmica se notaron por primera vez en las presas donde se encontró que ocurrían aumentos significativos de temperatura debido al calor de hidratación y la posterior fisuración por la contracción que se produce durante el enfriamiento [1], [17].

El aumento de temperatura durante la fase de generación de calor está controlado principalmente por el calor producido por la hidratación del concreto. Cuando el cemento reacciona con el agua durante la hidratación, se produce una reacción exotérmica que desprende calor. La cantidad total de calor liberado y la velocidad a la que se libera depende en gran medida de la composición química del concreto. Es conocido que el calor generado es principalmente una función del contenido porcentual de Alita (C_3S), Belita (C_2S), Aluminato (C_3A) y Aluminoferrita (C_3AF) en el cementante. La velocidad de generación de calor también está influenciada por la finura Blaine del cemento, donde cuanto más fino sea el material, más rápido reacciona con el agua y la adición de diferentes aditivos como retardantes o acelerantes [17].

La fase de disipación de calor es función de las propiedades térmicas del concreto: difusividad térmica, capacidad calorífica y conductividad térmica. Entonces la magnitud de la pérdida de calor es una función del ambiente en contacto con el concreto. Cuando las estructuras de concreto tienen grandes proporciones Volumen/Superficie (V/S), el calor generado en el interior no se disipa fácilmente a través del concreto debido a su baja conductividad térmica y la estructura se vuelve casi adiabática, lo que resulta en altas temperaturas internas. Sin embargo, el aumento de calor en la superficie de la estructura de concreto puede disiparse mucho más rápido en el medio ambiente, lo que resulta en un aumento de temperatura mucho menor a menos que se controle la pérdida de calor. Cuando la temperatura de la superficie es mucho más baja que la temperatura interior, se producen grandes diferencias de temperatura [18].

La cantidad variable de generación y disipación de calor hace que el interior de la sección de concreto se caliente más que su superficie. En otras palabras, se desarrolla una diferencia de temperatura entre el interior y la superficie. Esto genera esfuerzos térmicos en el interior del concreto (debido a que el interior del concreto se expande y la superficie se contrae). El agrietamiento ocurre inmediatamente cuando el esfuerzo a tracción excede la resistencia a la tracción del concreto, este agrietamiento se denomina agrietamiento por efectos térmicos. En la mayoría de los casos, el agrietamiento térmico es un problema de durabilidad porque proporciona vías fáciles para que el aire y el agua lleguen al acero de refuerzo y comience la corrosión.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

En algunos casos, donde los esfuerzos térmicos son importantes, la fisuración puede afectar la capacidad estructural del concreto (Figura 1 y 2).



Figura 1: Ejemplo de agrietamiento térmico severo en la superficie superior de una cimentación [16]



Figura 2: Una diamantina de concreto extraído de la base de una cimentación muestra el grado de fisuración térmica.[16]

El agrietamiento térmico adopta muchas formas. En ubicaciones de grandes fundaciones puede aparecer como mapas de fisuras aleatorias. En las paredes puede aparecer como una serie de fisuras verticales que son más anchas cerca de la base. En las vigas, puede aparecer como fisuras espaciadas uniformemente perpendiculares a la dimensión más larga de la viga [16].

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

4.2. Formación de Etringita Diferida (DEF)

La otra preocupación es la causada por la elevada temperatura a la que el concreto puede llegar a edades tempranas, estas altas temperaturas modifican la reacción de hidratación del cemento.

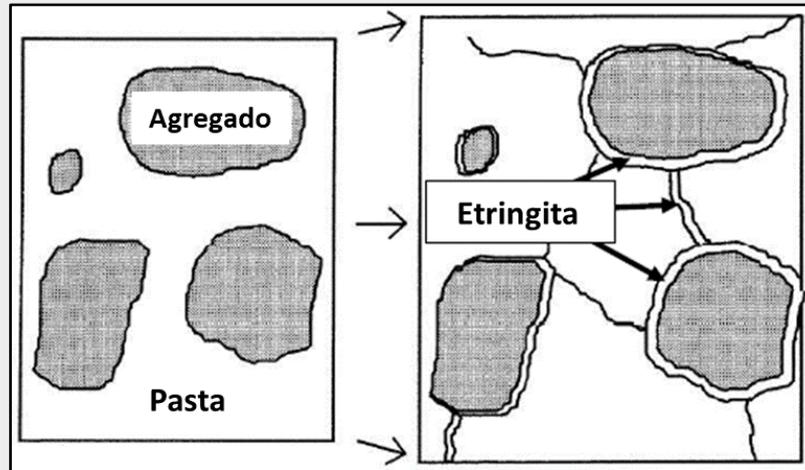


Figura 3: Mecanismo de la expansión del DEF (Taylor et al. 2001)

A temperaturas superiores de 70°C (158°F) se podrían desarrollar productos de hidratación inestables en algunos concretos. Esto se conoce como una reacción sulfática interna (RSI) que es definida como la formación de etringita diferida (DEF: Delayed Ettringite Formation) en un material cementicio. En los concretos donde se produce DEF, los productos de hidratación inestables pueden eventualmente comenzar a expandirse dentro del concreto en estado endurecido. Este es un efecto a largo plazo que puede no ocurrir durante meses o años después del vaciado de concreto sin aporte de sulfato externo. En su peor forma, el DEF puede causar un agrietamiento significativo en la estructura de concreto (Figura 4 y 5) [7].

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO



Figura 4: DEF en una columna en San Antonio, Texas [19]



Figura 5: Fisuras producidas por DEF en Pilar de Puente [20]

Se debe entender que en el concreto siempre hay etringita (trisulfato-aluminato de calcio hidratado) y necesita el consumo de grandes cantidades de agua. En el concreto se distinguen tres tipos de etringita [6], [21]:

- **Etringita Primaria:** Se forma en los primeros instantes de hidratación del cemento bajo la acción de sulfatos de origen interno del concreto (los sulfatos de calcio introducidos en

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

el cemento como regulador de fraguado reaccionan al contacto del agua con el aluminato tricálcico C_3A y dan lugar a la etringita primaria). Nunca es expansivo ni patológico. Luego se descompone para formar monosulfo-aluminato de calcio. Se presenta más comúnmente en forma de agujas.

- **Etringita Secundaria:** Se desarrolla cuando el concreto se encuentra en estado endurecido. Si los sulfatos son de origen interno, la etringita es estable y no es de carácter expansivo. Si los sulfatos son de origen externo, la etringita puede generar expansión.
- **Etringita Diferida:** Se desarrolla cuando el concreto se encuentra en estado endurecido. Puede provocar o no expansión. Los iones sulfatos son de origen interno. Se trata de un concreto en el que la etringita primaria no pudo formarse en los primeros instantes de hidratación. Esta formación de etringita genera esfuerzos internos en el concreto, que pueden ser lo suficientemente grandes como para provocar su microfisuración y en última instancia, su hinchamiento. Son muchas las condiciones que deben cumplirse, tanto a nivel de los componentes del concreto, como el incremento térmico y humedad del ambiente, para que aparezca este tipo de etringita, lo que explica su rareza.

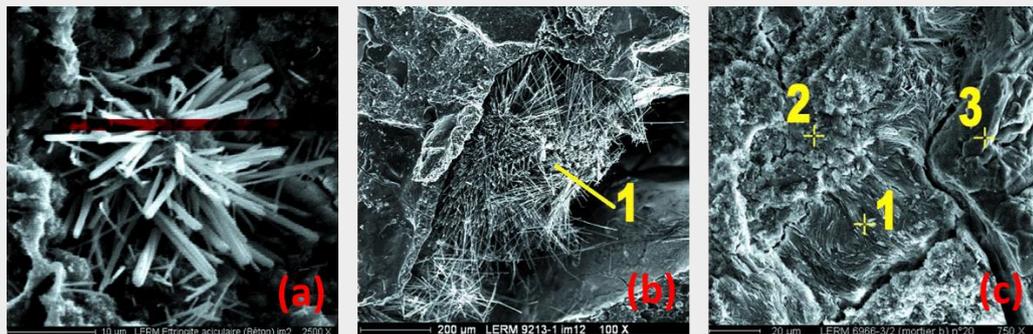


Figura 6: (a) Etringita primaria no expansiva en pasta de cemento, vista bajo un microscopio electrónico de barrido; (b) Etringita secundaria no expansiva en un poro (1), vista con un microscopio electrónico de barrido; (c) Etringita expansiva (1 y 2) en contacto con un agregado (3), visto bajo un microscopio electrónico de barrido [21].

Es necesario distinguir el fenómeno de reacción sulfática interna (RSI) o formación de etringita diferida (DEF), del fenómeno de reacción sulfática externa (RSE), conocido desde 1887 y señalado por Candlot debido a observaciones en los morteros reforzados de París cuando estaban en contacto con una mezcla de agua y yeso. En el caso de la RSE, las fuentes de sulfatos pueden ser aportadas por los suelos, mediante sales de deshielo o ser transportadas por agua subterránea, agua de filtración, agua de mar o agua generada por sitios industriales. Los sulfatos penetran a través de la red capilar del concreto y pueden causar la formación de la llamada etringita “secundaria” que puede generar fenómenos de expansión y, por lo tanto, degradaciones del concreto. Entonces, en el caso de la RSE, se genera una degradación progresiva desde la superficie hasta el núcleo del elemento de concreto [6].

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

En ciertos casos, cuando el concreto sufre un aumento de temperatura a edad temprana, puede aparecer el fenómeno de la reacción interna del sulfato (RSI), y esto, sin la contribución del sulfato por una fuente externa. El DEF puede ocurrir en 2 tipos de concreto: concretos tratados térmicamente (por ejemplo, los elementos prefabricados) y concretos de secciones importantes vaciados en obra: secciones de concreto para las cuales el calor liberado se descarga parcialmente hacia el exterior y conduce a una elevación importante de la temperatura del concreto [6]. Para prevenir el DEF, la regla general es mantener la temperatura del concreto a menos de 70°C (158°F) o utilizar los rangos establecidos en el ACI 201.2R-16.

La gran mayoría de iones de sulfato de origen interno proveniente del cemento y bajo ciertas condiciones, pueden disolverse en la solución intersticial del concreto. La reacción sulfática involucra a estos iones de sulfato presentes en la solución intersticial, así como a los aluminatos del cemento, y puede conducir a la formación de etringita susceptible de provocar la expansión en el concreto endurecido. El fenómeno de expansión sulfática interna puede manifestarse por la aparición de fisuración multidireccional formando una malla relativamente grande de 10 a 30cm en la superficie de concreto [6].

Para lograr la reacción sulfática interna (RSI) es esencial la conjunción de varios parámetros para iniciar y desarrollarla. Los parámetros principales son el agua, la temperatura y su tiempo de retención, el contenido de sulfato y aluminato del cemento, así como el contenido de álcali del concreto [6], [8]:

- **Agua y humedad:** Se puede constatar, tanto en laboratorio como en obras, el rol fundamental del agua en el desarrollo de la reacción. El agua es un medio reactivo necesario para el desarrollo de la reacción. El agua y la humedad intervienen también en los procesos de transferencia, así como en la formación de productos de reacción. La RSI afecta principalmente las partes de las estructuras en contacto con el agua (zona sumergida, zona de mar) o sometidos a afluencia de agua (falta de estanqueidad, ausencia de drenaje, etc), incluso expuestas a un alto nivel de humedad.
- **Temperatura y tiempo de retención:** La temperatura máxima alcanzada y su duración en el tiempo condicionan el riesgo de formación de etringita diferida. Se ha mostrado que; si la temperatura supera los 70°C y si los otros parámetros primordiales están presentes, generalmente se desarrolla una RSI (ACI 201.2R-16). Así, una elevada temperatura del concreto durante el fraguado y la madurez es una condición indispensable pero que no es suficiente.
- **Contenido de sulfatos y aluminatos del cemento:** Los sulfatos y los aluminatos intervienen directamente en el mecanismo de reacción para formar la etringita que es un

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

trisulfoaluminato de calcio hidratado. En consecuencia, la RSI solo es posible si el cemento utilizado contiene suficiente aluminato tricálcico ($3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$) y de sulfato SO_3 .

- **Contenido de álcalis del concreto:** Su rol en la solubilidad de la etringita es bien conocido. La etringita es más soluble cuando aumenta el contenido alcalino. Debido a la variación de la solubilidad de la etringita con la temperatura, existe una fuerte interacción entre estos dos parámetros durante el proceso de la RSI. De igual manera, una disminución en el contenido de álcali aumentaría el valor crítico de la temperatura.

Es necesario remarcar que muchas estructuras de concreto son relativamente inmunes a los efectos del DEF. Tales elementos incluyen aquellas aisladas del agua (por ejemplo, estructuras impermeabilizadas) o algunas que contienen materiales cementicios con cierta química resistente (como una mayor proporción de cenizas volantes o puzolanas).

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

5. 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 [6].

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 manera que esto 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 [6].

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE 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) [6].

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.

5.1. 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 [22] 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

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE 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 [23] 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.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

El ACI 301-16 [5] 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 dimensiones y características mecánicas del concreto, propiedades físico-químicas del cemento, así como de 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. A menos que se especifique o permita lo contrario, el plan de control térmico debe incluir los siguientes elementos:

- Dosificación de la mezcla de concreto;
- Aumento de temperatura adiabática del concreto ya sea calculado o medido;
- Límite superior de la temperatura del concreto fresco al momento de la colocación;
- Descripción de medidas y equipos específicos que se utilizaran para garantizar que la temperatura máxima de colocación, 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 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);

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

- 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.

5.2. Controles Térmicos

Para 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 temperatura interna al momento de la remoción del encofrado o microclima sea menor que el límite del diferencial térmico permitido [5].

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 los otros. 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

5.2.1. Instrumentación

Para realizar el monitoreo de las temperaturas del concreto, el ACI 301-16 [5] solicita colocar un sensor de temperatura en el núcleo de concreto y otro sensor de temperatura a una profundidad

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

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.

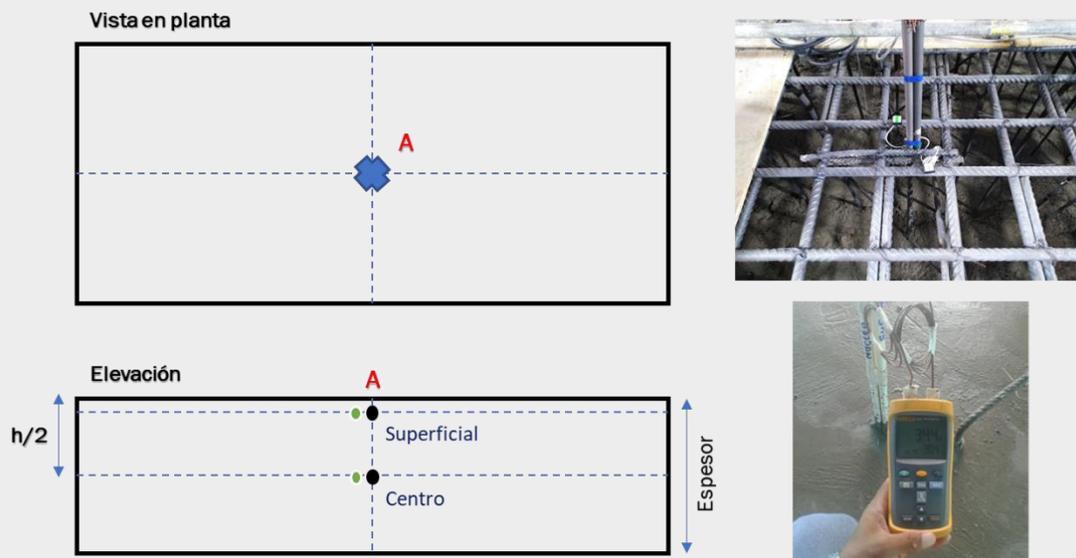


Figura 7: Ubicación de sensores de temperatura en la sección de concreto masivo.

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 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 se colocará concreto masivo adicional hasta que se haya identificado la causa de la excesiva temperatura o diferencial térmico y se haya adoptado las correcciones.

5.2.2. 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:

RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

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

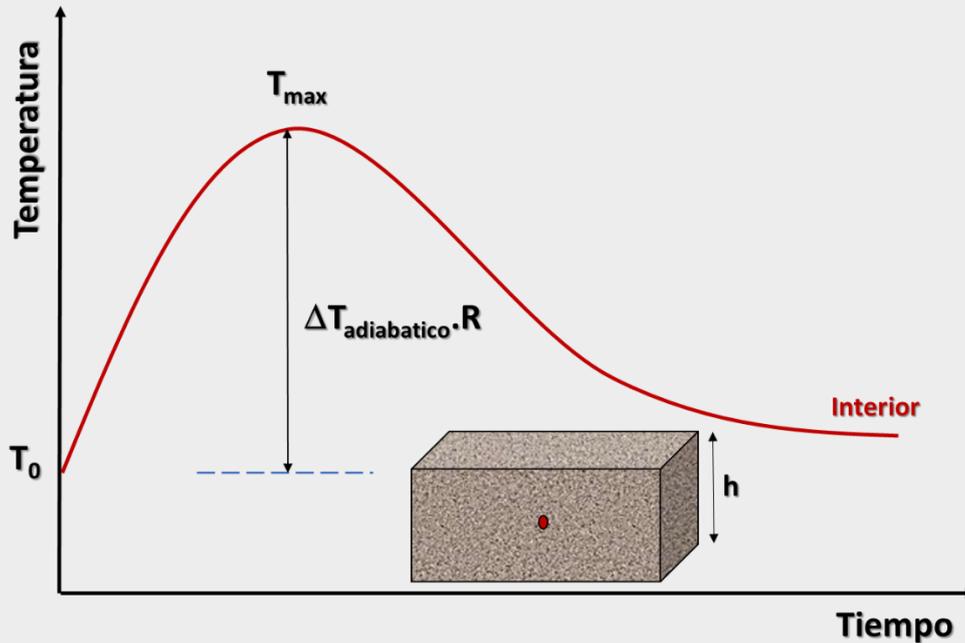


Figura 8: Curva de evolución de la temperatura en el núcleo de concreto

Donde:

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

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

$\Delta T_{adiabatico}$: 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 ($\Delta_{adiabatico}$)

Como ocurre con otros tipos de concreto, el concreto masivo se compone de cemento, agregados, agua y con frecuencia puzolanas y aditivos; siendo solo el material cementicio quien genera una reacción exotérmica cuando reacciona con el agua.

La elección del tipo de cemento y una eventual adición, debido a la prescripción del proyecto, deben tomar en cuenta los costos, la trabajabilidad, la durabilidad, la resistencia, la ausencia de fisuras, el bajo aumento de temperatura del concreto y en caso sean estructuras hidráulicas, una baja permeabilidad.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

De hecho, el cementante (cemento y adiciones) debe ser lo menos exotérmico posible sin dejar de ser compatible con las especificaciones relacionadas con la clase de exposición y con los requerimientos de resistencia del concreto. Del mismo modo, la dosis de aglutinante se podría minimizar, a la menor cantidad posible, mientras se cumplen los requisitos de trabajabilidad, resistencia y durabilidad, esto a fin de minimizar el aumento de temperatura en el concreto. El uso de los cementos adicionados y/o la incorporación de adiciones son soluciones adecuadas para minimizar la reacción exotérmica del concreto. [1], [6].

Para vaciados de concretos masivos, es deseable utilizar cementos de bajo o moderado calor de hidratación conforme a la norma ASTM C150 / NTP 334.009 (Cementos Portland), la norma ASTM C595 / NTP 334.090 (Cementos Portland Adicionados), la norma ASTM C1157 / NTP 334.082 (Cementos Portland Performance), o se use Cemento Portland con cenizas volantes clase F o cemento con escorias o ambos [5].

De lo antes mencionado se puede concluir que para vaciados de concretos masivos no se recomienda el uso de Cemento Tipo I o GU sin medidas que ayuden a controlar los problemas de temperatura debido a su calor de hidratación sustancialmente más alto [1, p. 1]. Los cementos de alto calor de hidratación como los de Tipo III o HE tampoco son recomendados para vaciados masivos [5].

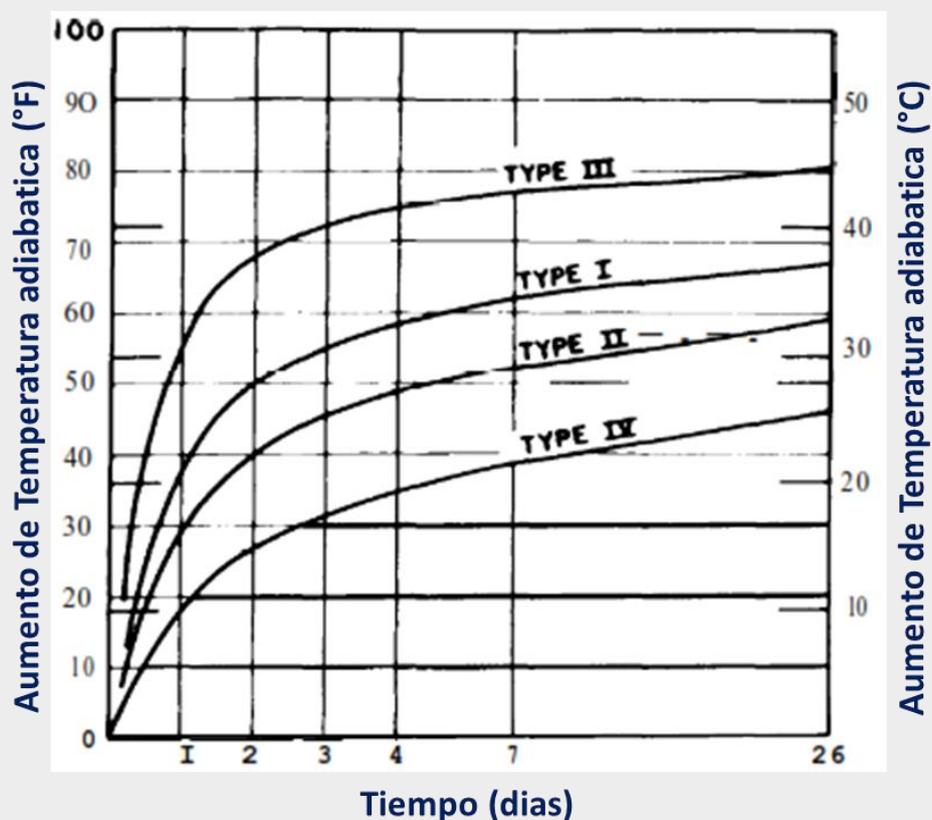
A modo de ejemplo, el remplazo en el diseño de concreto de un Cemento Tipo I por un Cemento Tipo HS (en un elemento de un espesor de 1m) se traduce en una disminución de la temperatura máxima de 12°C aproximadamente.

En el Apéndice 5 del ACI 211.1 [4] se encuentran algunas orientaciones para dosificar concretos considerados masivos, “el propósito del procedimiento de dosificación de concreto masivo es combinar los materiales cementicios disponibles, agua, agregados y aditivos de manera que la mezcla resultante no exceda algún aumento de temperatura permitido y sin embargo cumpla los requisitos de resistencia y durabilidad. En algunos casos, se puede requerir dos mezclas: un concreto masivo interior y un concreto exterior a fin de resistir las diversas condiciones de exposición. En consecuencia, los especialistas de tecnología de concreto y diseñadores estructurales durante la etapa de diseño deben considerar los efectos de la temperatura en las propiedades del concreto”

“Por ejemplo, una placa de 15cm de espesor disipa el calor generado con bastante facilidad, pero a medida que aumenta el espesor y tamaño del elemento, se alcanza un punto en el que la tasa de calor generado supera con creces la tasa de calor disipado. Este fenómeno produce un aumento de temperatura dentro del concreto que puede causar suficiente diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la masa de concreto que inducen esfuerzos de tracción. El

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

diferencial de temperatura entre el interior y el exterior del concreto generado por la disminución de las condiciones de temperatura del aire (ambiente) puede causar fisuras en las superficies expuestas. Además, a medida que el concreto alcanza su temperatura máxima y se produce el subsiguiente enfriamiento, este enfriamiento induce tensiones de tracción si el cambio de volumen está restringido por cimientos o conexiones a otras partes de la estructura. La cantidad de calor producido por el cemento es función de su composición química (Figura 9) y de su temperatura inicial. El cemento tipo II se utiliza con mayor frecuencia en el concreto masivo, ya que es un cemento de moderado calor de hidratación y generalmente tiene propiedades favorables para la mayoría de los tipos de construcción. Cuando se usa el cemento Tipo II combinado con Puzolanas, el calor generado es comparable con el del cemento Tipo IV” [4].



Tipo de cemento	Finura (cm ² /gr) ASTM C115	Calor de hidratación a 28 días (Cal/gr)
I	1790	87
II	1890	76
III	2030	105
IV	1910	60

Figura 9: Aumento de temperatura del concreto masivo que contiene 223 kg/m³ de cemento [4].

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

En el Perú las alternativas que cumplen con estas características son los cementos tipo IP, II, V, MS o HS. En el caso de utilizar escorias de alto horno o cenizas volantes, se mejorará la resistencia de los concretos frente a la Reacción Sulfática Interna (RSI), especialmente debido a la disminución relativa en la cantidad de aluminatos provenientes del Clinker y de la modificación de la naturaleza y de la textura de los hidratos. Además, el uso de adiciones como sustitución del cemento, contribuye a reducir la cantidad de sulfatos dentro del concreto.

La baja temperatura de colocación del concreto, comúnmente utilizada en vaciados de concretos masivos, por lo general disminuirá la tasa de hidratación del cemento y el calor inicial generado. En consecuencia, por el concepto de madurez, también se puede reducir el desarrollo de la resistencia en los primeros días. Otro aspecto que afecta la tasa de calor de hidratación es la finura del cemento; sin embargo, tiene poco efecto sobre el calor inicial generado. Los cementos finamente molidos producirán calor más rápidamente durante las primeras edades que un cemento molido más grueso, siendo todas las demás propiedades del cemento iguales [4].

Luego de haber comprendido la importancia de la elección del cementante y haber definido que el material cementante es el principal componente que genera una reacción exotérmica en el concreto, los esfuerzos deben concentrarse en disminuir la cantidad de cemento a fin de reducir el calor generado por el concreto. Dentro de las alternativas para reducir la cantidad de cemento de la formulación de concreto, podemos indicar las siguientes:

- **Uso de agregados con mayor TNM:** Generalmente son las características geométricas y las disposiciones del refuerzo de las estructuras las que limitan el tamaño máximo del agregado que puede utilizarse. Sin embargo, también es necesario considerar la producción, el transporte y la trabajabilidad del concreto al momento de su colocación. Por definición y según lo indicado en el ACI 211.1 [4] “los agregados de TNM de mayor tamaño tienen menos vacíos que los agregados más pequeños. Por lo tanto, los concretos con agregados de mayor tamaño requieren menos mortero por unidad de volumen de concreto”. Entonces de lo antes expuesto, se puede concluir que cuando se utiliza un agregado de mayor TNM se utilizara menos cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto.
- **Uso de aditivos reductores de agua:** Por definición y según el ACI 116-00 [3], se denominan reductores de agua, plastificantes, superplastificantes o fluidificantes al aditivo que, sin modificar la consistencia, permite reducir el contenido de agua de un determinado concreto. En consecuencia, a una relación a/cm constante, tendríamos una reducción de material cementante proporcional a la reducción de agua.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

El uso de un aditivo retardante de fragua es una opción técnicamente adecuada en vaciados de concreto masivo; puesto que la inclusión de este aditivo, retardaría y disiparía la normal generación de calor del concreto durante los primeros días luego del vaciado, lo cual provocaría un leve descenso en la temperatura pico del núcleo de concreto. Sin embargo, esta alternativa es muchas veces inviable debido al alto costo del aditivo y, por ende, el consecuente aumento del costo del concreto.

A menos que se especifique lo contrario, no se debe utilizar aditivos acelerantes [5], los cuales causarían una amplificación en los registros de temperatura obtenidos a edades tempranas.

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 [24] 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).

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

Donde:

- T_o : temperatura del concreto fresco ($^{\circ}C$)
- T_c : temperatura del cemento ($^{\circ}C$)
- T_w : temperatura del agua ($^{\circ}C$)
- T_a : temperatura de los agregados totales ($^{\circ}C$)
- 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 para la mezcla 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 $2^{\circ}C$ a $2,2^{\circ}C$ ($3,4^{\circ}F$ a $4^{\circ}F$), el concreto se enfría cerca de $0,5$

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

°C (1 °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 °C (8 °F), a través del enfriamiento del agua [24].



Figura 10: 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.

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) (1) x (2)	(4)	(5) (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
			Σ = 2767		Σ = 98778

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

Para disminuir 1°C en la temperatura inicial:

- La temperatura del cemento se debe reducir = $2767/386 = 7,2 \text{ °C}$
- la temperatura del agua se debe disminuir = $2767/669 = 4,1 \text{ °C}$

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

- los agregados se deben enfriar = $2767/1711 = 1,6$ °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 [24].

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

Donde:

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

El hielo molido o en escamas es más eficiente que el agua fría 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 del 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 °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 ($M_i=60$ kg) [24].

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

$$\Sigma = 2767$$

$$\text{Menos } 60 (M_i) \times \text{calor de fusión, (335 kJ/kg)} =$$

$$-20100$$

$$\Sigma = 69892$$

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

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

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 [24].

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) [24].

c) Coeficiente de reducción (R)

De la misma manera es usual realizar vaciados de secciones más delgadas dividiendo el elemento de concreto (figura 11) 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 12). No obstante, esta alternativa debe ser 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.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO



Figura 11: Estructura masiva vaciada en varias secciones [25].

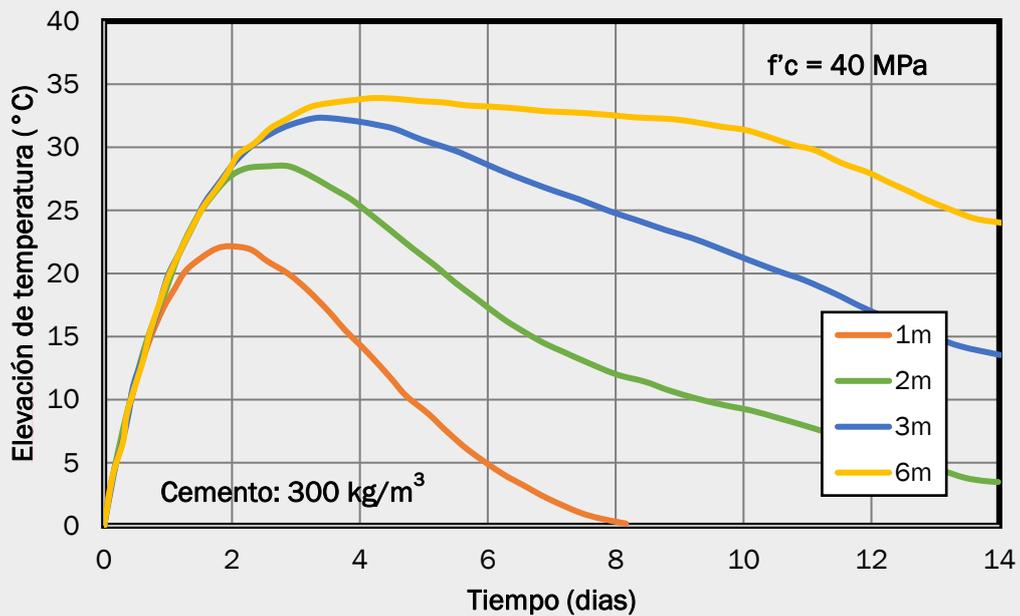


Figura 12: Variación de temperatura en el núcleo de elementos de concreto masivo de diferentes espesores [26].

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

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

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 [10] 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 13 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 [27].

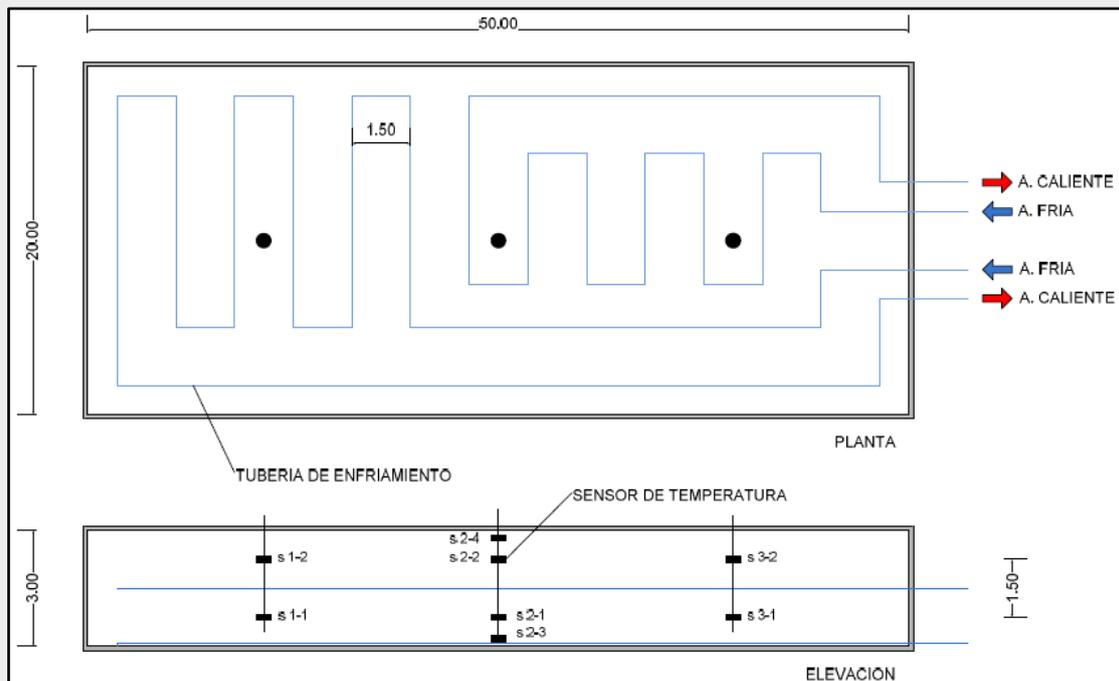


Figura 13: Esquema de distribución de la tubería de post enfriamiento del concreto [27].

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 se activa por la temperatura) es mucho más rápida que la evacuación de las calorías por el circuito de refrigeración [6].

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

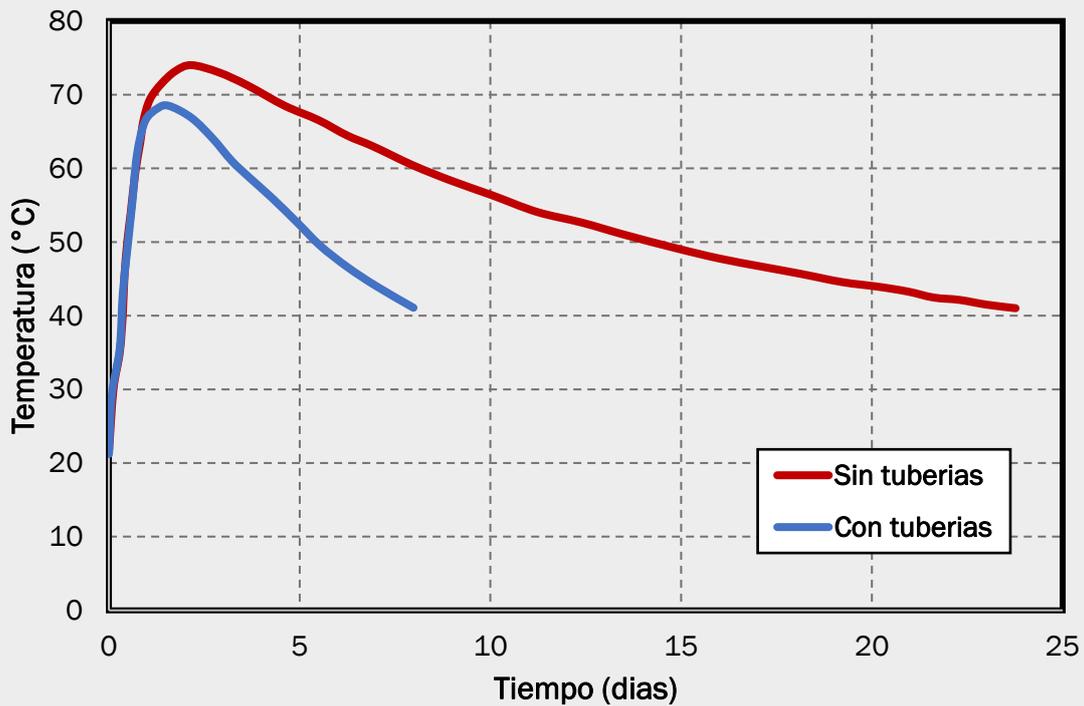


Figura 14: Diferencia entre la generación de temperatura con tuberías y sin tuberías.

La Figura 14 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.

5.2.3. 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.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO



Figura 15: 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 aspersión 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 [5].

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 [6].

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

5.2.4. 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 (Figuras 16 y 17) 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.



Figura 16: Bloque experimental de concreto [18].

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO



Figura 17: Vaciado de bloque experimental de concreto [18].

De acuerdo a lo indicado en el Eurocode 2 (EN 1992-3:2006) [14] dentro del ítem relacionado a la evolución de calor y desarrollo de temperatura por hidratación, el cual indica lo siguiente: “Cuando las condiciones durante la fase de construcción se consideren significativas, las características de generación de calor de un cemento en particular usualmente deben obtenerse de ensayos. La evolución real de calor debe determinarse teniendo en cuenta las condiciones esperadas durante el tiempo de vida inicial del elemento (por ejemplo, curado, condiciones ambientales). El aumento máximo de temperatura y el tiempo de ocurrencia después del vaciado deben establecerse a partir del diseño de la mezcla, la naturaleza del encofrado, las condiciones ambientales y las condiciones de contorno”.

Cuando se pueda demostrar que el DEF no es una preocupación, se justifican temperaturas más altas; sin embargo, las temperaturas superiores a 85°C (185°F) pueden reducir las propiedades estructurales del concreto (resistencia y módulo de elasticidad) [16].

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.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

6. Clasificación de los límites de temperatura máxima del concreto según su exposición.

De la bibliografía internacional revisada, se encontraron dos códigos que brindan clasificaciones de límites de temperatura máxima del concreto a edades tempranas, las cuales están basadas en las características físico químicas del cemento, la temperatura máxima alcanzada en el núcleo de concreto, la importancia del elemento estructural y a la exposición ambiental de la estructura en su vida útil.

Estos documentos son el ACI 201.2R-2016 (EEUU) [7] y la Guía Técnica del IFSTTAR (Francia) [15]. De aquí, la clasificación establecida por el ACI 201.2R-16 restringe la temperatura máxima del concreto en función a características físico químicas del cemento mas no incluye en su clasificación los parámetros de la exposición ambiental (humedad y agua) y la importancia del elemento de concreto. Sin embargo, la Guía Técnica del IFSTTAR clasifica la temperatura máxima del concreto en función de todos estos parámetros en mención. Las dos clasificaciones consideran como temperatura limite (T_{LIMITE}) el valor de 85 °C.

Tomando como referencia estos dos documentos, se realizó una clasificación de los límites térmicos del concreto en función a los siguientes criterios:

- Del ACI 201.2R-16 se tomó la clasificación térmica y las características del cemento a utilizar, esto debido a que en Perú se utiliza la misma normativa para la clasificación de cementos (Tabla 3).
- De la Guía Técnica del IFSTTAR se tomó las recomendaciones de la clasificación térmica en función de la exposición ambiental y la importancia del elemento de concreto (Tablas 4, 5 y 6).

La tabla 3 “Medidas recomendadas para reducir el potencial para DEF en concreto expuesto a elevadas temperaturas a edades tempranas” define una clasificación de temperaturas máximas admisibles en el núcleo de concreto en función a las características del cemento a utilizar.

Tabla 3: Medidas recomendadas para reducir el potencial para DEF en concreto expuesto a elevadas temperaturas a edades tempranas

Temperatura máxima del concreto, T_{max}	Prevención requerida
$T \leq 158^{\circ}\text{F}$ (70°C)	No requiere prevención

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

<p>158°F < T ≤ 185°F (70°C < T ≤ 85°C)</p>	<p>Usar uno de los siguientes enfoques para minimizar los riesgos de expansión:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Cemento Portland que cumple con los requerimientos de la ASTM C150/C150M de moderado o alta resistencia a los sulfatos y cemento de bajo alkali con valores de fineza menores o iguales a 430 m²/kg. 2. Cemento Portland con resistencia de mortero a 1 día (ASTM C109/C109M) menor o igual a 2850 psi (20 MPa). 3. Cualquier cemento portland ASTM C150/C150M en combinación con las siguientes proporciones de puzolana, cemento con escorias: <ol style="list-style-type: none"> a. Mayor o igual a 25% de ceniza volante que cumpla con los requerimientos de ASTM C618 para ceniza volante clase F. b. Mayor o igual a 35% de ceniza volante que cumpla con los requerimientos de ASTM C618 para ceniza volante clase C. c. Mayor o igual a 35% de cemento de escoria que cumpla con los requerimientos ASTM C989/989M. d. Mayor o igual a 5% de humo de sílice (Cumpliendo con ASTM C1240) en combinación con al menos 25% de cemento de escoria. e. Mayor o igual a 5% de humo de sílice (cumpliendo con ASTM C1240) en combinación con al menos 20% de ceniza volante clase F. f. Mayor o igual a 10% metacaolin que cumpla con ASTM C618. 4. Un ASTM C595/C595M o ASTM C1157M mezclado con cemento hidráulico con el mismo contenido de puzolana o cemento de escoria listado en el punto 3.
------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

$T > 185^{\circ}\text{F}$ (85°C)	La temperatura interna del concreto no deberá exceder 185°F (85°C) bajo ninguna circunstancia.
----------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Las precauciones a considerar están en función del nivel de prevención definido para cada elemento de la obra potencialmente “crítica” según la clase de exposición elegida.

Estas recomendaciones solo se refieren a elementos de grandes estructuras de concreto en contacto con el agua o sometidas a un ambiente húmedo. Se trata de elementos masivos o “críticos” para las que el calor liberado durante la hidratación del cemento (el fraguado y el endurecimiento del concreto generan una liberación de calor debido a la naturaleza exotérmica de las reacciones de hidratación) es poco evacuado hacia el exterior, lo que conduce a un aumento significativo de la temperatura en el núcleo del concreto.

El principio del procedimiento preventivo consiste en identificar los elementos del proyecto que son susceptibles de ser sometidos a un fenómeno de DEF, para luego definir un nivel de prevención necesario en función de la categoría de la obra o de una parte de la obra (Categorías I a III de la Tabla 4) y clases de exposición específicas a la DEF (Tabla 5, integrando la importancia de los parámetros de agua y humedad) introduciendo el medioambiente en el cual se encuentra el concreto. El nivel de prevención térmica se obtiene cruzando clases de exposición y categorías de obra (Tabla 6).

Tabla 4: Categoría de la obra

Categoría de obra	Nivel de consecuencia de aparición de DEF	Ejemplos de obras o de partes de la obra
I	Poco importantes o aceptables	<ul style="list-style-type: none"> • Obra de concreto de resistencia inferior a $f'c < 17\text{MPa}$. • Elementos no portantes en edificios. • Elementos fácilmente reemplazables. • Obras provisionales. • La mayoría de los productos prefabricados no estructurales.
II	Poco tolerables	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos portantes de la mayoría de los edificios y obras de Ingeniería Civil (puentes convencionales).

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

		<ul style="list-style-type: none"> • La mayoría de los productos prefabricados estructurales (Incluyendo las tuberías de baja presión).
III	Inaceptables o cuasi inaceptables	<ul style="list-style-type: none"> • Presas, túneles. • Puentes y viaductos de gran importancia. • Edificios patrimoniales. • Traviesas de ferrocarril.

Nota: La categoría de la obra depende de su utilización y del nivel de consecuencia en termino de seguridad que el cliente está dispuesto a aceptar.

Tabla 5: Clases de exposición del elemento de la obra frente a la DEF

Clase de exposición	Descripción del medioambiente	Ejemplos informativos
A	Seco o humedad moderada	<ul style="list-style-type: none"> • Parte de una estructura de concreto situada al interior de edificios donde el porcentaje de humedad relativa es baja o media. • Parte de una estructura de concreto situada al exterior y expuesta a la lluvia.
B	Alternancia de humedad y secado, humedad elevada	<ul style="list-style-type: none"> • Parte de una estructura de concreto situada al interior de edificios donde el porcentaje de humedad relativa es alta. • Parte de una estructura de concreto no protegida por un revestimiento y sometida a la intemperie sin estancamiento en la superficie. • Parte de una estructura de concreto no protegida por un revestimiento y sometida a frecuentes condensaciones.
C	En contacto constante con el agua: inmersión permanente, estancamiento de agua en la superficie, zona de marea.	<ul style="list-style-type: none"> • Parte de una estructura de concreto sumergido permanentemente en agua (pilotes, fundaciones). • Elementos de estructuras marinas. • Algunas fundaciones.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

		<ul style="list-style-type: none"> • Parte de una estructura de concreto regularmente expuesta a salpicaduras de agua.
--	--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Nota: Estas clases de exposición específicas a la DEF deben ser especificadas en los planos para cada parte de la obra susceptible de ser sometida a un fenómeno de DEF.

Tabla 6: Requisito de temperatura máxima admisible en el núcleo

Categoría de la obra	Clase de exposición		
	A	B	C
I	85 °C	85 °C	85 °C
II	85 °C	85 °C	80 °C
III	85 °C	80 °C	75 °C

Nota: La elección del nivel de prevención para cada parte de una estructura es responsabilidad del cliente. Este nivel de prevención debe ser especificado en las EETT. Dentro del proyecto, las partes susceptibles de ser sometidas a fenómenos de DEF pueden ser objeto de actividades preventivas diferentes.

Por lo tanto, el concreto a utilizar empleando esta clasificación, debe cumplir con los requerimientos de diseño y las limitaciones térmicas de las Tablas 3 y 6.

A modo de ejemplo:

- Para la cimentación de un pilar de un puente en medio del cauce de un río, el límite de la temperatura máxima en el núcleo, se obtiene según el análisis siguiente:
 - De la tabla 4, la categoría de la obra sería III por ser una estructura considerada como de inaceptable ocurrencia de aparición de DEF.
 - De la tabla 5, la clase de exposición es C por ser una estructura en constante contacto con el agua.
 - De la tabla 6 se obtiene el requerimiento de la temperatura máxima admisible en función a los valores obtenidos anteriormente (categoría III y exposición C), la cual es 75 °C (T_{LIMITE}).
 - Conociendo el límite de temperatura de 75 °C, se utiliza la tabla 3 para definir los requerimientos del cemento en función a la temperatura máxima alcanzada

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

en el núcleo (T_{MAX}). En caso $T_{MAX} \leq 70^{\circ}C$, no es necesario tomar precauciones referidas a las características del cemento.

En síntesis, se propone disposiciones para limitar los riesgos potenciales de formación de etringita diferida (DEF):

- A nivel de diseño y dimensionamiento de estructuras: evitando zonas de estancamiento de agua, protegiendo el concreto mediante impermeabilización.
- A nivel de la formulación de la mezcla de concreto, es preferible escoger cementos de bajo calor de hidratación.
- Para la fabricación del concreto se debe considerar el enfriamiento de agregados, uso de agua a bajas temperaturas y la reducción del tiempo en el transporte del concreto.
- Para la colocación del concreto, es recomendable evitar el vaciado de concreto en periodos de alta temperatura ambiental y privilegiar los encofrados que no aíslan la temperatura.

Estas disposiciones deben permitir:

- Limitar la temperatura máxima en el núcleo de concreto
- Evitar los contactos prolongados del concreto con el agua.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

7. Método de cálculo para determinar la temperatura máxima en el núcleo de concreto

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 modificación del método desarrollado por la IFSTTAR [15], esta adaptación ha sido realizada a fin de utilizar parámetros fácilmente encontrados para realizar los cálculos, 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.

7.1. 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.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

7.2. 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

7.2.1. 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 del cálculo 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)

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE 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:

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

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 18 muestra esta relación expresada en la Ec. 6.

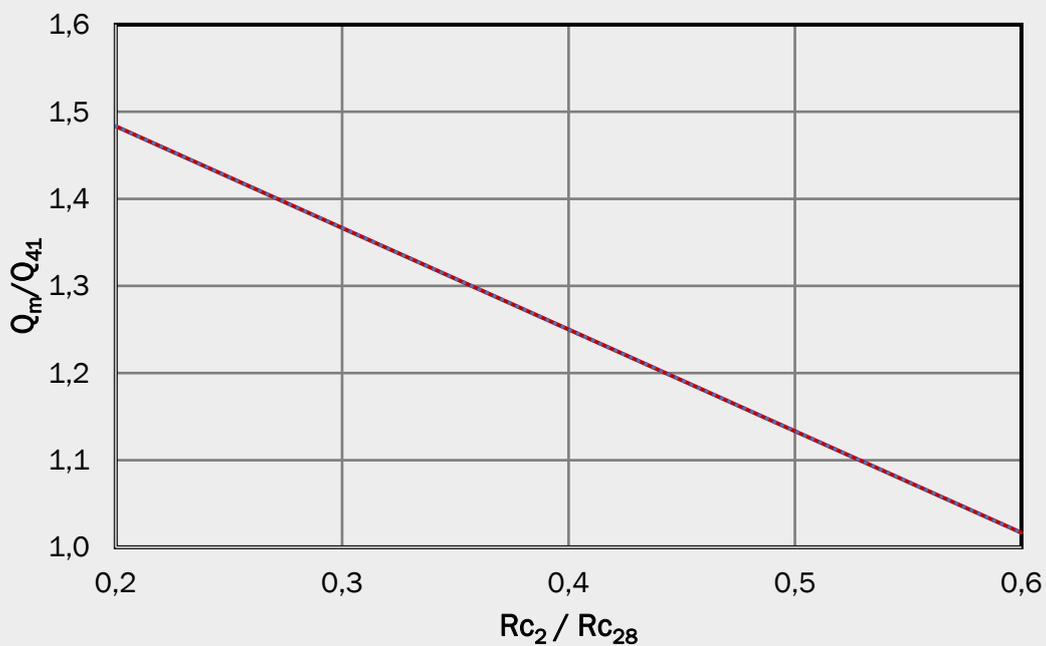


Figura 18: Estimación del calor máximo generado a largo tiempo por el cemento (Q_m)

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

7.2.2. 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 $\psi(^{\circ}C)$ dado por la ecuación 8:

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

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

La figura 19 muestra la variación del término correctivo ψ con la relación a/c .

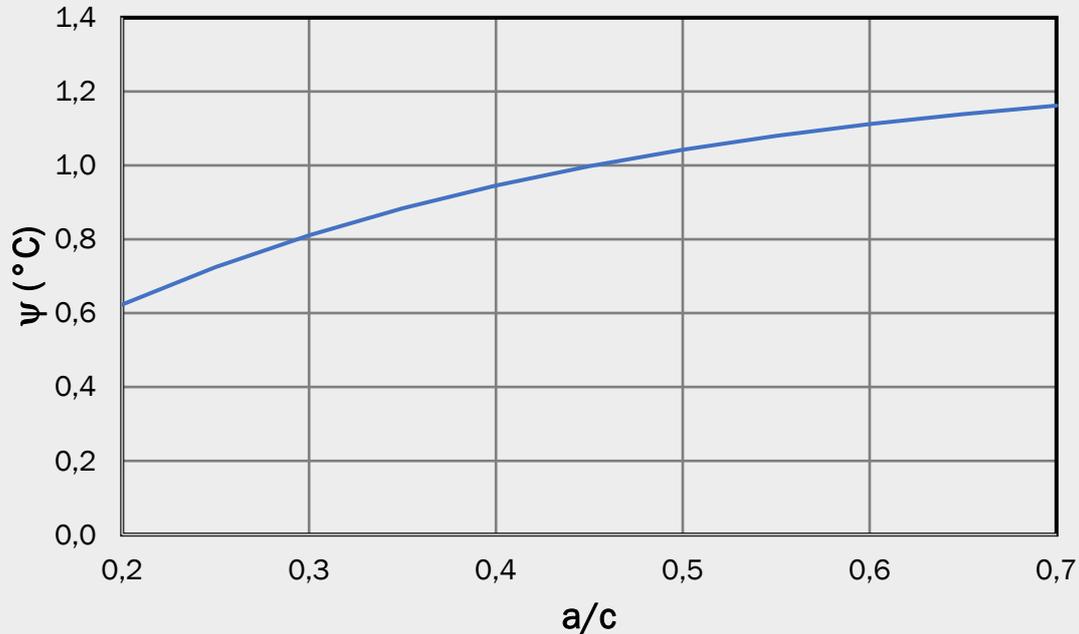


Figura 19: Estimación del término correctivo ψ ligado a la relación a/c

7.2.3. Estimación del incremento de temperatura en estado adiabático

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

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

Donde:

C_p es la conductividad térmica del concreto colocado

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

7.2.4. 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 20 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.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

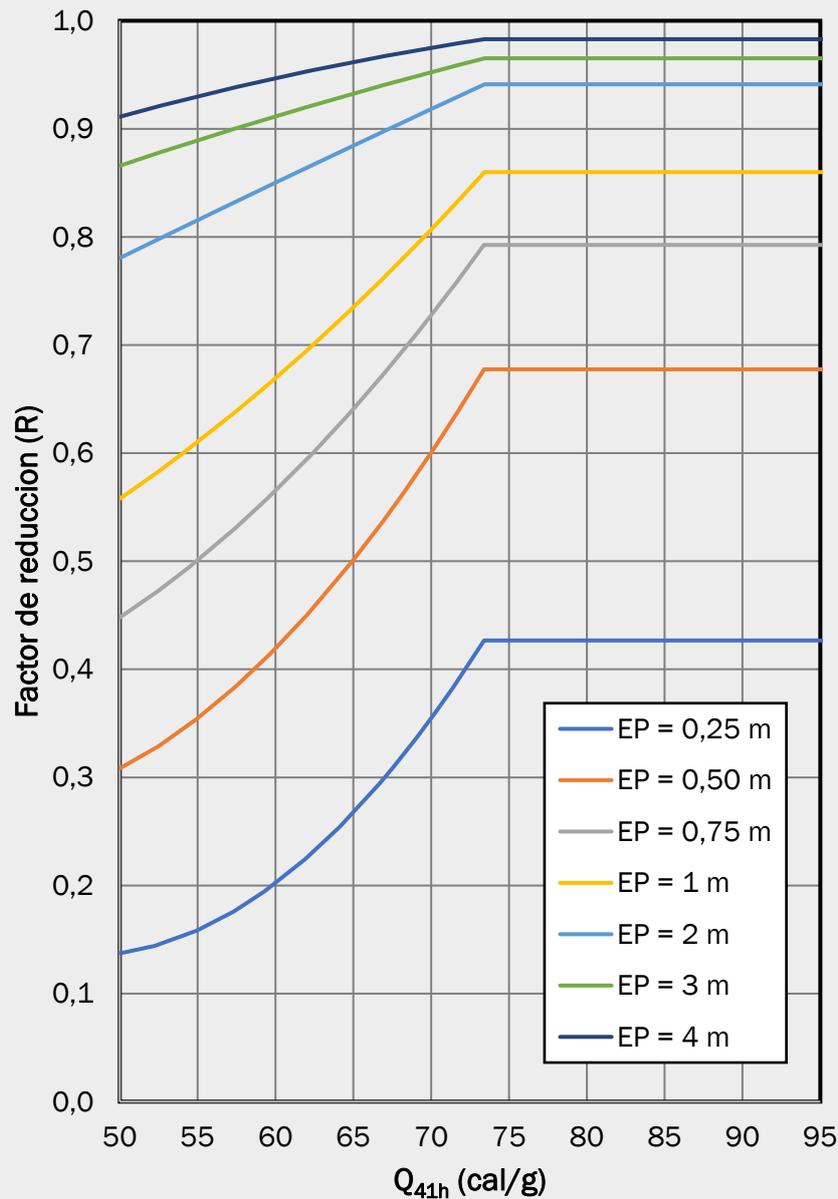


Figura 20: Estimación del coeficiente de reducción R ligado a la liberación térmica

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:

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

7.2.5. 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.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

7.3. 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)

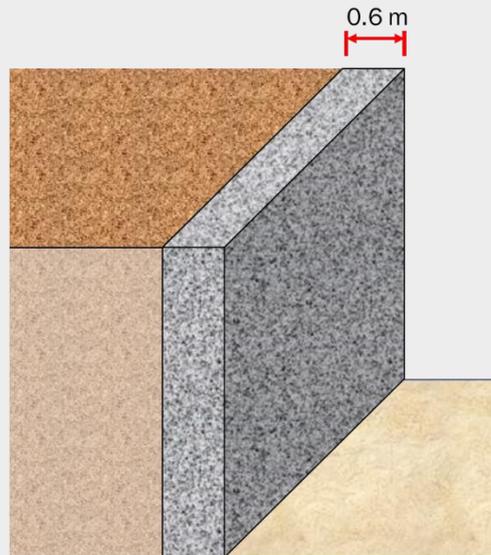


Figura 21: Muro contra terreno de 0,6m

Datos:

Parámetros	Valores
Tipo de cemento	I
Cantidad de cemento (C)	300 kg.
Densidad del concreto (ρ)	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: $Q_m = 1,01 Q_{28\text{días}} = 1,01 \cdot (90 \text{ cal/g}) = 90,9 \text{ cal/g}$

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE 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. 20: $R = 0,72$

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)

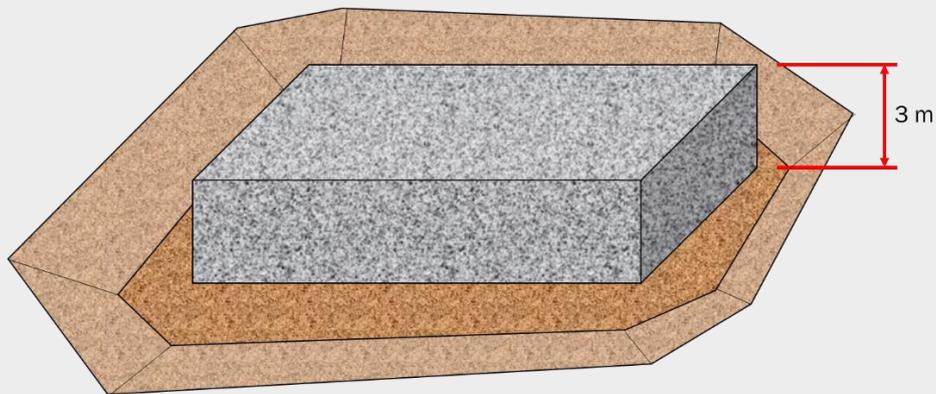


Figura 22: Cimentación de concreto masivo de 3m de espesor.

Datos:

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

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE 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. 20: $R = 0,92$

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)

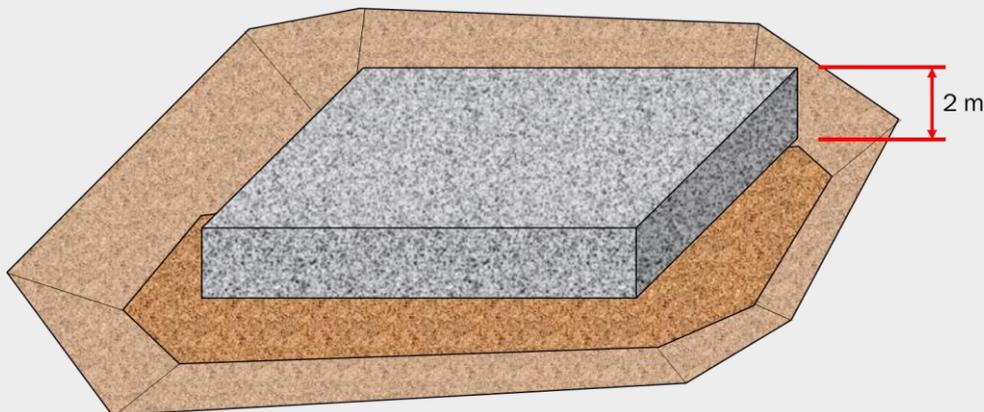


Figura 23: Cimentación de concreto masivo de 2m de espesor.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

Datos:

Parámetros	Valores
Tipo de cemento	MS
Cantidad de cemento (C)	420 kg.
Densidad del concreto (ρ)	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. 20: $R = 0,88$

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

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

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

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

8. Método de cálculo para determinar el diferencial térmico 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]. De igual manera, el ACI 301-16, limita el delta térmico en 19 °C para los vaciados masivos.

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 [28]. 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.

8.1. 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 [8], 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:

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

f_t : Resistencia a tracción del concreto

K_f : Factor de restricción por la fundación

K_R : Factor de restricción por la geometría

E_c : Modulo de elasticidad del concreto

Δc : Contracción lineal del concreto si no hubiera restricción.

El factor de restricción ($K=K_R \cdot K_f$) 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 7 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 7 : 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) (°C)				
$K = 1,00$	6	9	12	20
$K = 0,80$	8	12	16	25
$K = 0,60$	11	17	22	34
$K = 0,42$	20	28	35	53
$K = 0,30$	24	36	46	71

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE 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 $K = 0,42$. 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 (MPa)

E_F : Modulo de elasticidad de la base (MPa)

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 24 muestra el Abaco del ACI 207.2R que es usado para obtener los esfuerzos uniaxiales que se generan en la parte superior del

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE 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) [8].

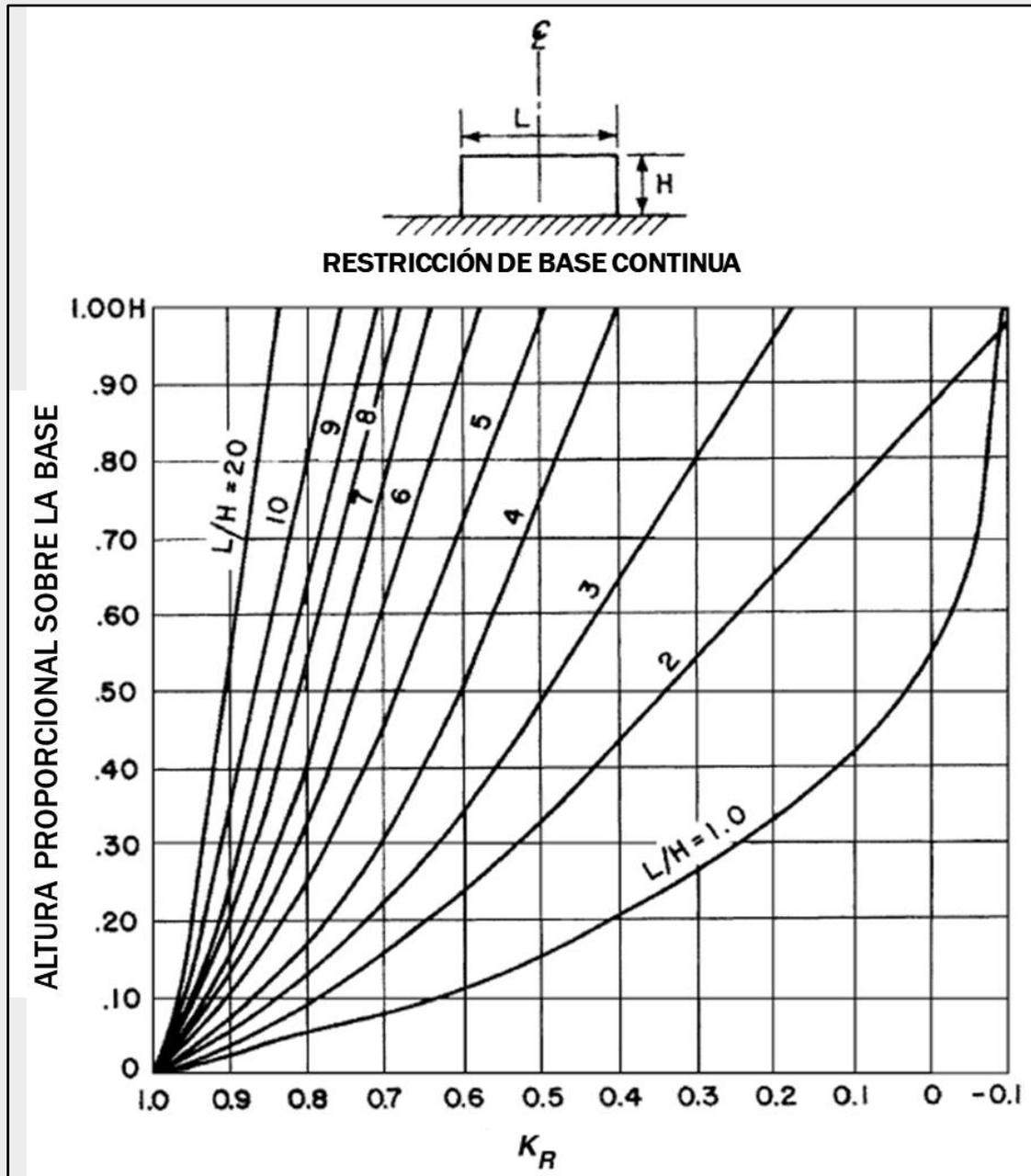


Figura 24: Abaco del grado de restricción por tracción en el centro de la sección [8].

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:

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE 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 8 y la Figura 25 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 provocara 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 [29].

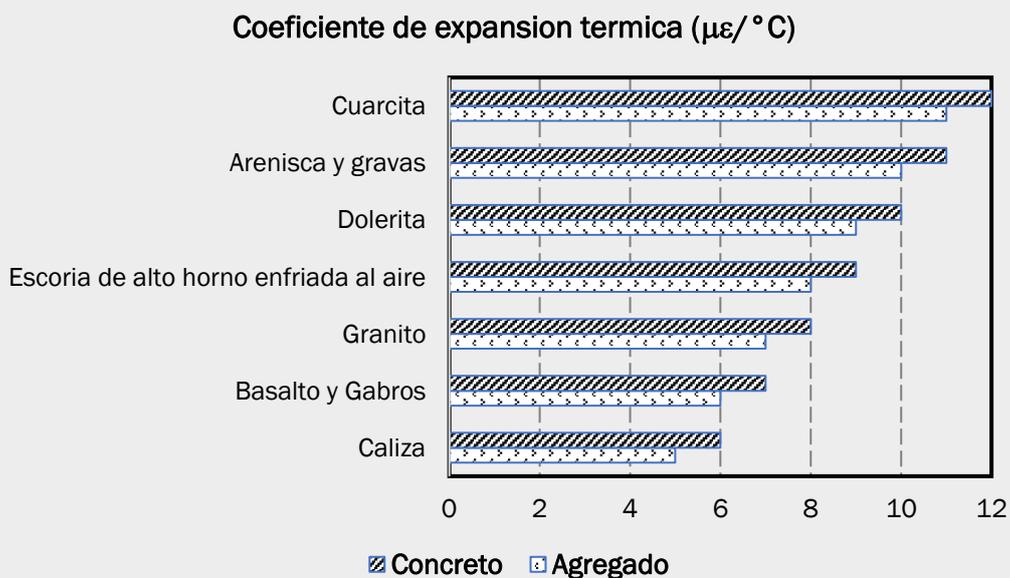


Figura 25: Influencia del tipo de agregado en el coeficiente de expansión térmica del concreto [17].

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

Tabla 8: Efecto del tipo de agregado en el coeficiente de expansión térmica del concreto (Davis, 1930) [30].

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:

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

8.2. 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 $f'c = 10\text{MPa}$.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE 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 24): 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 0,81.

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

$$\text{Utilizando la Ec. 17: } \Delta T = \frac{f_t}{K_R \cdot K_f \cdot E_c \cdot \alpha} = \frac{1,94}{(0,81) \cdot (0,48) \cdot (16969) \cdot (9,5 \cdot 10^{-6})} = 31,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

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.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

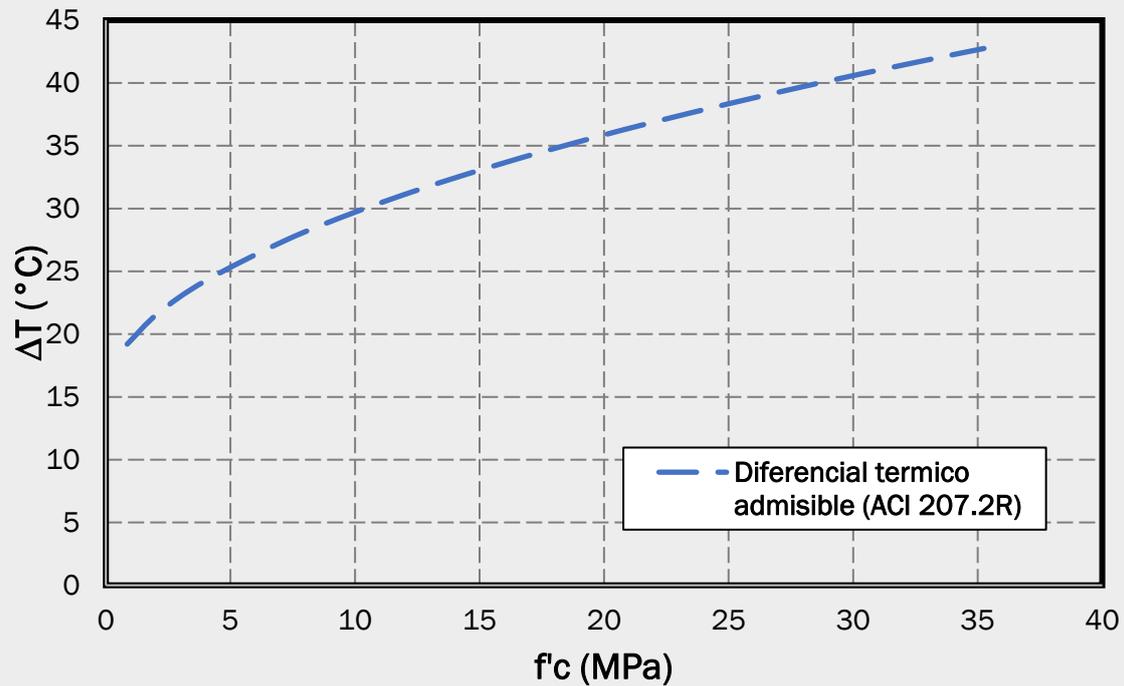


Figura 26: Diferencial térmico admisible vs. Evolución del $f'c$.

Con la gráfica de la Figura 26, 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:

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

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

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE 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 24): 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 0,79.

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

$$\text{Utilizando la Ec. 17: } \Delta T = \frac{f_t}{K_R \cdot K_f \cdot E_c \cdot \alpha} = \frac{2,5}{(0,79) \cdot (0,60) \cdot (20128) \cdot (10,8 \cdot 10^{-6})} = 24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

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 27) y la evolución del diferencial térmico admisible en el tiempo (figura 28).

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

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

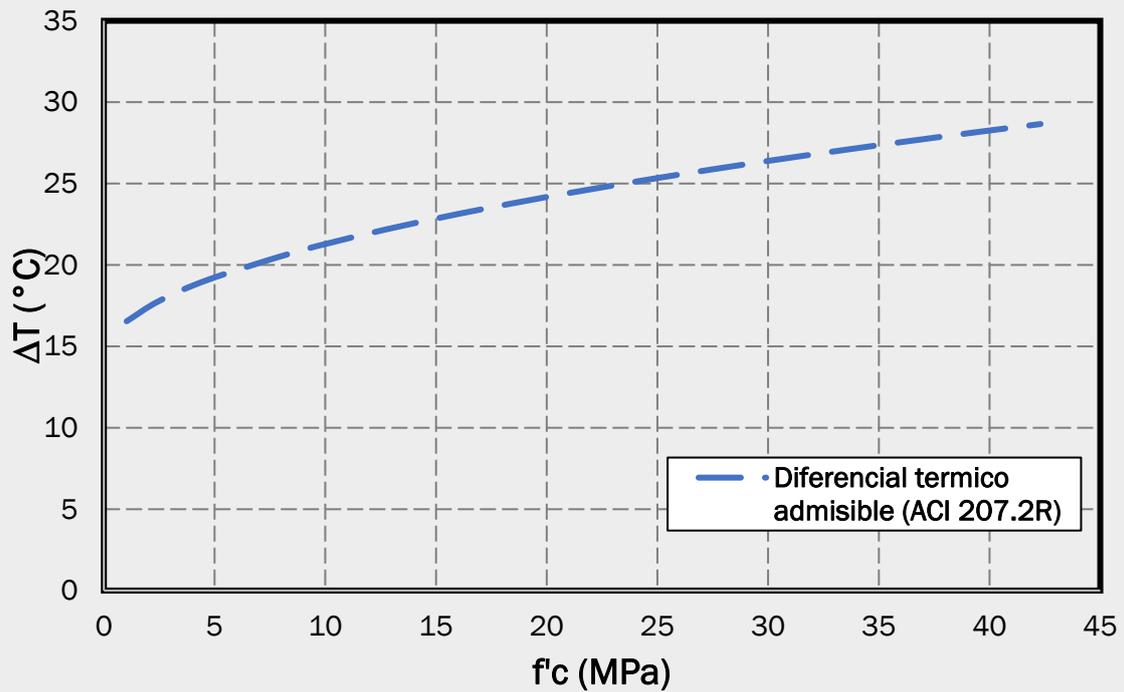


Figura 27: Diferencial térmico admisible vs. Evolución del f'c.

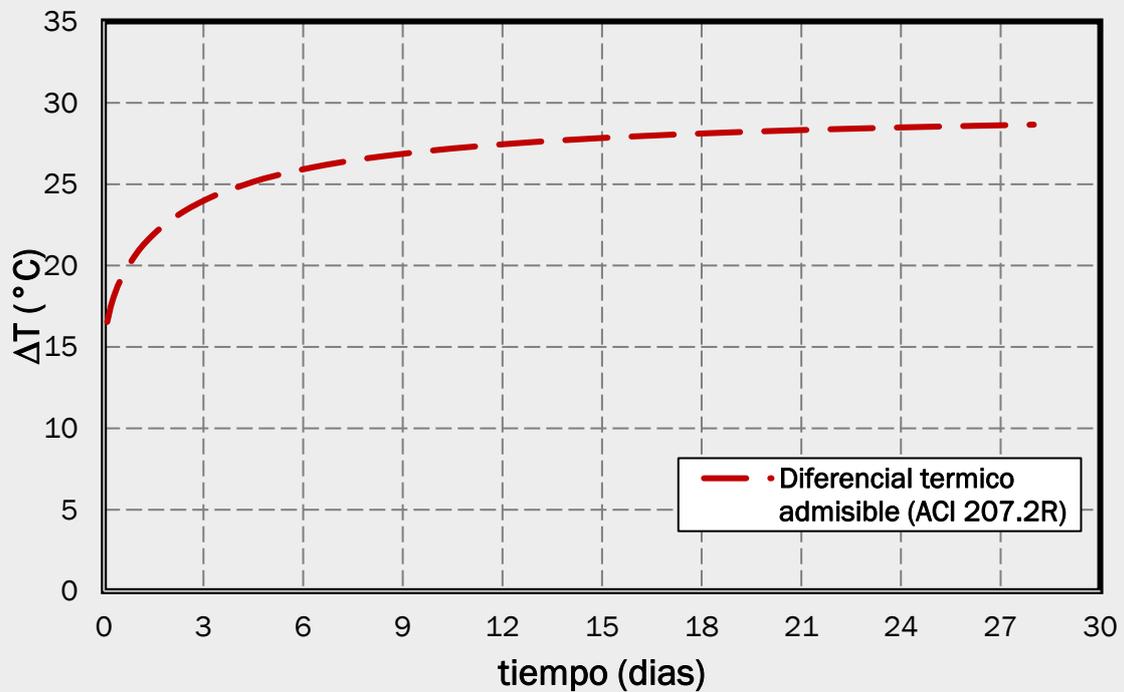


Figura 28: Evolución del Diferencial térmico admisible en el tiempo.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

8.3. Fisuración en elementos masivos

Según el ACI 224R-01 [31], “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 estas, 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 ultimas a compresión; con lo cual se descarta este tipo de fisuración por efectos térmicos (esfuerzos a tracción).

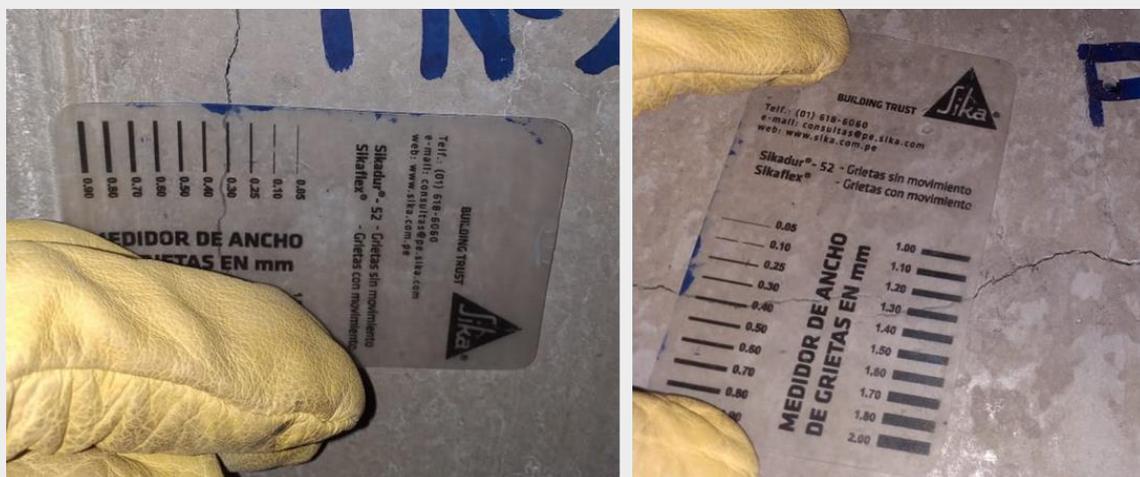


Figura 29: Espesores de fisuras registradas en elementos masivos.

Debido al tamaño de los elementos de concreto masivo, la contracción diferencial provocará 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

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE 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 9:

Tabla 9: 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.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

9. 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] C. 116 ACI, *ACI 116 - Terminología del cemento y el hormigón*. .
- [4] C. 211 ACI, *ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete*. 1991.
- [5] C. 301 ACI, *ACI 301-16 Specifications for Structural Concrete*. 2016.
- [6] LCPC, « Guide technique - Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne. » 2007.
- [7] C. 201 ACI, *ACI 201.2R-16 Guide to Durable Concrete*. 2016.
- [8] 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.
- [9] C. 207 ACI, *ACI 207.3R-94 Practices for Evaluation of Concrete in Existing Massive Structures for Service Conditions*. 1994.
- [10] C. 207 ACI et al., *ACI 207.4R-93 Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete*. 1993.
- [11] C. 207 ACI, *ACI 207.5R-99 Roller-Compacted Mass Concrete*. 1999.
- [12] ICH, *Especificación para hormigón masivo estructural*. Santiago, Chile, 2019.
- [13] CIM béton, *Guide de Prescription des ciments pour constructions durables - Cas des bétons coulés en place*. France.
- [14] Eurocode 2, *Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 3 : Liquid retaining and containment structures*. 2006.
- [15] INSTITUT FRANCAIS DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS, DE L'AMENAGEMENT ET DES RESEAUX (IFSTTAR), « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne ». oct. 2017.
- [16] J. Gajda et E. Alsamsam, « Engineering Mass Concrete Structures », EEUU, p. 8, nov. 2006.
- [17] P. K. Mehta et P. J. M. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [18] C. P. Bobko, R. Seracino, P. Zia, et A. Edwards, « Crack Free Mass Concrete Footings on Bridges in Coastal Environments », p. 234, 2014.
- [19] K. J. Folliard, « Prediction Model for Concrete Behavior: Final Report », p. 77, mai 2008.
- [20] L. Divet et A. Pavoine, « DELAYED ETTRINGITE FORMATION IN MASSIVE CONCRETE STRUCTURES : AN ACCOUNT OF SOME STUDIES OF DEGRADED BRIDGES », p. 29, 2002.
- [21] C. Carde, « Pathologie L'ettringite ». Laboratoire Matière, Abril 2007, [En ligne]. Disponible sur: www.betons-lemagazine.fr.
- [22] C. 224 ACI, « ACI 224.3R-95 Joints in Concrete Construction », in *Concrete Construction Engineering Handbook*, E. Nawy, Éd. CRC Press, 2008.
- [23] C. 304 ACI, *ACI 304R-00 Guide For Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete*, vol. 82. 2000.
- [24] PCA, *Diseño y control de mezclas de concreto*, Primera edición. EEUU, 2004.
- [25] J. Gajda, « Construction of Mass Concrete Transportation Infrastructure », présenté à The National Academies of Sciences - Engineering - Medicine, de agosto 2018.
- [26] L. EPFL, « Chaleur d'hydratation et fissurabilité ». .
- [27] 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.
- [28] 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.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

- [29] 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.
- [30] A. Al-Ostaz, « EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON THE COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION OF CONCRETE », p. 76, sept. 2007.
- [31] C. 224 ACI, *ACI 224R-01 Control of Cracking in Concrete Structures*. EEUU, 2001.

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

MANUAL DE RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la construcción – SENCICO

Av. De la Poesía 351

Lima 41, Perú

Teléfono: (511) 2116300

www.sencico.gob.pe

GERENCIA DE INVESTIGACION Y NORMALIZACION

Documento elaborado por:

Dr. Pablo Jhoel Peña Torres

Primera Edición: Diciembre 2020

Lima, Perú

2020