

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**ESTUDIO TERMODINÁMICO TEÓRICO - PRÁCTICO SOBRE EL
COMPORTAMIENTO DE VACIADOS DE CONCRETO MASIVO A
MÁS DE 4 700 m.s.n.m EN LA SIERRA DEL PERÚ**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

MARCO ANDRES ZEÑA VELA

ASESOR: Ing. Enrique Pasquel Carbajal

Lima, diciembre de 2015

RESUMEN

Cuando se trata de concreto masivo la principal diferencia que se presenta frente a un concreto distinto, es su comportamiento térmico. Esto se debe a que, la baja conductibilidad térmica del concreto no permite que el calor generado en su interior se disipe rápidamente, causando diferenciales altos de temperatura entre la cara expuesta del elemento y el interior.

En el presente trabajo de tesis se expone las principales características del concreto masivo, indicando cuáles son los parámetros que tienen mayor redundancia en el diseño de la mezcla. Además, se mencionan cuáles son las normativas vigentes que rigen sobre estos tipos de elementos.

A su vez, se presentan los diferentes métodos que se utilizan para calcular el incremento de temperatura que existe en el interior debido al calor de hidratación del cemento. Dentro de estos métodos se presenta el que expone el ACI 207.2 para concreto masivo sin refuerzo estructural, el cual usaremos como referencia para calcular el incremento de temperatura en los elementos masivos estructurales.

A continuación se presentan dos casos de proyectos ubicados en la sierra del Perú, en los cuales se han colocado termocuplas para poder extraer información del incremento de temperatura que se genera en el interior y en la cara externa del elemento durante los primeros días luego del vaciado.

Finalmente, se realiza el análisis de resultados para conocer la validez que tiene el método teórico del ACI 207.2 frente a resultados reales de proyectos expuestos en condiciones similares. Con esta información se plantearán recomendaciones acerca del método de predicción de temperatura y comentarios para las etapas de fabricación y vaciado.

INDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| OBJETIVOS | 4 |
| 1. MARCO TEÓRICO..... | 5 |
| 1.1. Concreto Masivo | 5 |
| 1.1.1. Definición..... | 5 |
| 1.1.2. Características del diseño de mezcla | 6 |
| 1.1.3. Fisuración generada por cambios volumétricos | 11 |
| 1.1.4. Normas existentes | 13 |
| 1.2. Calor de Hidratación del Cemento Portland | 14 |
| 1.2.1. Mecanismo de generación..... | 15 |
| 1.2.2. Factores que influyen | 16 |
| 1.2.3. Formas de medición | 19 |
| 1.3. Incremento de Temperatura en el Concreto | 20 |
| 1.3.1. Temperatura máxima en el concreto | 20 |
| 1.3.2. Formas de controlar altas temperaturas | 22 |
| 1.3.3. Métodos de Predicción de temperatura | 26 |
| 1.4. Comportamiento en Climas de la Sierra..... | 29 |
| 1.4.1. Desarrollo de Resistencia a Bajas Temperaturas | 30 |
| 1.4.2. Influencia en el Curado..... | 31 |
| 1.4.3. Fraguado | 32 |
| 1.4.4. Diseño de mezcla | 33 |
| 1.4.5. Protección contra las bajas temperaturas | 34 |
| 1.4.6. Protección contra las temperaturas templadas | 36 |
| 2. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL VACIADO MASIVO | 38 |
| 2.1. Caso 01 - Condiciones frías | 38 |
| 2.1.1. Información del lugar | 38 |
| 2.1.2. Información del elemento estructural | 39 |
| 2.1.3. Recursos | 40 |
| 2.1.4. Proceso Constructivo del Elemento Estructural | 40 |
| 2.1.5. Parámetros que definen las celdas de vaciado..... | 45 |
| 2.2. Caso 02 - Condiciones templadas..... | 46 |
| 2.2.1. Información del lugar | 46 |
| 2.2.2. Información del Elemento Estructural | 47 |
| 2.2.3. Recursos | 48 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.2.4. | Proceso Constructivo del Elemento Estructural | 48 |
| 3. | ANÁLISIS TÉRMICO DEL ELEMENTO ESTRUCTURAL | 52 |
| 3.1. | Introducción | 52 |
| 3.2. | Información para el análisis | 52 |
| 3.2.1. | Propiedades Térmicas del Concreto | 52 |
| 3.2.2. | Propiedades Elásticas del Concreto | 53 |
| 3.3. | Análisis a realizar | 55 |
| 3.3.1. | Modelo térmico propuesto por el ACI 207.2R | 55 |
| 4. | RESULTADOS EXPERIMENTALES | 70 |
| 4.1. | Resultados obtenidos | 70 |
| 4.1.1. | Caso 01 – Condiciones frías | 70 |
| 4.1.2. | Caso 02 – Condiciones templadas | 72 |
| 4.2. | Análisis de resultados | 73 |
| 4.2.1. | Caso 01 – Condiciones frías | 73 |
| 4.2.2. | Caso 02 – Condiciones templadas | 75 |
| 5. | CONCLUSIONES | 78 |
| 5.1. | Método de predicción de temperatura ACI 207.2 | 78 |
| 5.2. | Etapa de Fabricación | 80 |
| 5.3. | Etapa de Vaciado | 80 |
| 6. | BIBLIOGRAFIA | 82 |

INTRODUCCIÓN

En el Perú existe una diversa y compleja geografía debido a su ubicación en la Cordillera de los Andes. Se ha definido unas ocho regiones naturales, teniendo en cuenta una clasificación hecha en base a sus pisos altitudinales, la flora y fauna que cada una alberga. A partir de esto se puede apreciar que existe toda una gama de climas y condiciones ambientales para cada pueblo o ciudad.

Es decir, existen distintos escenarios para la ejecución de las obras de todo el país, por ejemplo, en las zonas de la Sierra, se debe fabricar un concreto que resista a los ciclos de hielo y deshielo, así como, a las variaciones de temperatura durante el día y la noche; o a lo largo de la Costa donde existen edificaciones muy cercanas al mar por lo que el concreto debe ser más impermeable y durable contra la corrosión de las armaduras; o en la Selva, donde el empleo de agregados marginales es un reto para el desarrollo de soluciones técnicas regionales

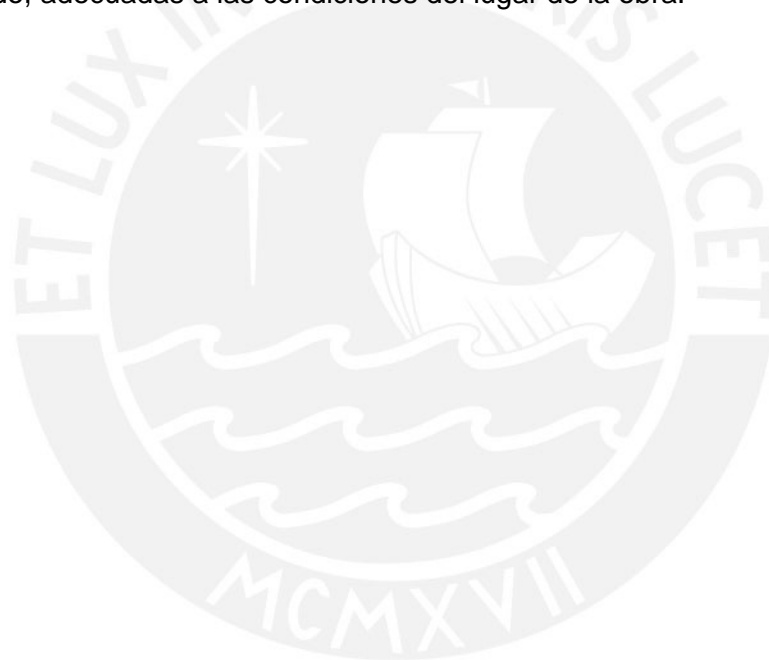
Actualmente, en nuestra Sierra, se presentan continuamente numerosos proyectos de gran infraestructura, en donde es probable que se coloquen grandes volúmenes de concreto. Cuando no se realiza una protección adecuada al elemento, se genera un elevado gradiente térmico entre el interior del concreto y la superficie expuesta. A su vez, debido a las restricciones externas durante el periodo de enfriamiento, se puede generar el agrietamiento de la masa total por lo que es necesario reducir al mínimo la diferencia entre la temperatura máxima del concreto y la del ambiente o bien reducir al mínimo la restricción.

A los grandes volúmenes, se les llama concretos masivos y para realizar su ejecución se debe desarrollar un plan constructivo, que permita que el calor interno se libere, y que la temperatura descienda de poco en poco para que no alcance valores altos, transcurridas las primeras horas luego del vaciado. Esto se realiza con el fin de evitar que se produzca un agrietamiento térmico que comprometa a la estructura.

OBJETIVOS

El presente trabajo de tesis tiene como objetivos:

- Realizar una investigación acerca de los efectos que producen los gradientes térmicos en el concreto masivo estructural, a través de un modelo teórico propuesto por el ACI.
- Analizar la validez de este modelo teórico realizando una comparación con resultados reales de temperatura medidas con termocuplas que se colocaron en dos obras en diferentes climas de la sierra
- A partir de los resultados, proponer consideraciones y sugerencias para la fabricación, el procedimiento constructivo y la protección del elemento pos-vaciado, adecuadas a las condiciones del lugar de la obra.



1. MARCO TEÓRICO

1.1. Concreto Masivo

1.1.1. Definición

Existen distintas definiciones sobre el concepto de concreto masivo. Uno de ellos es el brindado por el ACI 207.1R, el cual indica que concreto masivo es cualquier volumen de concreto con dimensiones lo suficientemente grandes para requerir que se tomen medidas preventivas para contrarrestar la generación de calor debido a la hidratación de cemento causando cambios volumétricos, que ocasionen fisuras o grietas.

Otras normas mencionan que cuando la dimensión mínima transversal de un elemento excede los 0.90 m o cuando el contenido de cemento supera los 350 kg/m³ de concreto, se puede generar problemas por concreto masivo (Gajda, 2002). Por otro lado, una definición práctica en obra, es que se debe considerar concreto masivo a cualquier elemento que exceda su tiempo de vaciado a una jornada de trabajo, lo que signifique una programación especial para su ejecución.

El concreto masivo no incluye solamente el concreto con bajos contenidos de cemento, usado en presas y otras estructuras masivas, sino también concretos con contenidos moderado y elevado de cemento en miembros estructurales de puentes, edificios, plantas de proceso minero, entre otros.

La característica más importante que distingue al concreto masivo es su comportamiento térmico, ya que, sus grandes dimensiones impiden que la temperatura, generada por el calor de hidratación del cemento, no se disipe rápidamente. Esto puede generar deformaciones que resulten en esfuerzos de tracción debido a cambios volumétricos restringidos generando grietas que comprometen la durabilidad del elemento. En consecuencia, es necesario tomar medidas preventivas para evitar el agrietamiento por comportamiento térmico que pueda causar la pérdida de la integridad estructural, del comportamiento monolítico, excesivas infiltraciones y el acortamiento de la vida de uso de la estructura.

Por otro lado, un vaciado de concreto masivo en la Sierra del Perú debe protegerse frente a las bajas temperaturas durante algunas horas del día, de lo contrario, se generarán gradientes drásticos de temperatura entre el interior y la superficie expuesta, ocasionando grietas o congelando el agua que existe en el interior del elemento.

1.1.2. Características del diseño de mezcla

En una mezcla de concreto masivo se debe tener una adecuada consideración con la elección y proporción de materiales a usar para poder lograr los requerimientos estructurales solicitados y a su vez, evitar una generación alta de calor.

1.1.2.1. Cemento

El cemento es el principal responsable del aumento de temperatura en una mezcla de concreto, por lo que es necesaria una buena elección del tipo de cemento que va a ser utilizado. Los siguientes tipos de cementos son los recomendados por el ACI para mezclas de concreto masivo:

- Cementos Portland: Tipo I (junto con otras medidas de control de temperatura), II, IV y V
- Cementos “mezclados o adicionados”: Tipo P, IP, S, IS, I(PM) y I(SM)

En la actualidad, los siguientes cementos son los más comercializados en nuestro país:

- Tipo I: De uso general, donde no se requieren propiedades especiales para la construcción. Sin embargo, su uso sin adiciones no es recomendado para vaciados masivos por su alta generación de calor de hidratación.
- Tipo V: Posee una alta resistencia a los sulfatos. Su uso es recomendado para concretos sujetos a ambientes muy agresivos. Además, posee un bajo calor de hidratación.
- Tipo IP: Es un cemento al que se le ha añadido puzolana en un porcentaje que oscila entre el 15% y el 40% del peso total.
- Tipo I (PM): Cemento al que se le ha añadido puzolana en un porcentaje hasta del 15% del peso total.

En la Figura 1.1, se puede apreciar el desarrollo del calor de hidratación de los cementos básicos. En ella se puede observar que el cemento Tipo I es uno de los cementos con más alta generación de calor de hidratación y es por eso que su uso no es recomendado para concretos masivos. Por otro lado, se puede observar que el cemento Tipo V puede ser utilizado para estas ocasiones gracias a su bajo calor de hidratación.

Para el concreto masivo estructural es importante escoger un tipo de cemento que permita alcanzar la resistencia a la compresión a la que será requerido el elemento, ya

que la composición y la finura del cemento influyen fuertemente en esta característica, tal como lo podemos apreciar en la Figura 1.2.

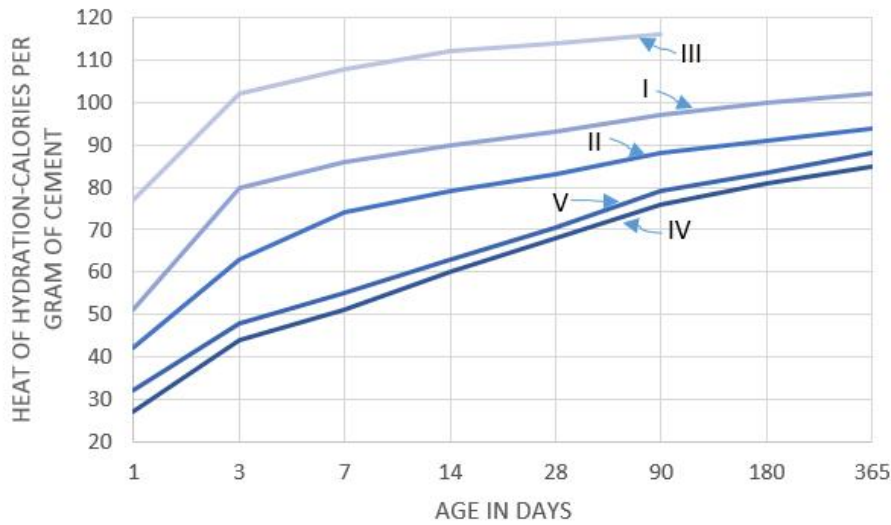


Figura 1.1: Calor de hidratación de diferentes tipos de cemento
Fuente: U.S. Bureau of Reclamation, 1981

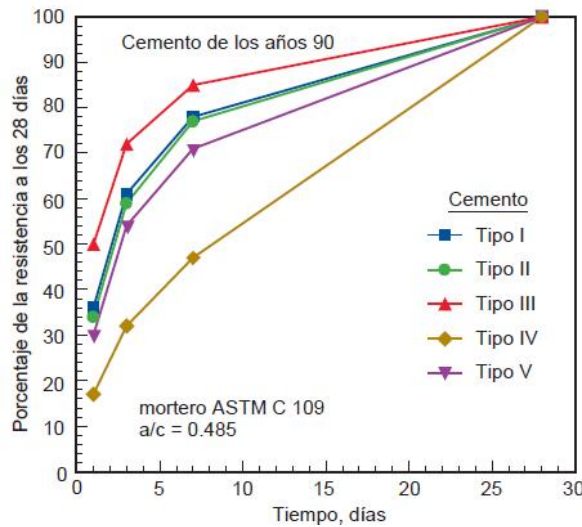


Figura 1.2: Porcentajes de la resistencia de concreto para diferentes tipos de cemento
Fuente: PCA, 2004

1.1.2.2. Puzolanas

Las puzolanas son materiales inertes silíceos y/o aluminosos, que individualmente tienen propiedades aglomerantes casi nulas, pero que finalmente molidas y al reaccionar químicamente con hidróxidos de calcio y agua adquieren propiedades cementantes.

Esta adición fue usada por primera vez en Estados Unidos, en proyectos con grandes elementos, tales como presas, donde fueron utilizadas para controlar el aumento de la temperatura en concreto masivo y actuar como material cementante.

Cuando se adicionan puzolanas naturales al cemento, tienen la particularidad de cambiar algunas de sus propiedades como son el retrasar y/o disminuir el desarrollo de la resistencia en el tiempo, reducir la permeabilidad, mejorar la capacidad para retener agua, aumentar la cohesividad, mejorar el comportamiento frente a la agresividad química y reducir el calor de hidratación liberado en las estructuras de concreto. Algunas puzolanas liberan solo el 40% del calor de hidratación que libera el cemento Portland Tipo I, es por esta razón que su uso es muy beneficioso para las estructuras masivas (PCA, 2004).

Sin embargo, cabe mencionar que las propiedades pueden variar según el tipo de puzolana que se use. Algunas pueden incluso generar problemas dentro del concreto como incrementar la retracción por secado, reducir la durabilidad y un bajo desarrollo de la resistencia a edades tempranas. Por lo que, antes de usar puzolanas se debería ensayar la mezcla que será usada en el proyecto junto con los agregados a usar para verificar la calidad del concreto.

1.1.2.3. Aditivos químicos

Son aquellos ingredientes orgánicos o inorgánicos del concreto que se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado y que modifican de forma directa alguna de las características del concreto como el proceso de hidratación, el endurecimiento e incluso la estructura interna del concreto. El correcto uso de los aditivos, permite optimizar las mezclas de concreto y los procesos constructivos.

Las principales razones del empleo de los aditivos son:

- Reducir el costo de la construcción en concreto.
- Obtener algunas propiedades en el concreto de manera más efectiva que por otros medios.
- Asegurar la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colocación y curado en condiciones ambientales adversas.
- Superar ciertas eventualidades durante las operaciones de colado.

Los aditivos pueden clasificarse según las funciones para los que son utilizados. En el concreto masivo es importante usar aditivos reductores que cumplan la función de reducción de agua; así como, los aditivos que cumplan una función de retardadores de fragua y de control de hidratación. Los aditivos aceleradores no son usados en el concreto masivo estructural porque contribuye con el desarrollo del calor de hidratación. Además, hay que tener en cuenta que en climas fríos donde se producen ciclos de hielo y deshielo, es recomendable usar aditivos incorporadores de aire.

Los aditivos incorporadores de aire son materiales que producen pequeñas burbujas de aire durante el mezclado. En climas fríos, es necesario el uso de este aditivo ya que los concretos sin aire incluido pueden sufrir pérdida de resistencia y daños internos y de superficie, como resultado de los ciclos de hielo y deshielo. El agua al penetrar al concreto por absorción y congelarse en los poros capilares de la pasta pasa a ser hielo, aumentando de volumen en un 9% y generando presiones hidráulicas y osmótica lo que conlleva a un agrietamiento (Rivva, 2007). Los vacíos de aire incluido actúan como cámaras huecas en la pasta, donde el agua congelada y el agua emigrante pueden entrar, aliviando la presión y previniendo los daños al concreto. Además, la mayoría de especificaciones para concretos masivos, solicitan una cantidad de aire incorporado alrededor del 5% incluso llegando hasta 8% por lo que el aditivo es la única opción para lograr estos requerimientos (ACI 207.1, 2005).

Los aditivos reductores de agua son compuestos orgánicos e inorgánicos que permiten emplear menos agua de la que se usaría en condiciones normales en el concreto, produciendo mejores características de trabajabilidad y también de resistencia al reducirse la relación agua/cementante. Usualmente reducen el contenido de agua por lo menos en un 5% a 10%. La ventaja de este aditivo es que permite producir la misma resistencia del concreto usando una cantidad menor de cemento en la mezcla, favoreciendo al concreto masivo estructural por lo que el calor de hidratación también será menor.

1.1.2.4. Agregados

Los agregados del concreto son los materiales inertes que ocupan alrededor de las $\frac{3}{4}$ partes del volumen total de la mezcla, por lo que su selección es muy influyente en el producto final. El término agregado comprende las gravas naturales, piedra triturada y arenas, los cuales deben estar correctamente distribuidos en todo el volumen, ya que, debe existir un ensamble casi total entre las partículas, de manera que las más

pequeñas ocupen los espacios entre las mayores y el conjunto este unido por la pasta de cemento.

Se ha establecido convencionalmente la clasificación entre agregado grueso (piedra) y agregado fino (arena) en función de las partículas mayores y las menores de 4.75 mm (Malla Standard ASTM #4).

El agregado fino influye directamente en la trabajabilidad del concreto, por lo que es importante respetar la proporción establecida en la gradación para evitar variaciones drásticas de esta propiedad. Además, un cambio en la granulometría de la arena tiene poco efecto sobre la resistencia a la compresión cuando se mantiene constante la relación agua/material cementante y el revenimiento. En la Tabla 1.1 se puede apreciar unos rangos establecidos por el ACI 207.1R para una buena gradación de la arena en concreto masivo.

El Tamaño Máximo de un agregado es el menor tamiz por el que pasa todo el agregado tamizado, a diferencia del Tamaño Máximo Nominal, que es el correspondiente al menor tamiz que produce el primer retenido. El tamaño máximo del agregado también afecta a la trabajabilidad, pero además, influye en la economía y el control de calor en el concreto. Cuando se usa agregados de tamaño pequeño se requiere de mayor cantidad de agua y cemento, por lo que para volúmenes grandes se recomienda usar agregados de mayor tamaño, tal como lo indica la Tabla 1.2. Esta teoría se basa en que cuando se usa agregados de mayor tamaño, los espacios entre las partículas disminuyen por lo que se necesitará menor cantidad de pasta de cemento.

| Malla Standard | Porcentaje retenido individual por peso |
|--------------------|---|
| 9.5 mm | 0 |
| #4 (4.75 mm) | 0-5 |
| #8 (2.36 mm) | 5-15 |
| #16 (1.18 mm) | 10-25 |
| #30 (600 μ m) | 10-30 |
| #50 (300 μ m) | 15-35 |
| #100 (150 μ m) | 12-20 |
| Bandeja | 3-7 |

Tabla 1.1: Granulometría del agregado fino para concreto masivo
Fuente: ACI 207.1, 2005

| Tamaño máximo nominal, mm | Características |
|---------------------------|--|
| 40 | Secciones de más de 19 cm de ancho, en las que la distancia entre varillas de refuerzo es por lo menos 6 cm. |
| 75 | Secciones no reforzadas de más de 30 cm de ancho y secciones reforzadas de más de 46 cm. |
| 150 | Secciones masivas en las que la distancia entre varillas de refuerzo es de por lo menos 25 cm. |

Tabla 1.2: Tamaño máximo nominal de agregado recomendado para concreto masivo
Fuente: ACI 207.1, 2005

1.1.3. Fisuración generada por cambios volumétricos

Los cambios de temperatura generan cambios de volumen del elemento, que son de importancia considerable ya que en la práctica estos cambios se encuentran restringidos por el encofrado o por distintas partes del propio elemento, provocando esfuerzos. Estas restricciones inducen esfuerzos de compresión y de tracción, no obstante, los esfuerzos a tracción son los más peligrosos, ya que el concreto es un material que posee poca resistencia a la tracción por lo que es más propenso a la formación de grietas. Existen dos formas de restricciones: externas e internas (Soo Geun, 2010).

La primera se origina cuando el movimiento de una sección en el elemento se restringe mediante miembros adyacentes, ya sean rígidos o parcialmente rígidos, como el encofrado o por la cimentación como se muestra en la Figura 1.3. Estos movimientos pueden ser producidos luego de que el concreto alcanzó su temperatura máxima y entró a una fase de enfriamiento hasta llegar a la temperatura ambiental. Este mecanismo resulta en la generación de grietas profundas. Este tipo de restricción desarrolla esfuerzos de compresión a edad temprana y después, de tracción.

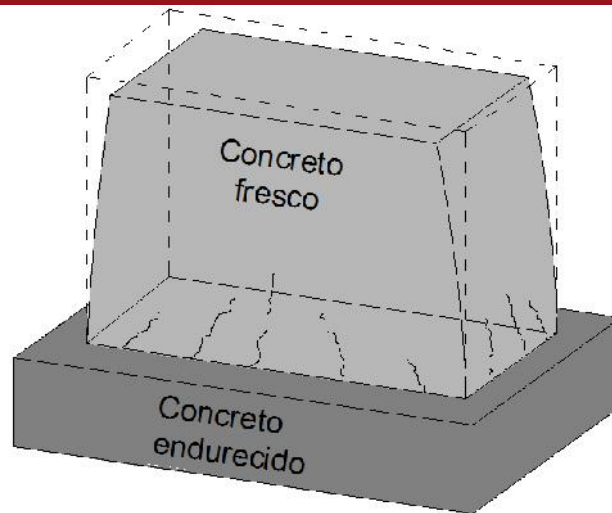


Figura 1.3: Grietas formadas por las restricciones externas
Fuente: Imagen propia

La restricción interna se produce cuando existen gradientes de temperatura y el volumen interno se expande, pero estas deformaciones son pequeñas en la superficie. Estas diferencias de temperatura entre el núcleo del concreto y la superficie, induce a que se generen esfuerzos térmicos. Comúnmente las grietas generadas por este tipo de restricción son de poca profundidad.

En los elementos de concreto masivo que se encuentran expuestos a bajas temperaturas, se producen altos gradientes de temperatura, debido a que por sus grandes dimensiones se disipa lentamente la temperatura interior generada por el calor de hidratación del cemento y en la superficie existe una temperatura inferior. Esta diferencia de temperatura provoca que el interior del concreto, que está más caliente y dilatado, se oponga a la contracción de la parte exterior más fría. Como el concreto aún está en edad temprana, no se ha desarrollado por completo su resistencia a la tracción, por lo que si los esfuerzos generados superan a esta resistencia, es muy probable que la estructura se fisure.

La resistencia a tracción del concreto f_t es una magnitud muy variable, su valor varía entre el 8% y el 15% de la resistencia en compresión f_c (Ottazzi, 2004). Por lo que, para concretos convencionales del orden de 210 kg/cm² de resistencia de compresión, su resistencia a la tracción será alrededor de 20 kg/cm².

Una de las propiedades que condiciona la capacidad de deformación del concreto por temperatura es su coeficiente de expansión térmica, cuyo valor fluctúa entre 7 a 11 x 10⁻⁶ / °C. Si se aplica los principios de termodinámica, se puede inferir que por cada °C

de gradiente térmico se induce un esfuerzo en el concreto del orden de 2 kg/cm^2 (Pasquel, 2006). Por lo tanto, para concretos convencionales, un gradiente térmico de alrededor de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ puede ocasionar el agrietamiento del elemento.

El diferencial tolerable entre la temperatura máxima y la temperatura más crítica del ambiente debe limitarse a aproximadamente a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ para concretos de agregados convencionales. Así mismo, es importante conocer que la temperatura máxima del concreto no debe de superar el límite de $70 \text{ }^\circ\text{C}$, ya que el curado del concreto por encima de este límite puede conducir a la expansión y fisuración asociadas con la formación retardada de etringita o expansión retardada por calor inducido, que se refiere a una condición rara de ataque de sulfatos internos a través de la cual el concreto maduro se expande y se fisura (Mehta, 2006).

1.1.4. Normas existentes

En el Perú, cuando es necesario recurrir a información tecnológica para realizar un correcto procedimiento constructivo de una estructura incluyendo todas las actividades que ella conlleva, se toma como referencia los Reportes y Códigos del American Concrete Institute (ACI), que están desarrollados fundamentalmente para la realidad en USA, pero que en muchos aspectos tienen aplicaciones y prácticas comunes a nivel mundial, razón por la cual es bien aceptada en distintos países.

Se toman como referencia los siguientes Códigos para conocer cuáles son los requerimientos mínimos para los vaciados de concreto masivo:

- ACI 207.1 “Guide to Mass Concrete”.
- ACI 207.2 “Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete”.
- ACI 207. 3 “Practices for Evaluation of Concrete in Existing Massive Structures for Service Conditions”.
- ACI 207.4 “Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete”.

Es importante reconocer que gran parte de la información en la que se basan estas Normas del ACI, provienen del “Concrete Manual” de la agencia federal norteamericana U.S. Bureau of Reclamation.

A su vez, en países como Japón o Korea, se ha desarrollado documentos especializados en lo referente al concreto masivo, tales como el "Guidelines for Control of Cracking of Mass Concrete" del Japan Concrete Institute; o dentro del "Standard Specification for Concrete" del Korean Concrete Institute. También, el Portland Cement Association (PCA) posee un manual, donde abarca sobre este tema, el cual es el "Engineering Mass Concrete Structures".

Actualmente, en nuestro país no existe referencia alguna sobre el concreto masivo en la Norma de Concreto Armado, por lo que se debe aspirar a desarrollar una sección acerca de los concretos masivos, ya que en los últimos años, se presentan continuamente numerosos proyectos de construcción, en los que se necesita realizar vaciados de grandes volúmenes.

Cabe recalcar que se debe tener especial consideración con las Obras Civiles que se encuentran ubicadas en nuestra Sierra, ya que se debe incluir las condiciones de servicio (gran altitud, zona andina) y las prácticas locales. Además, en la Sierra del país, se presenta un clima híbrido distinto a la definición que describe el Código ACI 306.1 "Cold Weather" como clima frío: "Periodo en el cual existen las siguientes condiciones por más de 3 días:

- 1) La temperatura ambiente promedio diaria es menor de 5°C y,
- 2) La temperatura ambiente promedio no supera 10°C en más de la mitad de un ciclo de 24 horas".

Debido a esto, la Norma Peruana de Concreto Armado considera como clima frío a aquel en que, en cualquier momento del vaciado, la temperatura pueda estar por debajo de 5°C .

1.2. Calor de Hidratación del Cemento Portland

Cuando el cemento es mezclado con agua, inmediatamente se producen reacciones exotérmicas entre ellos. El calor generado por esta reacción es conocido como calor de hidratación y es la razón del incremento de temperatura de los materiales en la mezcla de concreto. Es importante controlar este fenómeno debido a que si no se disipa este calor rápidamente, puede ocurrir un importante incremento de la temperatura en el concreto ocasionando cambios de volumen, no obstante en ocasiones es beneficioso para climas fríos, ya que ayuda a mantener temperaturas de curado favorables.

1.2.1. Mecanismo de generación

En gran porcentaje, el cemento está compuesto por cuatro componentes principales que son Silicato tricálcico (C_3S), Silicato dicálcico (C_2S), Aluminato tricálcico (C_3A) y Ferroluminato tetracálcico (C_4AF).

El Silicato tricálcico, se hidrata y se endurece rápidamente, por lo que es responsable en gran parte del inicio del fraguado y la resistencia temprana. En general, la resistencia temprana del concreto de cemento portland es mayor, cuando el porcentaje de C_3S aumenta. El Silicato dicálcico, se hidrata y se endurece lentamente, por lo que contribuye grandemente al aumento de resistencia en edades más allá de una semana. El Aluminato tricálcico libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento, también contribuye un poco al desarrollo de resistencias tempranas. Por último, el Ferroaluminato tetracálcico, a diferencia de los otros tres componentes, no influye significativamente en su comportamiento (PCA, 2004).

En presencia de agua, los silicatos y aluminatos que componen el cemento Portland forman productos de hidratación o hidratos, que resultan en una masa firme y dura. El calor de hidratación es el calor que se genera por la reacción exotérmica entre el cemento y el agua. La cantidad de calor generado, depende de la composición química del cemento, siendo el C_3A y el C_3S los compuestos más importantes para la evolución del calor (Rivva, 2007).

Es importante conocer que los cementos no generan calor a una tasa constante en el tiempo. En los cementos tipo Portland convencionales, aproximadamente la mitad de calor total se libera entre uno y tres días, alrededor de tres cuartas partes en siete días y el 90% en seis meses. (Neville, 1998). En la Figura 1.4, podemos observar una curva que nos indica de manera aproximada la evolución del calor de hidratación en el tiempo.

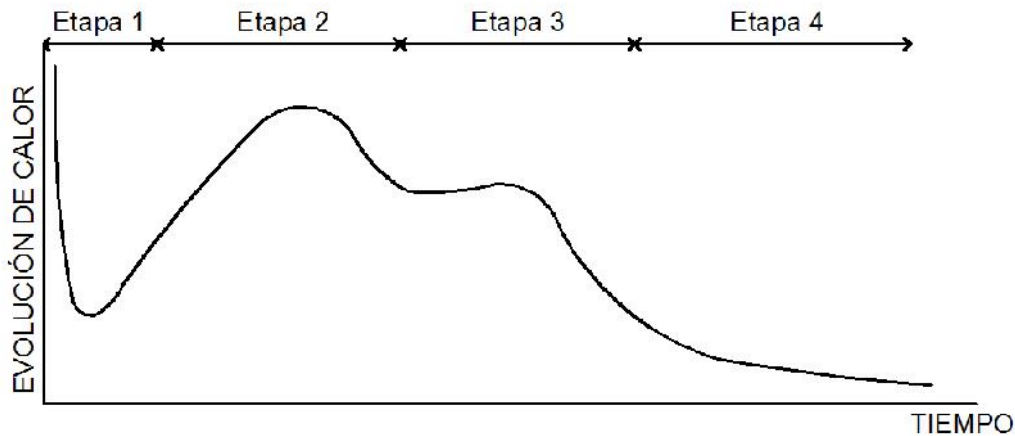


Figura 1.4: Evolución del calor como función del tiempo para la pasta de cemento.
Fuente: PCA, 2004

En la primera etapa, se da el primer pico debido al componente químico C_3A ; después de unas horas, en la segunda etapa, aparece un nuevo pico debido a la hidratación del C_3S . Pasadas las primeras 12 horas, se inicia un nuevo incremento para así generar un tercer pico en la tercera etapa debido a la reacción renovada del aluminato tricálcico; por último, luego de 90 horas entra en una etapa donde la generación de calor se reduce y se estabiliza (PCA, 2004).

1.2.2. Factores que influyen

La cantidad de calor generado es influenciada por varios factores, entre ellos:

- Tipo de Cemento.
- La cantidad de cemento usado.
- Fineza del cemento
- Temperatura inicial de vaciado

1.2.2.1. Tipo de Cemento

Así como se mencionó en líneas anteriores, la elección del Tipo de cemento influye en la cantidad de calor generado por la hidratación del cemento. Esto debido a que cada Tipo de cemento tiene una composición distinta como podemos apreciar en la Tabla 1.3. A su vez, cada compuesto produce una cantidad distinta de calor y a diferentes edades. El C_3A hidrata en su mayor porcentaje durante el primer día, el C_3S durante la primera semana, y el C_2S después de la primera semana, mientras que el calor liberado por el C_4AF es menor.

| TIPO | C ₃ S % | C ₂ S % | C ₃ A % | C ₄ AF % |
|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| I | 42-65 | 10-30 | 00-17 | 06-18 |
| II | 35-60 | 15-35 | 00-08 | 06-18 |
| III | 45-70 | 10-30 | 00-15 | 06-18 |
| IV | 20-30 | 50-55 | 03-06 | 08-15 |
| V | 40-60 | 15-40 | 00-05 | 10-18 |

Tabla 1.3: Composición de los cementos Portland
Fuente: Rivva, 2008

Por otro lado, la Tabla 1.4 nos muestra la cantidad total liberada de calor en cada uno de los compuestos. Se puede apreciar que los cementos que contengan mayor cantidad de C₃A y C₃S, serán los de mayor calor de hidratación, es decir los menos recomendados a usar en un concreto masivo si es que no se usa con alguna otra adición que reduzca este efecto. Tal y como se mostró en la Figura 1.2, el cemento Tipo V, es uno de los que menos calor de hidratación genera debido a su bajo contenido de Aluminato tricálcico.

| Componente | Calor de hidratación (cal/gr) |
|-------------------|-------------------------------|
| C ₃ A | 207 |
| C ₃ S | 120 |
| C ₄ AF | 100 |
| C ₂ S | 62 |

Tabla 1.4: Cantidad de calor liberado en una hidratación completa.
Fuente: Rivva, 2008

Esta es la razón por la cual es importante controlar los materiales constituyentes del concreto para minimizar el calor de hidratación en el concreto. A su vez, la cantidad de cemento por unidad de volumen, también debe ser controlada para que el calor que se desarrolla se reduzca.

1.2.2.2. Finura del cemento

La finura del cemento afecta más a la rapidez con que se da la hidratación, que a la cantidad de calor liberado, por lo que su efecto se manifiesta principalmente durante las edades tempranas. La mayor finura del cemento (partículas menores) aumenta la velocidad o tasa de hidratación del cemento y, por lo tanto, acelera el desarrollo de la resistencia. La medida de la finura se refleja a la superficie específica y es la suma de la superficie, en centímetros cuadrados, de todas las partículas en 1 gramo de cemento

considerando que las partículas se toman como esferas. Normalmente, la finura es determinada a través de métodos que son el Turbidímetro de Wagner y el Equipo de Permeabilidad al Aire Tipo Blaine.

La cantidad de calor depende de la finura del cemento porque la hidratación empieza en la superficie de las partículas de cemento. Esto representa el material disponible en contacto con el agua, ocasionando la hidratación.

Para las mismas condiciones, un cemento que tenga una fineza de 1 600 cm^2/gr alcanzará un valor del 70% del calor generado total a los 4 días, a diferencia de un cemento con una fineza de 3 000 cm^2/gr , que llega a alcanzar alrededor de un 95% (ACI 207.2R, 2007).

1.2.2.3. Temperatura inicial de vaciado

El efecto de la temperatura de vaciado afecta levemente a la cantidad total de calor generado. En edades tempranas, se puede apreciar mejor su efecto que consiste en que mientras más baja sea la temperatura de vaciado, menor cantidad de calor de hidratación se generará, así como lo podemos apreciar en la Figura 1.5. Además, el calor de hidratación se genera a una mayor velocidad cuando la temperatura del ambiente se incrementa.

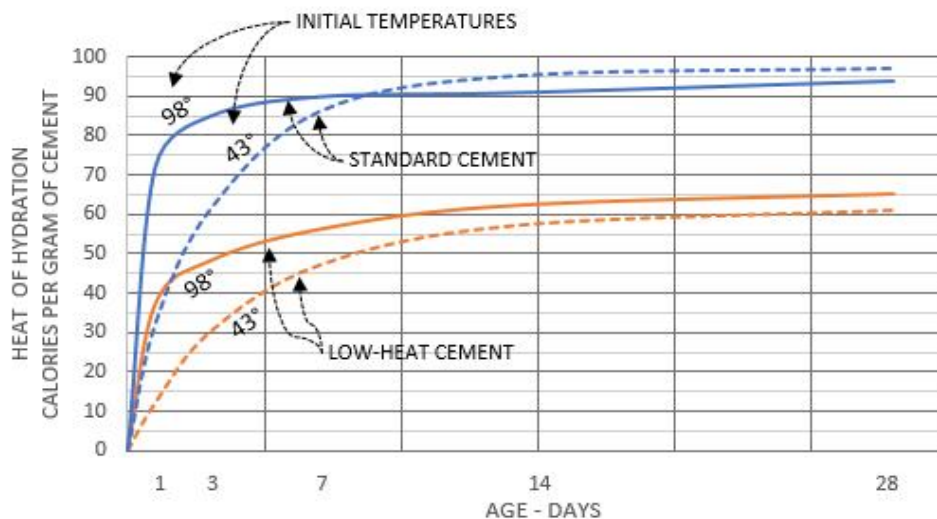


Figura 1.5: Relación entre la temperatura inicial del concreto y el calor de hidratación.
Temperatura en °F.

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation, 1988.

1.2.3. Formas de medición

La hidratación del cemento es producto de varias reacciones exotérmicas, la cual es la principal responsable del fraguado y del comportamiento del concreto endurecido, además del incremento de temperatura. Para estructuras de grandes volúmenes es esencial controlar los diferentes efectos que causan el calor de hidratación, por el problema que se explicó anteriormente.

En nuestro país, la norma NTP 334.064 “Método de ensayo para determinar el calor de hidratación del cemento Portland, Método por disolución” describe la instrumentación y el procedimiento que se necesita para realizar la medición del calor de hidratación del cemento, sin embargo, la falta de disponibilidad en el mercado, así como, el difícil y costoso mantenimiento del equipo genera un problema. Este procedimiento, se basa en la norma norteamericana ASTM C 186 “Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement”.

A lo largo de los años, se han desarrollado otros métodos alternativos para realizar la medición del calor de hidratación del cemento, siendo los test de calorímetro los más usados en la actualidad. Entre ellos existen tres tipos de ensayos: Adiabático, Semi-adiabático e Isotérmico.

1.2.3.1. Calorímetro Adiabático

Este ensayo mide el calor de hidratación de una muestra colocada en un sistema aislado donde no se dan pérdidas de calor. Consiste en registrar la temperatura de la muestra e ir modificando la temperatura de los alrededores para hacerla coincidir. A pesar de que se pierda una pequeña cantidad de calor del sistema, se considera adiabática siempre y cuando la temperatura perdida de la muestra no exceda los $0.02 \text{ }^\circ\text{C/hr}$ (Soo Geun, 2010).

La mayoría de calorímetros usan una combinación de agua, aire y aceite alrededor de la muestra para reducir la pérdida de calor. Mientras más aislado sea el calorímetro, brinda una mejor estimación del incremento de temperatura en el concreto. Además, es importante conocer parámetros como la capacidad calorífica de la muestra para así, obtener el calor de hidratación generado.

En elementos de grandes dimensiones, se puede asumir que el incremento de temperatura que se produce en el centro queda retenido en su interior. Debido a esto,

se considera como un incremento de temperatura adiabático, por lo que es importante conocer cómo actúa este calorímetro y poder aplicarlo para el diseño de la estructura.

1.2.3.2. Calorímetro Semi-adiabático

Este ensayo es similar al anterior con la diferencia de que permite la pérdida de una porción de calor controlada a través de sensores de flujo de calor incorporados en el interior para poder conocer el calor de hidratación. Es más simple y barato de realizar debido a que el aislamiento es más sencillo que el otro ensayo. Si es que se realiza una predicción de incremento de temperatura y del día pico que alcanza la máxima temperatura con este equipo, se debe tener en cuenta que el elemento posee una eficiencia similar en obra, es decir, sección de dimensiones grandes o cierto tipo de encofrado (Livesey, et al., 1991).

1.2.3.3. Calorímetro Isotérmico

Este tipo de calorímetro mide el calor de hidratación generado de muestras donde el espécimen y el ambiente que lo rodea poseen temperaturas muy similares. El calorímetro debe ser controlado evitando que las temperaturas sean desiguales e incluso a veces se requiere mediciones de energía para mantener la temperatura, lo que puede ser considerado como una desventaja.

El equipo ha sido utilizado ampliamente por los laboratorios de soporte técnico de las diferentes empresas constructoras, hace unos años atrás. Sin embargo, una de las desventajas de este equipo es que no puede medir el calor cuando se ensaya cemento con adiciones tales como escorias o cenizas volantes, ya que en la realidad, estos componentes se ven afectados con la temperatura del ambiente.

Para concretos masivos, los métodos de calorímetros adiabáticos y semi-adiabáticos, en teoría, brindan una mejor evaluación de los cementos porque incluyen el efecto de retener el calor en el interior del concreto.

1.3. Incremento de Temperatura en el Concreto

1.3.1. Temperatura máxima en el concreto

Cuando se realiza el vaciado de concreto en estructuras grandes, se inicia el incremento de temperatura debido a la hidratación del cemento. Este incremento se considera como

adiabático en el centro y se va disipando al llegar a las superficies expuestas al ambiente, que posee una menor temperatura.

La temperatura inicial del concreto es un factor muy importante para el desarrollo de la temperatura máxima, de tal forma que si la temperatura inicial es mayor, alcanzará una mayor temperatura final. Por lo tanto, es esencial controlar la temperatura al inicio en elementos de grandes volúmenes.

La temperatura inicial del concreto fresco ' T_i ' puede ser calculada mediante la siguiente fórmula (NRMCA, 1962):

$$T_i = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w}{0.22(W_a + W_c) + W_w}$$

donde:

T_i : temperatura inicial del concreto ($^{\circ}\text{C}$)

T_a : temperatura de los agregados ($^{\circ}\text{C}$)

T_c : temperatura del cemento ($^{\circ}\text{C}$)

T_w : temperatura del agua de la mezcla ($^{\circ}\text{C}$)

W_a : masa de los agregados (kg)

W_c : masa del cemento (kg)

W_w : masa del agua de mezcla (kg)

El valor de 0.22 es la relación aproximada entre el calor específico de los componentes del concreto y el calor específico del agua. En realidad, la temperatura inicial del concreto será un poco mayor que la calculada mediante esta ecuación debido a la energía mecánica del proceso de mezclado del concreto.

Otro factor importante de la temperatura máxima del concreto es la tasa de disipación de calor. Esta propiedad depende de la forma y tamaño del elemento estructural, así como de las condiciones ambientales. En la Figura 1.6, podemos apreciar que a menor temperatura de vaciado, se produce un menor incremento adiabático de temperatura durante los 7 primeros días.

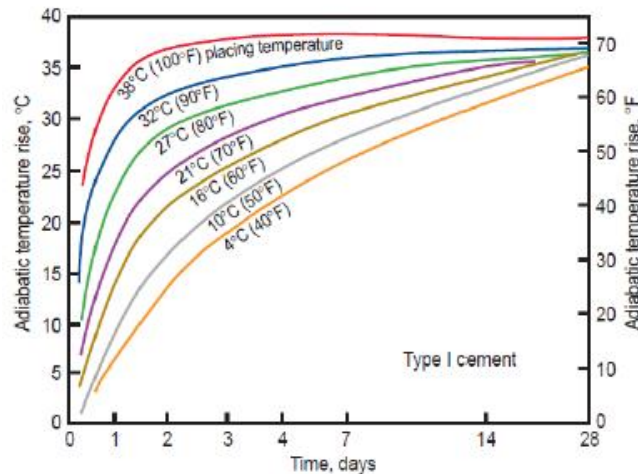


Figura 1.6: Relación entre la temperatura de vaciado y el incremento de temperatura adiabático
Fuente: PCA, 2004

Luego de llegar al pico máximo de temperatura, esta se reduce conforme van pasando los días hasta alcanzar una temperatura similar a la temperatura del ambiente y mantenerse estable, tal cual lo muestra la Figura 1.7. Cabe recalcar que este gradiente de temperatura se obtiene de la sumatoria de la temperatura inicial del concreto fresco, el incremento de temperatura adiabática, y la resta de la temperatura del ambiente y la pérdida de calor. Así mismo, ocurre durante los primeros 6 – 7 días después del vaciado.

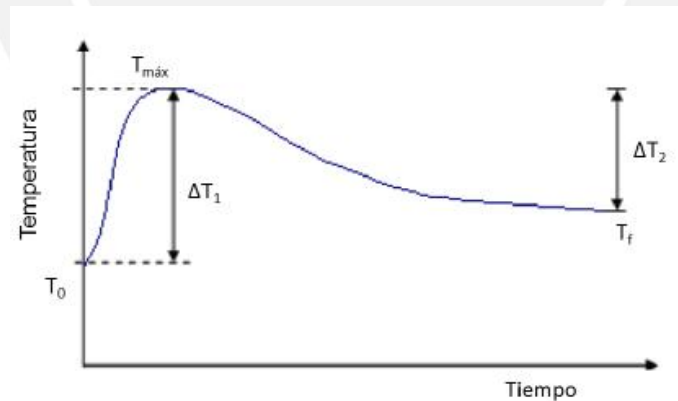


Figura 1.7: Evolución de la temperatura a través del tiempo en una estructura de concreto masivo.
Fuente: Figueroa y Delfín, 2009

1.3.2. Formas de controlar altas temperaturas

Existen diversas maneras de controlar el incremento de la temperatura debido al calor de hidratación y así evitar un shock térmico con las bajas temperaturas del ambiente. Las metodologías más efectivas son las siguientes: controlar el contenido de cemento,

métodos pre-enfriamiento, post-enfriamiento y un buen plan de proceso constructivo (ACI 207.4R, 2005).

1.3.2.1. Controlar el contenido de cemento

Se explicó anteriormente como es que la composición química y la cantidad del cemento influyen directamente al incremento de temperatura en el elemento, por lo que se debe de tener muy en cuenta si se quiere reducir este valor.

1.3.2.2. Métodos de pre-enfriamiento

Como se explicó anteriormente una de las influencias más fuertes para evitar el agrietamiento térmico es la temperatura inicial del concreto, por lo que programar un sistema de enfriamiento antes de vaciar la mezcla es una alternativa importante. En estructuras masivas, cada 6 °C de reducción en la temperatura de vaciado por debajo de la temperatura del ambiente, reducirá la temperatura pico en el concreto endurecido aproximadamente un 2 a 3 °C (ACI 207.2R, 2007).

El pre-enfriamiento tiene como objetivo imponer un grado de control sobre la temperatura que va a desarrollar el elemento estructural mientras permanece en estado plástico. Debido a que los agregados representan una gran porción en relación al peso del concreto, un cambio en la temperatura inicial de estos afectará en gran porcentaje. Este método es usado en situaciones donde se requiera el uso de un concreto masivo de bajo contenido de cemento, por ejemplo en una presa.

Es por esto, que los almacenes de agregados deben ser sombreados y los agregados pueden ser procesados y clasificados utilizando agua fría. De ser el caso, se debe dar especial atención al suministro de los materiales al mezclador y al tiempo de mezclado. Adicionalmente, las técnicas que se usan para enfriar los agregados, consisten en:

- Esparcir agua en los almacenes para suministrar enfriamiento por evaporación.
- Esparcir agua fría sobre los agregados que se mueven en la banda transportadora.
- Inmersión de los agregados en tanques con agua fría.
- Soplar aire enfriado a través de las tolvas hasta forzar la evaporación del agua en almacenes aislados.

Por otro lado, enfriar el agua de la mezcla también es efectivo. Un cambio unitario en la temperatura del agua, representa un efecto importante en la temperatura del concreto. Esto se debe al gran calor específico del agua con respecto de los otros materiales. Existen situaciones ambientales muy extremas, donde se usa hielo para realizar la mezcla, pero se debe analizar detalladamente esta opción debido a que es un proceso que eleva el costo del concreto y porque el equipo para enfriar agua es menos complicado que el equipo para hacer hielo. Un método alternativo de enfriamiento de alguno de los componentes del concreto es el uso del nitrógeno líquido, el cual se usa en situaciones extremas de climas calurosos.

Es común la combinación de varias de estas prácticas para obtener una baja temperatura en el concreto.

1.3.2.3. Métodos de post-enfriamiento

El objetivo de este método es evitar diferencias de temperatura entre las caras superficiales y el interior de la estructura, realizando un enfriamiento progresivo y uniforme de la masa de concreto hasta una temperatura similar a la temperatura promedio anual de la obra, para evitar las consecuencias ya descritas.

El control de la temperatura del concreto masivo puede ser realizado por medio de la circulación de un líquido, usualmente agua fría, a través de tubos de pared delgada embebidos en el concreto. Dependiendo de las dimensiones de la tubería, del volumen y temperatura del fluido circulante, el calor removido durante el proceso, puede reducir en una cantidad significativa la temperatura pico.

La disposición del sistema de tuberías de enfriamiento es muy importante para la temperatura que se generará alrededor de estas. Por ejemplo, tubos pequeños con agua muy fría crearan una condición más severa que tubos más grandes con agua menos fría. Además, si se producen condiciones de rápido e intenso enfriamiento se provocarán grietas radiales o en circunferencia. Se debe tener en cuenta que la velocidad de enfriamiento se controlará hasta que se produzca la temperatura máxima en una zona cercana a los tubos (ACI 207.4R, 2005).

El proceso de enfriamiento normalmente se realiza, aún después de que se haya producido la temperatura máxima en el interior y hasta que ocurra alguna de las siguientes condiciones:

- El enfriamiento del concreto alcanza el máximo que puede ser tolerada sin agrietarse.
- La temperatura del concreto decrece 17° C por abajo del valor del pico inicial.
- El concreto se ha enfriado hasta su temperatura estable final u otra temperatura intermedia especificada por el diseñador.

El periodo de enfriamiento puede ser tan corto como unos cuantos días o tan largo como de un mes. En algunas situaciones donde los volúmenes de concreto masivo sean mayores, posterior a una primera etapa, la temperatura del concreto crecerá otra vez, y si este incremento es significativo, será necesario que existan uno o más periodos de enfriamiento adicionales.

Las tuberías que se usan para el post-enfriamiento de la masa del concreto, normalmente son de aluminio, acero, plástico o PVC, con dimensiones usuales de 25.4 mm de diámetro y 1.5 mm de espesor de pared. Siendo el más usado el de PVC por su facilidad de colocación, manipulación y unión de secciones y por su costo.

La longitud de cada tubería está en el orden de los 250 m, la cual es una longitud adecuada para que el flujo y el enfriamiento sean constantes. Cuando las tuberías son muy largas no son muy efectivas, ya que el agua se va calentando en todo su trayectoria. Es obligatorio que cada tubería sea probada antes de ser cubierta por el concreto, además de contar con un medidor de flujo.

Por otro lado, no solo existe este método para realizar el post-enfriamiento del concreto, también se puede usar otros métodos como el enfriamiento por evaporación. Este enfriamiento se realiza por medio de un roseado ligero de agua, o usando agua de curado fría.

1.3.2.4. Planificación de proceso constructivo

Este método en el que se escoge un plan de proceso constructivo para controlar la temperatura del elemento es muy practicado en nuestro país. Este método consiste en realizar un planeamiento especial de vaciado de concreto para poder ir liberando el calor generado poco a poco en varias etapas de construcción. Es común realizar un vaciado con capas escalonadas, pero también se puede realizar con capas consecutivas y/o la partición del elemento en dos o más sub-etapas.

Adicionalmente, se utiliza un material aislante sobre la superficie expuesta que permita mantener el calor del concreto para reducir la diferencia de temperatura, la cual es colocada luego de que se haya realizado el curado respectivo. Generalmente, esta aislación no representa un incremento significativo en la temperatura pico alcanzada por el concreto, pero si puede afectar al decrecimiento de la temperatura interior. Normalmente, las mantas se remueven luego de algunas semanas para evitar que se enfríe rápidamente y se agriete el concreto.

Existen diferentes tipos de materiales en el mercado, lo que permite predeterminar que niveles de aislación se quiere lograr. Entre ellas se tiene a las que se producen con fibras de vidrio, esponja de hule, espuma de poliuretano de celdas abiertas, espuma de vinilo, lana mineral, o poliestireno expandido.

Esta es una medida preventiva, en donde se reduce indirectamente el efecto de la temperatura ambiente, por lo que es considerado pasivo y de efecto limitado, ya que dependiendo de la magnitud de la obra se puede realizar una variación de las horas de trabajo a emplearse en obras cuya moderada envergadura permita la reducción horaria. Sin embargo, esta alternativa no es muy recomendadas en nuestro medio sobre todo en la sierra, ya que en las noches, las temperaturas suelen descender bajo cero y es necesario realizar un acondicionamiento del lugar para el vaciado. Por otro lado, otra forma de reducir la temperatura en el concreto es realizando el vaciado en período nocturno.

1.3.3. Métodos de Predicción de temperatura

La mayoría de los métodos que se utilizan para realizar predicciones, asumen que la temperatura máxima se debe a un incremento de temperatura adiabática, a pesar de que este sea un valor conservador, tal como se puede apreciar en la Figura 1.8.

Para realizar un procedimiento de predicción de temperatura se requiere conocer todo sobre los materiales a usar como el tipo, el contenido y la finura del cemento, así como las condiciones ambientales que existen en la obra. Una vez conocida esta información, se procede a escoger una de las opciones para predecir la temperatura final.

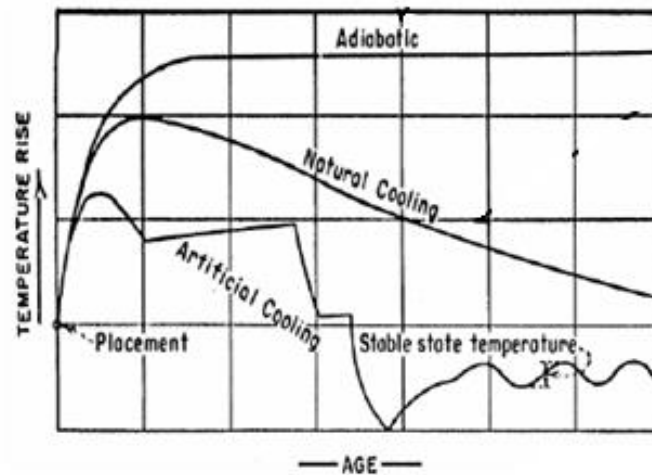


Figura 1.8: Incremento de la temperatura adiabática en comparación de la temperatura real del concreto masivo.

Fuente: Moser, 2009.

El método más simple es descrito por la PCA. Este método es útil para mezclas que contengan entre 300 y 600 kg/m³ de cemento y que en la sección transversal la dimensión mínima sea mayor que 1.8 m. Esta aproximación indica que para cada 100 kg de cemento, la temperatura se incrementará alrededor de 12 °C. Se debe tener en cuenta que este método es para cementos Tipo I y no considera materiales usados como reemplazo del cemento. El Comité ACI 207 sugiere una modificación para implementar el efecto de los materiales que reemplazan al cemento, indicando que ellos liberan la mitad de la cantidad de calor del cemento en un concreto, tal como se indica en la siguiente ecuación:

$$T_{MAX} = T_i + \left(12 * \frac{W_c}{100}\right) + \left(6 * \frac{W_{scm}}{100}\right)$$

donde:

T_{MAX}: temperatura máxima (°C)

T_i: temperatura de vaciado (°C)

W_c: peso del cemento (kg/m³)

W_{scm}: peso de los materiales que reemplazan al cemento (kg/m³)

Otro método brindado por el ACI 207.4R es el mostrado en la Figura 1.9 y 1.10, donde se muestra una aproximación rápida que permite obtener el incremento de temperatura adiabática a partir del ancho del elemento y del contenido de cemento por metro cúbico de concreto. Este método, distingue dos situaciones, la primera se refiere a un muro donde ambas caras están expuestas al ambiente, es decir, se libera calor por ambos

lados; y la segunda, representa el caso de una losa donde un lado está expuesto y el otro está contra el terreno, por lo que libera calor solo por una superficie. El método fue desarrollado para un cemento Tipo II y colocado a la temperatura de ambiente.

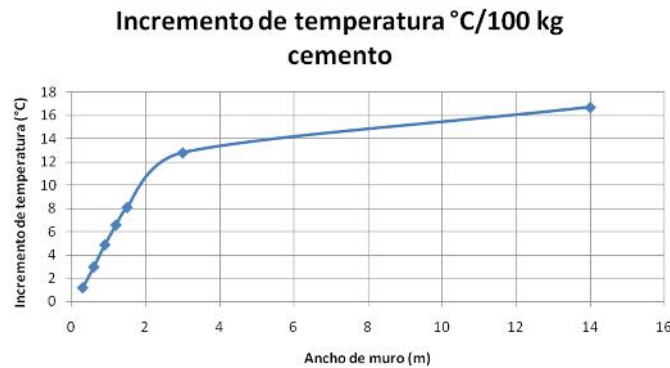


Figura 1.9: Incremento estimado de la temperatura para un muro de concreto por cada 100 kg. de cemento Tipo II.
Fuente: ACI 207.4, 2005

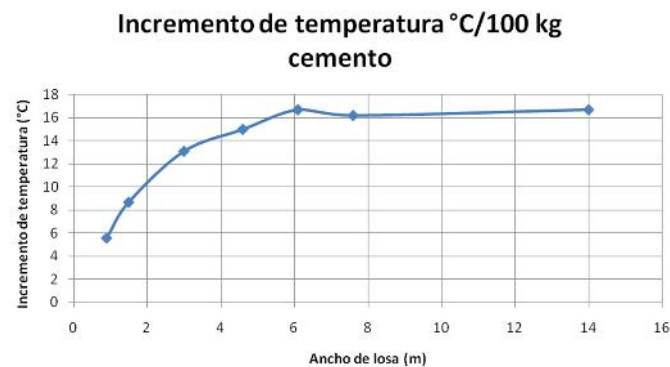


Figura 1.10: Incremento estimado de la temperatura para un losa de concreto por cada 100 kg. de cemento Tipo II.
Fuente: ACI 207.4, 2005

Existe otro procedimiento más preciso conocido como el método de Schmidt, desarrollado por E. Schmidt en 1920, que se describe en el ACI 207.1R, que puede ser usado para predecir la temperatura máxima y la diferencia de temperatura para diferentes diseños de mezclas en distintas condiciones.

Este método fue desarrollado como una solución numérica a la Ley de Fourier que rige la transferencia de calor, la cual se muestra a continuación:

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(k \frac{dT}{dy} \right) + Q_H = \rho * C_P * \frac{dT}{dt}$$

donde:

Q_H : flujo de generación de calor (W/m^3)

ρ : densidad (kg/m^3)

C_p : calor específico ($J/kg/^\circ C$)

k : conductividad térmica ($W/m/^\circ C$)

T : la temperatura ($^\circ C$).

El método Schmidt es un método de diferencias finitas. Para calcular los intervalos de tiempo se usa la siguiente ecuación:

$$\Delta t = \frac{\Delta x^2}{2h^2}$$

donde:

h^2 : coeficiente de difusión térmica ($m^2/día$)

x : espaciamiento entre puntos (m)

t : intervalo de tiempo (días)

Por último, en el capítulo 4 del reporte del ACI 207.2R, se muestra uno de los procedimientos que existen para predecir la temperatura máxima en el concreto. Este procedimiento usa una serie de ábacos con los que se permite obtener una aproximación de la temperatura máxima. Sin embargo, el procedimiento que indica el ACI, debe ser considerado como una aproximación debido a que este método está dirigido a concreto pobre (bajo contenido de cemento) sin contar con el acero de refuerzo, ni el vaciado progresivo para la colocación de concreto. Los ábacos usados fueron obtenidos a partir de cementos de la época de la primera versión del reporte ACI 207.4R; por lo que actualmente, los cementos se desenvuelven de manera distinta.

La temperatura máxima constituye la suma de básicamente cuatro registros: la temperatura efectiva de vaciado, la temperatura final del concreto, el incremento de la temperatura debido al calor de hidratación, y el cambio de temperatura equivalente para compensar la contracción por secado. Este será el procedimiento que se usará para realizar la comprobación de los resultados en campo.

1.4. Comportamiento en Climas de la Sierra

En la Sierra del Perú, se debe de considerar que el ciclo térmico no es frío sino híbrido por lo que es distinto al ciclo de clima frío de USA. En general, se deberán tomar medidas especiales siempre que la temperatura del ambiente descienda bajo los $5^\circ C$ (E.060, 2009). La hidratación de la pasta de cemento se retrasa con las bajas temperaturas, además, afectan a la resistencia del concreto, al tiempo de fraguado, a la

temperatura de la mezcla, entre otros. En consecuencia deben adoptarse las medidas necesarias para asegurar que la velocidad de endurecimiento sea la adecuada y que no se produzcan daños por estas condiciones.

1.4.1. Desarrollo de Resistencia a Bajas Temperaturas

El concreto no desarrolla por completo su resistencia en periodos de bajas temperaturas debido a que la velocidad de hidratación es lenta, lo que ocasiona la prolongación del tiempo de fraguado y en casos extremos puede incluso detenerse. El reporte del ACI 306.1R, nos indica las temperaturas mínimas que se deben de considerar para el procedimiento de vaciado de concreto, las cuales se muestran en la Tabla 1.5.

| Línea | Condición | | Espesor de la sección, mm (pulg.) | | | |
|-------|---|---------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|
| | | | Menos que 300 (12) | 300 a 900 (12 a 36) | 900 a 1800 (36 a 72) | Más de 1800 (72) |
| 1 | Temperatura mínima del concreto fresco cuando es mezclado durante el clima indicado | Mayor que -1°C (30°F) | 16°C (60°F) | 13°C (55°F) | 10°C (50°F) | 7°C (45°F) |
| 2 | | -18°C a -1°C (0°F a 30°F) | 18°C (65°F) | 16°C (60°F) | 13°C (55°F) | 10°C (50°F) |
| 3 | | Menor que -18°C (0°F) | 21°C (70°F) | 18°C (65°F) | 16°C (60°F) | 13°C (55°F) |
| 4 | Temperatura mínima del concreto al colocarlo y para mantenerlo** | | 13°C (55°F) | 10°C (50°F) | 7°C (45°F) | 5°C (40°F) |

Tabla 1.5: Temperatura Recomendada de Concreto para la Construcción en Clima Frío – Concreto con Aire Incluido.
Fuente ACI 306.1, 2002

Además, se debe controlar la temperatura de vaciado y de curado, ya que estas afectan al desarrollo de la resistencia del concreto. En la Figura 1.11, se observa cómo la temperatura de vaciado y fraguado afecta al desarrollo de la resistencia del concreto para una mezcla con cemento Tipo I, con un contenido de cemento de 310 kg/m³ y una relación de a/c=0.43. Se observa que las curvas para los concretos vaciados y curados a 4 °C y 13 °C presentan un porcentaje bajo de la resistencia máxima durante las primeras semanas. Si no se toman medidas preventivas para bajas temperaturas, el concreto no desarrollará la resistencia requerida para realizar el desencofrado.

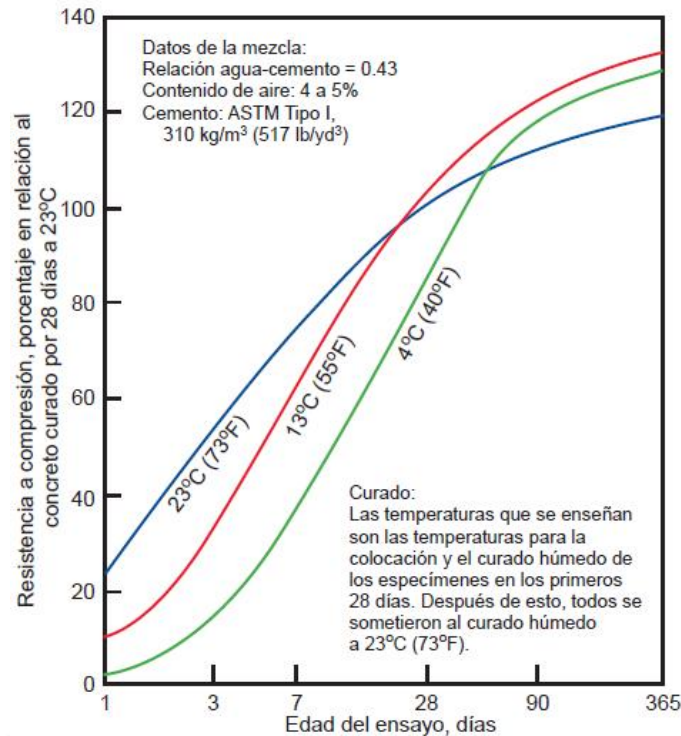


Figura 1.11: Efecto de las bajas temperaturas sobre la resistencia a compresión.
Fuente: PCA, 2004

1.4.2. Influencia en el Curado

En temporadas de bajas temperaturas, el concreto es susceptible de encontrarse en estado plástico durante más tiempo. En estas condiciones se requiere un curado efectivo porque existe un alto riesgo de evaporación superficial.

La práctica habitual de realizar el curado mediante regado con agua no suele ser recomendable por el alto riesgo de heladas y susceptibilidad de lavado superficial del concreto inherente a este método.

Por ello, se recomienda en estos casos para minimizar los riesgos de un inadecuado curado, la utilización de curadores químicos. Otras medidas adicionales como calentar el agua, utilizar bombas de calor, etc. se utilizan generalmente en climas extremos. Si bien son adecuados técnicamente, se consideran habitualmente como sistemas inviables, tanto desde un punto de vista logístico, como económico.

Otros métodos de curado incluyen el uso de plásticos y planchas de poliestireno sobre la superficie del elemento, siempre evitando el curado con agua. Esta aislación debe ser eficiente en presencia de humedad, para mantener una temperatura adecuada.

Finalmente, se concluye que las bajas temperaturas disminuyen el calor del proceso de hidratación y retardan significativamente el tiempo de fraguado del concreto, lo que resulta en una reducción de la resistencia a compresión a edades tempranas y un incremento en resistencias a edades mayores.

Es fundamental e indispensable tomar muestras de probetas adicionales de control en obra para curarlas bajo las mismas condiciones de la estructura vaciada y así verificar la eficiencia de los métodos de protección y curado. Una buena práctica utilizada en los proyectos, considera satisfactorio el curado y protección, cuando la resistencia promedio de las probetas de obra son mayores o iguales al 85% de la resistencia de las probetas curadas en laboratorio.

Además de los cilindros curados en laboratorio, en el clima frío, es útil curar algunos cilindros en las condiciones de campo. Las diferencias de la relación área-volumen entre los cilindros y la estructura, en conjunto con diferencias en la masa, dificultan las correlaciones entre las resistencias de los cilindros curados en el campo y de la estructura. Un lugar adecuado para colocar las probetas de concreto, es en una caja en la losa de piso o muro, cubierta con aislamiento térmico. Las probetas curadas en condiciones de campo darán resultados más representativos de la resistencia real del concreto que los cilindros curados en laboratorio. Se debe tener un cuidado especial para proteger los cilindros contra el congelamiento, pues su pequeña masa puede generar calor insuficiente para su protección.

1.4.3. Fraguado

El fraguado del hormigón se define como la aparición de rigidez en el hormigón fresco y precede a la ganancia de resistencia del hormigón, que continúa durante largo tiempo si se presentan las condiciones favorables. Por lo tanto, se refiere a un estado de transición entre la fluidez y la rigidez. (Neville, 1998).

Generalmente, las bajas temperaturas también afectan al tiempo de fraguado del concreto, tal y como se muestra en la Tabla 1.6. En ella podemos apreciar que el tiempo aumenta aproximadamente un tercio por cada 5 °C de reducción de temperatura.

| Tiempo de Fraguado del Concreto a Diferentes Temperaturas | |
|---|--|
| Temperatura | Tiempo de Fraguado Aproximado |
| 38 °C (100 °F) | 1 2/3 horas |
| 32 °C (90 °F) | 2 2/3 horas |
| 27 °C (80 °F) | 4 horas |
| 21 °C (70 °F) | 6 horas |
| 16 °C (60 °F) | 8 horas |
| 10 °C (50 °F) | 11 horas |
| 4 °C (40 °F) | 14 horas |
| -1 °C (30 °F) | 19 horas |
| -7 °C (20 °F) | No fragua -el concreto se congelará |

Tabla 1.6: Tiempo de fraguado del concreto a diferentes temperaturas.
 Fuente: Concrete Construction, 1990

1.4.4. Diseño de mezcla

El diseño debe cumplir con las indicaciones en la relación agua/cementante recomendadas en el ACI 201.2R. Lo recomendable es no sobrepasar de 0.5. Debido a que la relación a/c es baja, la cantidad de cemento por metro cúbico de concreto, son usualmente mayores que para una clima en condiciones normales. El uso de aditivos superplastificantes brindan una gran capacidad reductora de agua y con esto es posible alcanzar las bajas relaciones de a/c.

El aire incorporado es particularmente deseable en cualquier concreto vaciado durante climas fríos. Los concretos sin aire incluido pueden sufrir pérdida de resistencia y daños internos y de superficie, como resultado de los ciclos de hielo-deshielo (Figura 1.12). El aire incluido proporciona la capacidad de absorber tensiones debidas a la formación del hielo en el concreto.

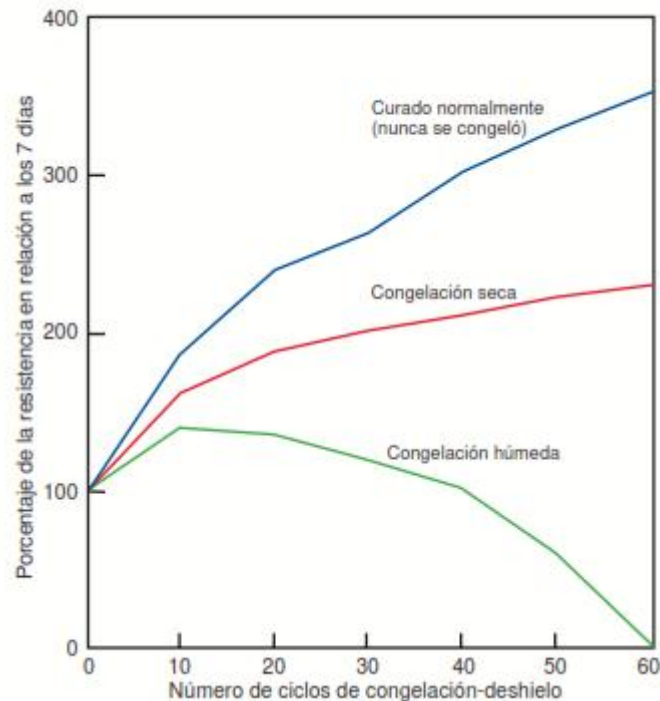


Figura 1.12: Efecto de los ciclos de hielo-deshielo sobre la resistencia del concreto que no contiene aire incluido (curado por 7 días antes de la primera congelación)
Fuente: Powers, 1956

Adicionalmente, el uso de aditivos incorporadores de aire, permite la expansión volumétrica del agua de la mezcla durante el congelamiento, teniendo en cuenta la disminución de resistencia por efecto del aire incorporado y el aumento de la trabajabilidad al mismo tiempo. Las dosificaciones usualmente van desde 0.1% al 0.6% en peso del cemento (según las especificaciones del proveedor).

En general para climas fríos, se pueden utilizar aditivos acelerantes de fragua, previo estudio de los tiempos de fragua inicial y final del concreto, para disminuir los tiempos de endurecimiento del concreto, pero debe ser evaluado cuando se usará en concreto masivo ya que en este caso aumentaría considerablemente el calor de hidratación y por ende el riesgo de fisuración del elemento.

1.4.5. Protección contra las bajas temperaturas

En climas de bajas temperaturas, la mezcla de concreto y su temperatura se deben adaptar a los procedimientos constructivos y a las condiciones del clima. Se deben tomar medidas preventivas para proteger el concreto.

Es recomendable realizar el vaciado durante las primeras horas del día, para aprovechar las horas de mayor temperatura en el fraguado del elemento. El objetivo es que el concreto haya fraguado antes de que las temperaturas desciendan bruscamente. Sobre todo en obras ubicadas a lo largo de la sierra peruana, que es donde se presentan mayores cambios bruscos de temperatura entre el día y la madrugada.

A su vez, los tipos de encofrado también brindan una protección extra al concreto, por lo que actúan como aislador térmico. Los encofrados construidos para el uso repetido se pueden aislar económicamente con mantas comercialmente disponibles o con materiales fibrosos aislantes. Los encofrados de acero son mejores para la disipación rápida de calor y así evitar que en el centro se acumule mayor temperatura.

Una de las protecciones más usadas en nuestro país es la del uso de los microclimas. Para conseguirlo, se arma un recinto con calefacción, los cuales son muy eficientes para proteger al concreto, pero son probablemente los más laboriosos, tal como se puede apreciar en la Figura 1.13. Los recintos pueden ser de madera, de lona o de polietileno. Los recintos plásticos, que admiten el paso de la luz del día, son los más populares, pero la calefacción temporal en estos recintos puede ser costosa.



Figura 1.13: Armado de microclima para vaciados en bajas temperaturas.
Fuente: Proyecto Antapaccay - Expansión Tintaya - Cusco

El uso de calentadores dentro de los recintos es muy importante sobre todo en los meses donde la temperatura desciende drásticamente en las noches. En el manual de la PCA, se describen los tres tipos de calentadores o calefactores que se pueden emplear: flama indirecta, flama directa y sistemas hidrónicos. “Los calefactores de flama indirecta poseen ventilación para remover los productos de la combustión. Donde se vaya a

proveer calor a la parte superior del concreto fresco, como por ejemplo en una losa de piso, se requieren calentadores con ventilación, porque el dióxido de carbono (CO_2) en el tubo de salida se debe transportar hacia afuera y se debe prevenir su reacción con el concreto fresco. Las unidades de flama directa se pueden utilizar para calentar los recintos encerrados debajo del concreto colocado en losas de piso y techo. Los sistemas hidrónicos transfieren calor a través de la circulación de una solución de glicol/agua en un sistema encerrado de tuberías y mangueras.” (PCA, 2004)

Se debe tener en cuenta que cualquier calentador que queme combustible fósil produce dióxido de carbono (CO_2), el cual reacciona con el hidróxido de calcio en la superficie del concreto fresco para formar una capa frágil de carbonato de calcio, que interfiere en la hidratación del cemento (Kauer y Freeman, 1955). El resultado es una superficie débil, que se va a espolvorear bajo la acción del tránsito. La profundidad y el grado de la carbonatación dependen de la concentración del CO_2 , temperatura de curado, humedad, porosidad del concreto, periodo de exposición y método de curado. Debido a esto, no se deben utilizar los calefactores de flama directa para la calefacción inmediatamente después de las operaciones de vaciado, sino se debe esperar, por lo menos, 24 horas. Además, el uso de equipos de construcción que operan con gasolina también se los debe restringir en los recintos durante este periodo.

Por otro lado, es usual colocar las mantas aislantes para retener el calor y la humedad del concreto. Su efectividad se evalúa con la colocación de un termómetro debajo de la manta, en la superficie del concreto. Si la temperatura que marca es menor que el mínimo requerido por la última fila de la Tabla 1.5, se debe aplicar un material aislante complementario.

Las mantas aisladoras para la construcción se producen con fibras de vidrio, esponja de hule, espuma de poliuretano de celdas abiertas, espuma de vinilo, lana mineral o fibras de celulosa. Las cubiertas externas se producen con lona, polietileno tejido u otras telas duras que van a resistir al manejo brusco.

1.4.6. Protección contra las temperaturas templadas

Se debe tener en cuenta que en la sierra peruana se tienen diversos tipos de climas, anteriormente se describió las consideraciones que se deben tener en lugares con climas de bajas temperaturas, a continuación se describirá las consideraciones que se debe tener como mínimo para climas de temperaturas templadas. Para este caso se

considera clima templado a temperaturas no menores a 0 grados centígrados pero no mayores a 10 grados centígrados aproximadamente, durante el horario más crítico.

Se deben hacer preparativos para proteger el concreto en menor medida pero siempre cuidando las temperaturas mínimas que indica el ACI 306.1. Por ejemplo, para climas con temperaturas mayores a $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ la temperatura mínima del concreto fresco cuando es mezclado debe ser $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en elementos estructurales con un espesor de la sección de más de 1.80 m.

De igual manera se debe aprovechar las primeras horas del día para trabajar en horas de mayor temperatura para ayudar al fraguado del elemento.

En cuanto al tipo de encofrado que se necesita para el vaciado de elementos de concreto masivo en climas templados, normalmente solo se debe considerar encofrados de acero para la disipación rápida de calor y así evitar que en el centro se acumule mayor temperatura.

Como se mencionó, las medidas para proteger al concreto no son tan exigentes como en climas fríos por lo que se puede optar por cubrir la cara expuesta de concreto para evitar la pérdida de calor utilizando mantas térmica o elementos de poliestireno expandido de cierto espesor.

2. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL VACIADO MASIVO

Para el estudio de la presente tesis, se busca sugerir una metodología para ejecutar las actividades de construcción de los elementos estructurales que se describirán a continuación. Los elementos estructurales a evaluar son las cimentaciones de dos Molinos de Bolas ubicados en distintos proyectos de diferentes localidades pero ambas dentro de la sierra de nuestro país. Ambas se enumerarán para ser identificadas.

2.1. Caso 01 - Condiciones frías

2.1.1. Información del lugar

El análisis térmico se realizará a un elemento prismático rectangular, en donde debido a sus grandes dimensiones el problema de agrietamiento térmico es muy probable. Este primer elemento se denominará Fundación Molino Bolas 01.

Para el presente trabajo de tesis, se escogió un proyecto que se encuentra localizado en la Sierra Sur del Perú, en el departamento de Ayacucho. La altitud aproximada en la que está ubicado el proyecto es de 4 800 m.s.n.m.

El vaciado fue realizado durante el mes de mayo, por lo que es importante conocer la información del entorno. Para conocer estos datos, se utilizará la información de un informe externo, donde se indica las condiciones climáticas de la zona. En las Tablas 2.1 y 2.2, se puede apreciar la temperatura mínima y la temperatura máxima, respectivamente.

| | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SET | OCT | NOV | DIC |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Promedio | -2.54 | -2.57 | -2.61 | -3.59 | -5.65 | -6.89 | -6.86 | -5.18 | -4.69 | -3.46 | -3.13 | -1.40 |
| Desv | 0.43 | 0.49 | 0.43 | 0.54 | 1.16 | 1.38 | 1.64 | 1.00 | 0.85 | 0.73 | 0.70 | 0.22 |
| Máx | -1.24 | -0.85 | -1.27 | -2.20 | -3.10 | -4.15 | -3.32 | -3.59 | -3.15 | -2.12 | -1.97 | -0.87 |
| Min | -3.55 | -3.42 | -3.24 | -4.88 | -10.00 | -11.08 | -12.94 | -9.89 | -7.48 | -5.66 | -5.58 | -1.98 |

Tabla 2.1: Temperatura mínima de la zona
Fuente: Información del proyecto

| | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SET | OCT | NOV | DIC |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Promedio | 16.19 | 16.17 | 15.26 | 16.36 | 17.31 | 16.82 | 16.43 | 17.41 | 17.80 | 19.52 | 19.76 | 18.54 |
| Desv | 1.27 | 1.50 | 1.34 | 1.01 | 0.83 | 1.16 | 0.99 | 0.92 | 1.00 | 0.94 | 0.96 | 1.05 |
| Máx | 18.52 | 19.20 | 18.07 | 18.54 | 18.47 | 18.15 | 18.80 | 18.82 | 19.82 | 21.33 | 21.60 | 20.22 |
| Min | 13.53 | 13.36 | 12.69 | 14.18 | 15.43 | 12.46 | 13.84 | 14.89 | 15.41 | 17.77 | 17.41 | 16.50 |

Tabla 2.2: Temperatura máxima de la zona
Fuente: Información del proyecto

2.1.2. Información del elemento estructural

Se puede apreciar en la Tabla 2.3 las dimensiones del elemento estructural que se va a analizar, donde se considera el área de disipación la cara superior y las caras laterales. Por otro lado, en la Figura 2.1. se puede apreciar un modelo en 3-D del elemento seleccionado. Algunos autores afirman que cuando la relación entre el volumen y el área de disipación es mayor a 1.2, se pueden presentar problemas de calor de hidratación en concreto masivo.

| DESCRIPCIÓN | PERALTE (m) | ANCHO (m) | LARGO (m) | VOL (m3) | A. DISIPA. (m2) | V/A |
|---------------------------|-------------|-----------|-----------|----------|-----------------|------|
| Fundación Molino Bolas 01 | 2.40 | 21.40 | 13.00 | 667.68 | 443.32 | 1.51 |

Tabla 2.3: Dimensiones del elemento estructural y su relación Volumen/Área de disipación.
Fuente: Información del proyecto

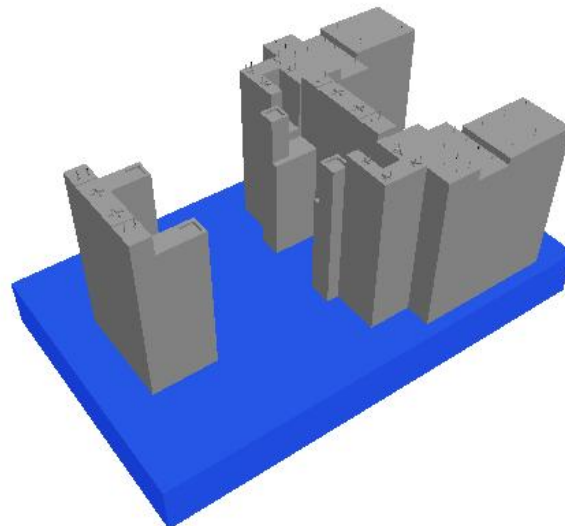


Figura 2.1: Vista en 3-D del elemento estructural (en azul), llamado fundación del Molino Bolas 01.

Fuente: Información del proyecto

2.1.3. Recursos

En obras que se encuentren ubicadas en zonas de difícil acceso, de bajas temperaturas y a gran altitud, es importante que se cuente con ciertos equipos especiales para poder cumplir con el programa de construcción, aparte de los necesarios como encofrados, vibradores, andamios, excavadoras, entre otros. Por lo menos, se debe contar con un equipo de cada uno:

- Grupo electrógeno
- Bomba telescópica
- Estufas para microclima
- Carpas para microclima
- Termocuplas para medir la temperatura
- Termómetro ambiental
- Poliestireno expandido (tecnopor) sobre el concreto
- Mantas de Polietileno sobre el concreto
- Torres de Iluminación

El concreto a utilizar contará con las siguientes características:

- Relación a/c de 0.41.
- Resistencia a la compresión $f'c = 315 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días de vaciado
- Cemento tipo IP de Cementos Yura
- Aditivo Incorporador de Aire.
- Contenido de cemento 450 kg/m^3
- Tamaño Máximo $3/4$ “

Además, se considerará que se cuenta con una planta de concreto con una capacidad de $40 \text{ m}^3/\text{hr}$, ubicada a menos de 2 km del Proyecto.

2.1.4. Proceso Constructivo del Elemento Estructural

En general, se debe tener especial cuidado para el vaciado de los elementos estructurales cuando se encuentren en obras que se ejecutan a más de 3 000 m.s.n.m., debido a las grietas y fisuras que se pueden generar si es que el gradiente térmico supera los $20 \text{ }^\circ\text{C}$ aproximadamente, según la norma ACI 207.2.

2.1.4.1. Fundación del Molino Bolas 01

A continuación, se describirá un procedimiento típico de vaciados masivos para condiciones de climas fríos en nuestro país. Este procedimiento, ha sido adaptado a las dimensiones del elemento a analizar en este trabajo de tesis. Las etapas que componen este proceso deben ser revisadas y aprobadas con la oficina de campo del proyecto.

- Limpieza y colocación de solado

Antes de realizar estos trabajos, se debe confirmar mediante un estudio topográfico, la ubicación exacta del área a trabajar. Luego, se retira toda la tierra y el polvo que se encuentra en el terreno de la fundación. Una vez realizada la limpieza, se procede a realizar el vaciado con una bomba telescópica o en su defecto, si no alcanza la pluma de la bomba, se vaciará con chutes. El solado, después de su vaciado se protegerá con lonas, hasta su fraguado.

- Trazo y replanteo

Posterior a la colocación del solado se procederá a realizar el trazo topográfico tanto de la cimentación, como también de las bases de los equipos.

- Habilitación y colocación de acero corrugado de refuerzo

Se iniciará con la colocación de los tacos de concreto de 3" x 3" en la parte superior del solado. El acero corrugado será habilitado en obra y se almacenará en un área adyacente a la obra, para luego realizar la fase de colocación.

Una vez listos los tacos, se procede con el colocado de la malla inferior. Luego de terminar dicho armado, se colocará unos separadores para facilitar el armado de las mallas intermedia y superior, así como los arranques de las bases para los equipos que conforman el Molino Bolas. Cabe resaltar, que para facilitar la movilización del personal, se debe colocar sobre la malla superior unas tablas de madera lo suficientemente anchas y largas para que el personal se pueda trasladar sobre ellas.

- Colocación de encofrado y andamios de circulación

En el perímetro de la fundación se puede colocar andamios, para facilitar la circulación del personal. Por lo general, se recomienda utilizar encofrados metálicos por la disipación de calor a través de sus paredes. Sin embargo, también puede utilizarse encofrado fenólicos pero debe controlarse la temperatura que llega a alcanzar en las zonas cercanas a las caras externas del elemento.

- Vaciado de concreto

Un método utilizado para disipar la generación de calor en el interior del concreto, es realizar el vaciado en un solo proceso, que conste de varias etapas de vaciado divididas en 60 celdas, las cuales tengan un volumen aproximado de 11.1 m^3 de concreto cada una, como indica la Figura 2.2.

Para las etapas de vaciado, se usará 01 camión bomba tipo pluma para concreto, debido a sus grandes dimensiones y se revisará que la superficie de vaciado esté libre de polvo, como también el acero corrugado. En el Anexo A, se puede apreciar mejor este detalle.

El vaciado de cada celda se realizará en franjas de 0.40 m de alto, 13.00 m de largo y en anchos variables de 2.10 m y 2.15 m según el esquema de la Figura 2.2, a lo largo de los 21.40 m. En total se tendrán 60 celdas con un volumen equivalente a uno y medios camiones mixer (considerando que cada camión mixer transporta una carga de 8 m^3).

La colocación del concreto en cada capa se extiende por todo el ancho del bloque y la secuencia del vaciado va desde un extremo hacia el otro, con el fin de que queden expuestas pequeñas áreas de concreto a la vez y así, se pueda liberar calor de una forma más rápida y reducir el incremento máximo de temperatura que se tendría si se vacía en un solo bloque.

Se vibrará las capas de 0.40 m en forma vertical, siempre verificando que el vibrador no sobrepase esta altura para evitar que entre en contacto con la superficie de la celda inferior inmediata. Durante todo el vaciado de concreto se tendrá personal que estará revisando el encofrado, tanto verticalidad y ajuste del mismo. Se debe asegurar la velocidad de vaciado para evitar la formación de juntas frías y respetar la presión máxima del concreto fresco sobre los encofrados.

Para el proyecto se asumió que el tiempo de fragua inicial es a partir de 3 horas de vaciado de una celda de concreto. En caso se llegue a dar esta condición, se debe prever unos bastones que servirán como conectores para evitar discontinuidad estructural entre los concretos de diferentes edades.

El concreto debe protegerse contra el congelamiento y la pérdida de humedad durante el periodo requerido de curado correspondiente.

| N° Celda | Altura Acumulada (m) | | | | | | | | | | |
|------------------|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 6 | 2.40 | 11.1 233.7 | 11.1 300.5 | 11.1 367.2 | 11.1 434.0 | 11.1 500.8 | 11.1 556.4 | 11.1 600.9 | 11.1 634.3 | 11.1 656.6 | 11.1 667.7 |
| | | Celda 21 | Celda 27 | Celda 33 | Celda 39 | Celda 45 | Celda 50 | Celda 54 | Celda 57 | Celda 59 | Celda 60 |
| 5 | 2.00 | 11.1 166.9 | 11.1 222.6 | 11.1 289.3 | 11.1 356.1 | 11.1 422.9 | 11.1 489.6 | 11.1 545.3 | 11.1 589.8 | 11.1 623.2 | 11.1 645.4 |
| | | Celda 15 | Celda 20 | Celda 26 | Celda 32 | Celda 38 | Celda 44 | Celda 49 | Celda 53 | Celda 56 | Celda 58 |
| 4 | 1.60 | 11.1 111.3 | 11.1 155.8 | 11.1 211.4 | 11.1 278.2 | 11.1 345.0 | 11.1 411.7 | 11.1 478.5 | 11.1 534.1 | 11.1 578.7 | 11.1 612.0 |
| | | Celda 10 | Celda 14 | Celda 19 | Celda 25 | Celda 31 | Celda 37 | Celda 43 | Celda 48 | Celda 52 | Celda 55 |
| 3 | 1.20 | 11.1 66.8 | 11.1 100.2 | 11.1 144.7 | 11.1 200.3 | 11.1 267.1 | 11.1 333.8 | 11.1 400.6 | 11.1 467.4 | 11.1 523.0 | 11.1 567.5 |
| | | Celda 6 | Celda 9 | Celda 13 | Celda 18 | Celda 24 | Celda 30 | Celda 36 | Celda 42 | Celda 47 | Celda 51 |
| 2 | 0.80 | 11.1 33.4 | 11.1 55.6 | 11.1 89.0 | 11.1 133.5 | 11.1 189.2 | 11.1 255.9 | 11.1 322.7 | 11.1 389.5 | 11.1 456.2 | 11.1 511.9 |
| | | Celda 3 | Celda 5 | Celda 8 | Celda 12 | Celda 17 | Celda 23 | Celda 29 | Celda 35 | Celda 41 | Celda 46 |
| 1 | 0.40 | 11.1 11.1 | 11.1 22.3 | 11.1 44.5 | 11.1 77.9 | 11.1 122.4 | 11.1 178.0 | 11.1 244.8 | 11.1 311.6 | 11.1 378.4 | 11.1 445.1 |
| | | Celda 1 | Celda 2 | Celda 4 | Celda 7 | Celda 11 | Celda 16 | Celda 22 | Celda 28 | Celda 34 | Celda 40 |
| Avance Parcial | | 2.15 | 2.15 | 2.15 | 2.15 | 2.10 | 2.10 | 2.15 | 2.15 | 2.15 | 2.15 |
| Avance Acumulado | | 2.15 | 4.30 | 6.45 | 8.60 | 10.70 | 12.80 | 14.95 | 17.10 | 19.25 | 21.40 |

Figura 2.2: Plan de vaciado de concreto masivo de la fundación del Molino de Bolas.
Fuente: Información del proyecto

- Control de variables

Para conocer y controlar las temperaturas que experimentará el concreto masivo en el núcleo y la superficie durante su periodo de fraguado, se definirán puntos de medición de temperatura. Para esto se llevará a cabo la instalación de termocuplas en el núcleo y la superficie de la fundación, según la Figura 2.3. Las termocuplas a utilizar deberán registrar en todo momento las temperaturas que presenta el concreto vaciado tanto en el núcleo como en la superficie.

Cuando el registro de monitoreo de temperaturas demuestre una disminución de las temperaturas en el núcleo así como en la superficie, se analizará la continuidad de los trabajos sobre la fundación así como el retiro de la protección térmica superficial para que la masa libere temperatura, controlando que la pérdida diaria de temperatura en la superficie de concreto no supere los 11°C.

LOSA DE CIMENTACIÓN MOLINO DE BOLAS

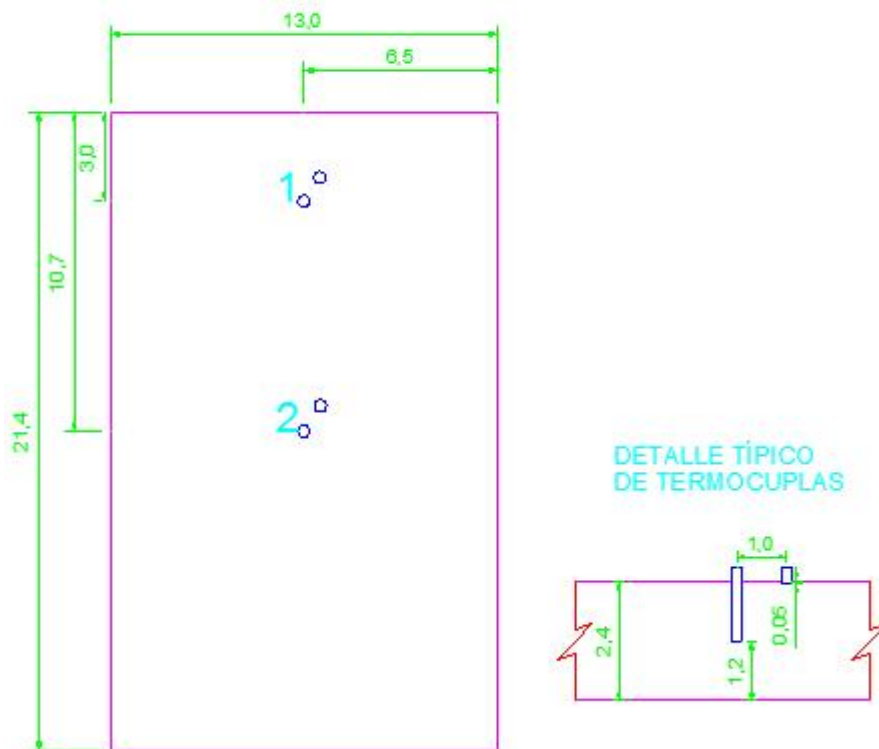


Figura 2.3: Ubicación de termocuplas en la fundación del Molino de Bolas.
Fuente: Información del proyecto

- Consideraciones de microclima

Es necesario aplicar protecciones que permitan controlar las diferencias admisibles de temperaturas. Para los vaciados del molino, se montará un microclima para proteger al concreto de la exposición al frío, contando con carpas de 30m x 20m, que se sujetará con parantes de maderas y sogas, teniendo en consideración que tendrá una pendiente mínima del 6%. Dentro del recinto, se contará con lámparas para el alumbrado en el interior del vaciado y con calentadores o estufas a gas para conservar la temperatura interior del vaciado.

La temperatura del microclima previo y durante el vaciado de concreto será superior a los 5 °C, por lo que las estufas o calentadores deberán ser monitoreados periódicamente para lograr un control adecuado y nunca estar por debajo de esta temperatura. La temperatura del microclima posterior a la colocación del concreto fluctuará entre los 5 °C y 15 °C. Es importante que se posea un registro de las temperaturas ambientales para que se prevea cualquier eventualidad.

Como medida adicional de protección, se puede colocar unas mantas térmicas o planchas de poliestireno expandido, para mantener la temperatura para el curado y evitar que el gradiente de temperatura sobrepase el límite establecido. Además, se deberá colocar un polietileno sobre dichas planchas para evitar su deterioro.

- Curado

El curado del concreto iniciará inmediatamente después de culminado el vaciado y cuando el agua exudada haya desaparecido. Se debe usar un curador químico, ya que no se recomienda curar con agua en climas fríos, y no habrá necesidad de realizar ninguna preparación de la superficie. El concreto debe ser curado durante un mínimo de 7 días después de su colocación.

Luego del desencofrado, se aplicará el curador químico a las superficies expuestas, a fin de continuar con el proceso de curado y garantizarlo como mínimo hasta el séptimo día posterior al vaciado de concreto.

- Desencofrado

La liberación del encofrado se realizará según las lecturas de las termocuplas, asimismo, se programará en función del clima, la apertura del microclima. En el caso de que el desencofrado del concreto se realice entre las 48 horas posteriores al vaciado del mismo y antes del retiro del microclima, se deberá extender la carpa del microclima. Esto se realiza con el fin de que las caras expuestas queden protegidas y bajo las mismas condiciones de temperatura que el resto de la estructura. Esta consideración no aplicó para el proyecto.

Es importante programar el desencofrado del elemento, ya que pueden darse casos que se necesite que esté más de 10 días encofrado lo que impida el avance de los vaciados de los demás elementos que se conectan con el elemento masivo.

2.1.5. Parámetros que definen las celdas de vaciado

Como ya se ha explicado en el punto anterior, el vaciado se realizará por celdas horizontales las cuales han sido dimensionadas a partir de ciertos parámetros. Cada celda posee un volumen entre 10.9 y 11.2 m³.

2.1.5.1. Tiempo de fraguado

En todo concreto es esencial que el fraguado no sea ni demasiado rápido ni demasiado lento. Si es muy rápido el tiempo será insuficiente para colocar el concreto antes que adquiera rigidez. Si es muy lento se pueden originar retrasos en el avance y utilización de la estructura. Los tiempos de fraguado pueden estar influenciados principalmente por cuatro variables: el contenido de SO_3 , el contenido de C_3A , el grado de finura y la temperatura alcanzada durante la molienda.

Un valor típico de tiempo de fraguado es el de 2 horas en condiciones ambientales normales. Sin embargo, en condiciones de clima frío, el fraguado del concreto puede retardarse si no se toman medidas necesarias para proteger el proceso de hidratación del cemento. Además, el endurecimiento y el desarrollo de resistencia también se reducen.

En todo momento se debe evitar la generación de las juntas frías, por lo que los tiempos deben ser controlados constantemente.

2.1.5.2. Velocidad de vaciado

La velocidad de vaciado depende de diversos factores como la capacidad de la planta de concreto, la distancia de la planta a la obra, la bomba telescópica, entre otros.

Para el procedimiento de colocado se está considerando una planta de concreto de 40 $m^3/hr.$ y una distancia referencial menor de 2 km. A partir de estos datos es posible determinar la cantidad de camiones mixer que se necesitarán como mínimo para poder realizar el vaciado de forma continua. Tener en cuenta que en este caso la bomba no retrasa el avance, ya que puede llegar a alcanzar rendimiento de trabajo de una velocidad de 100- 120 $m^3/hr.$, según la dosificación.

2.2. Caso 02 - Condiciones templadas

2.2.1. Información del lugar

El segundo escenario que se presenta es también de un elemento prismático rectangular, al cual se nombrará como Fundación Molino Bolas 02. Al igual que el anterior caso, el agrietamiento térmico es un problema latente ya que el elemento posee grandes dimensiones.

Para el presente trabajo de tesis, el segundo escenario que se plantea es de un proyecto que se encuentra localizado en la Sierra Sur del Perú, en el departamento de Arequipa.

La altitud aproximada en la que está ubicado el proyecto es de 2 600 m.s.n.m. Las temperaturas que se presenten no serán tan drásticas como en el primer caso, por lo que se puede considerar que este contexto posee condiciones templadas.

El vaciado fue realizado durante el mes de enero, por lo que es importante conocer la información del entorno. Durante este mes, se registran temperaturas promedio de 20 °C durante el día y de 13 °C por la noche (valores extraídos de registros diarios de temperatura en la zona del proyecto).

2.2.2. Información del Elemento Estructural

Se puede apreciar en la Tabla 2.4 las dimensiones del elemento estructural que se va a analizar, donde se considera el área de disipación la cara superior y las caras laterales. Por otro lado, en la Figura 2.4 y 2.5 se puede apreciar una vista en planta y de perfil, respectivamente, del elemento seleccionado. Como se mencionó anteriormente, algunos autores afirman que cuando la relación entre el volumen y el área de disipación es mayor a 1.2, se pueden presentar problemas de calor de hidratación en concreto masivo.

| DESCRIPCIÓN | PERALTE (m) | ANCHO (m) | LARGO (m) | VOL (m ³) | A. DISIPA. (m ²) | V/A |
|---------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------------------|------------------------------|-----|
| Fundación Molino Bolas 02 | 1.75 | 19.56 | 29.03 | 993.7 | 652.9 | 1.5 |

Tabla 2.4: Dimensiones del elemento estructural y su relación Volumen/Área de disipación.

Fuente: Información del proyecto

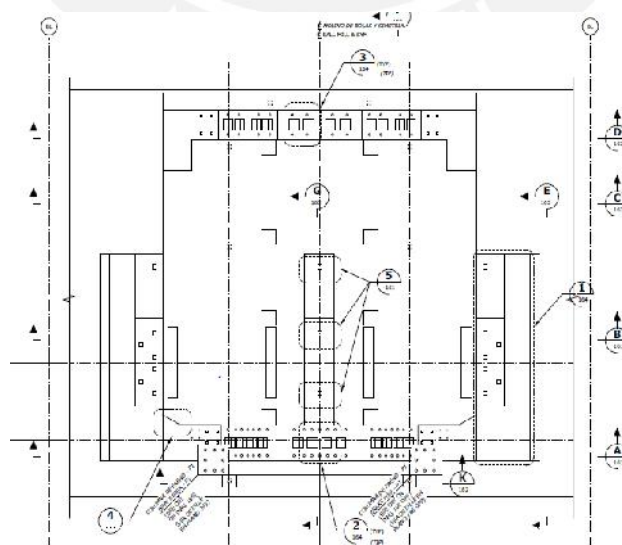


Figura 2.4: Vista en planta del elemento estructural Molino Bolas 02.

Fuente: Información del proyecto

- Limpieza y colocación de solado

Proceso igual al caso anterior.

- Trazo y replanteo

Proceso igual al caso anterior.

- Habilitación y colocación de acero corrugado de refuerzo

Proceso igual al caso anterior.

- Colocación de encofrado y andamios de circulación

Proceso igual al caso anterior.

- Vaciado de concreto

Se realizará el vaciado en dos procesos, como se aprecia en la Figura 2.6, el cual consta de varias etapas de vaciado divididas en 66 celdas, las cuales poseen un volumen aproximado de 16 m³ de concreto cada una. Para las etapas de vaciado, se usará 02 camiones bomba tipo pluma para concreto, debido a sus grandes dimensiones y se revisará que la superficie de vaciado esté libre de polvo, como también el acero corrugado. En el Anexo A se puede apreciar con mejor detalle el procedimiento de vaciado.

El vaciado de cada celda se realizará en franjas de 0.30 m de alto, 14.50 m de largo (dos bombas) y en anchos variables de 1.15 m y 1.85 m según el esquema de la Figura 2.7, a lo largo de los 19.56 m. En total se tendrán 66 celdas con un volumen equivalente a dos camiones mixer (considerando que cada camión mixer transporta una carga de 8 m³).

La colocación del concreto en cada capa se extiende por todo el ancho del bloque y la secuencia del vaciado va desde un extremo hacia el otro, con el fin de que queden expuestas pequeñas áreas de concreto a la vez y así, se pueda liberar calor de una forma más rápida y reducir el incremento máximo de temperatura que se tendría si se vacía en un solo bloque.

Se vibrará las capas de 0.30 m en forma vertical, siempre verificando que el vibrador no sobrepase esta altura para evitar que entre en contacto con la superficie de la celda inferior inmediata. Durante todo el vaciado de concreto se tendrá personal que estará revisando el encofrado, tanto verticalidad y ajuste del mismo. Se debe asegurar la

velocidad de vaciado para evitar la formación de juntas frías y respetar la presión máxima del concreto fresco sobre los encofrados.

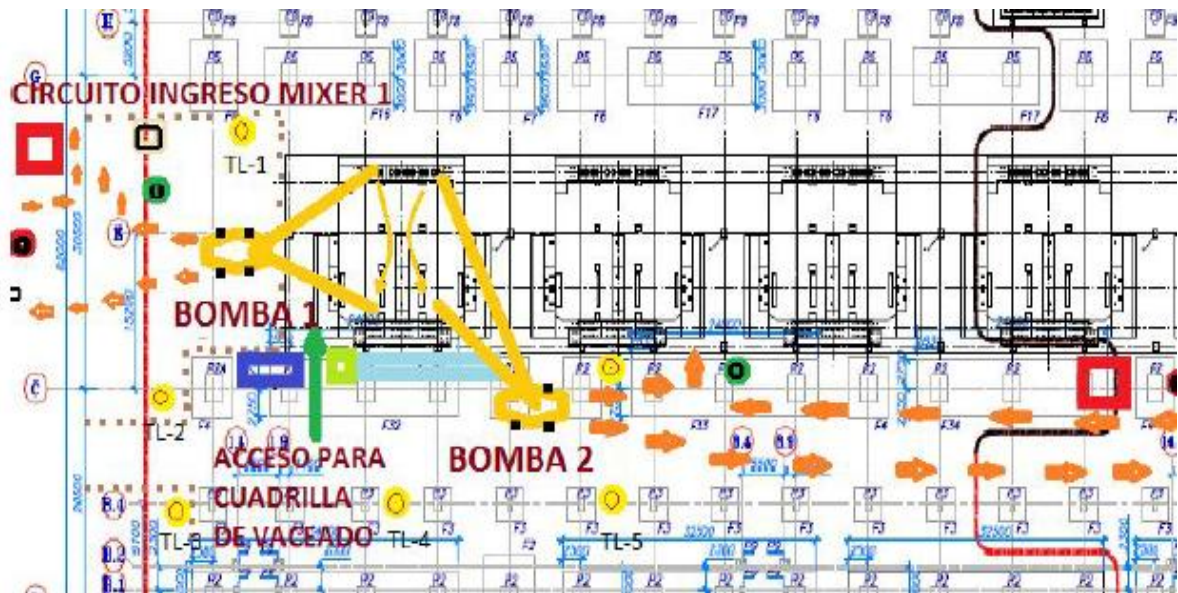


Figura 2.6: Secuencia de vaciado de concreto de Molino de Bolas 02.
Fuente: Información del proyecto

| N° Celda | Altura Acumulada (m) | Temperaturas (°C) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|----------------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| 6 | 1.80 | 12.9 | 333.4 | 12.9 | 426.4 | 12.9 | 519.4 | 12.9 | 612.4 | 12.9 | 705.5 | 12.9 | 792.6 | 12.9 | 863.7 | 12.9 | 918.7 | 12.9 | 957.8 | 12.9 | 980.8 | 12.9 | 993.7 |
| | | Celda 21 | Celda 27 | Celda 33 | Celda 39 | Celda 45 | Celda 51 | Celda 56 | Celda 60 | Celda 63 | Celda 65 | Celda 66 | | | | | | | | | | | |
| 5 | 1.50 | 16.0 | 240.3 | 16.0 | 320.4 | 16.0 | 413.5 | 15.0 | 506.5 | 16.0 | 599.5 | 16.0 | 692.6 | 16.0 | 779.7 | 16.0 | 850.8 | 16.0 | 905.8 | 16.0 | 944.9 | 10.1 | 967.9 |
| | | Celda 15 | Celda 20 | Celda 26 | Celda 32 | Celda 38 | Celda 44 | Celda 50 | Celda 55 | Celda 59 | Celda 62 | Celda 64 | | | | | | | | | | | |
| 4 | 1.20 | 16.0 | 160.2 | 16.0 | 224.3 | 16.0 | 304.4 | 15.0 | 397.5 | 16.0 | 490.5 | 16.0 | 583.5 | 16.0 | 676.5 | 16.0 | 763.6 | 16.0 | 834.7 | 16.0 | 889.8 | 10.1 | 928.8 |
| | | Celda 10 | Celda 14 | Celda 19 | Celda 25 | Celda 31 | Celda 37 | Celda 43 | Celda 49 | Celda 54 | Celda 58 | Celda 61 | | | | | | | | | | | |
| 3 | 0.90 | 16.0 | 96.1 | 16.0 | 144.2 | 16.0 | 208.3 | 15.0 | 288.4 | 16.0 | 381.4 | 16.0 | 474.5 | 16.0 | 567.5 | 16.0 | 660.5 | 16.0 | 747.6 | 16.0 | 818.7 | 10.1 | 873.8 |
| | | Celda 6 | Celda 9 | Celda 13 | Celda 18 | Celda 24 | Celda 30 | Celda 36 | Celda 42 | Celda 48 | Celda 53 | Celda 57 | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0.60 | 16.0 | 48.1 | 16.0 | 80.1 | 16.0 | 128.2 | 15.0 | 192.3 | 16.0 | 272.4 | 16.0 | 365.4 | 16.0 | 458.4 | 16.0 | 551.5 | 16.0 | 644.5 | 16.0 | 731.6 | 10.1 | 802.7 |
| | | Celda 3 | Celda 5 | Celda 8 | Celda 12 | Celda 17 | Celda 23 | Celda 29 | Celda 35 | Celda 41 | Celda 47 | Celda 52 | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0.30 | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 32.0 | 16.0 | 64.1 | 15.0 | 112.2 | 16.0 | 176.2 | 16.0 | 256.4 | 16.0 | 349.4 | 16.0 | 442.4 | 16.0 | 535.4 | 16.0 | 628.5 | 10 | 715.6 |
| | | Celda 1 | Celda 2 | Celda 4 | Celda 7 | Celda 11 | Celda 16 | Celda 22 | Celda 28 | Celda 34 | Celda 40 | Celda 46 | | | | | | | | | | | |
| Avance Parcial | | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.16 | | |
| Avance Acumulado | | 1.84 | 3.68 | 5.52 | 7.36 | 9.20 | 11.04 | 12.88 | 14.72 | 16.56 | 18.40 | 19.56 | | | | | | | | | | | |

Figura 2.7: Plan de vaciado de concreto masivo de la fundación del Molino de Bolas 02
Fuente: Información del proyecto

- Control de variables

Al igual que el proceso anterior, para conocer y controlar las temperaturas que experimentará el concreto masivo en el núcleo y la superficie durante su periodo de fraguado, se definirán puntos de medición de temperatura. Para esto se llevará a cabo la instalación de termocuplas en el núcleo y la superficie de la fundación, según la Figura 2.8. Las termocuplas a utilizar deberán registrar cada media hora las temperaturas que

presenta el concreto vaciado tanto en el núcleo como en la superficie, mientras dure el proceso de curado.

Cuando el registro de monitoreo de temperaturas demuestre una disminución de las temperaturas en el núcleo así como en la superficie, se analizará la continuidad de los trabajos sobre la fundación así como el retiro de la protección térmica superficial para que la masa libere temperatura. Uno de los controles recomendados, es verificar que la pérdida diaria de temperatura en la superficie de concreto no supere los 11°C.

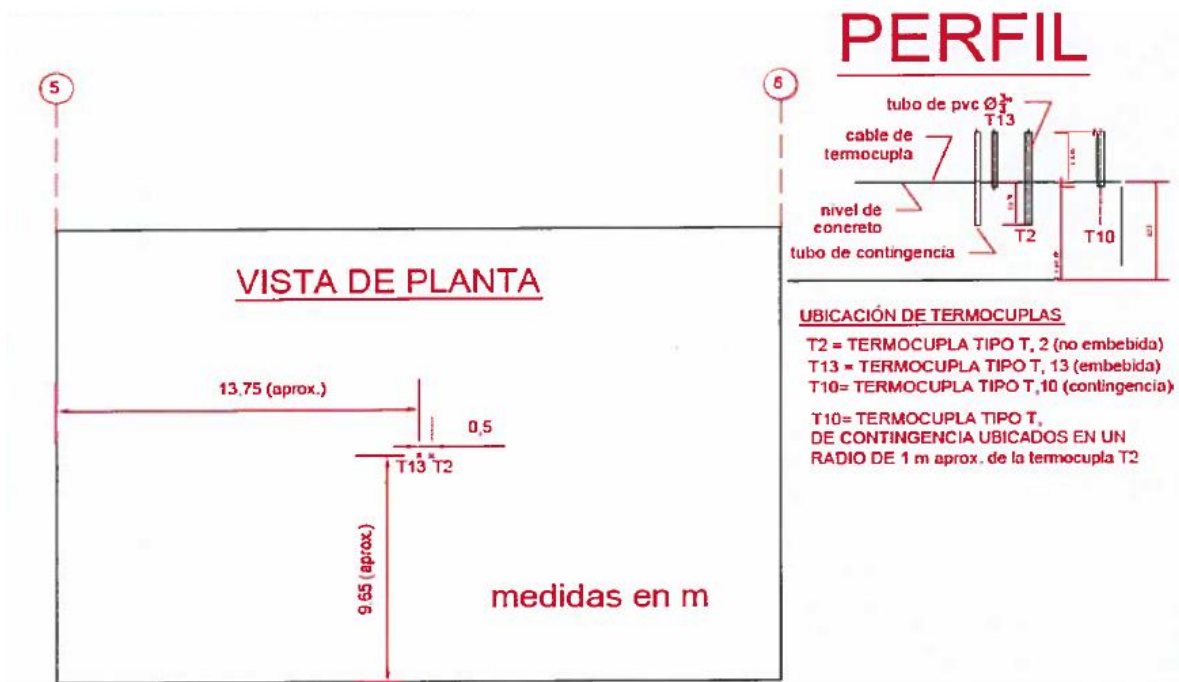


Figura 2.8: Ubicación de termocuplas en la fundación del Molino de Bolas 02.
Fuente: Información del proyecto

- Curado
Proceso igual al caso anterior.

- Desencofrado
Proceso igual al caso anterior.

3. ANÁLISIS TÉRMICO DEL ELEMENTO ESTRUCTURAL

3.1. Introducción

Este trabajo se enfocará en comparar el resultado del procedimiento descrito por el ACI 207.2R para predecir la temperatura máxima del concreto, con la evolución real de la temperatura al interior del concreto.

3.2. Información para el análisis

3.2.1. Propiedades Térmicas del Concreto

Para realizar el análisis térmico en un modelo es importante conocer los siguientes parámetros:

- Conducción térmica – k (kcal/m.h.°C)
- Calor específico – C_p (kcal/kg. °C)
- Coeficiente de transferencia de calor por convección – h_c (kcal/m².hr.°C)
- Difusividad térmica – h^2 (m²/h)
- Coeficiente de expansión térmica – r (1/°C)

Estos parámetros dependen de la edad del concreto, así como de la temperatura, tipo de cemento, la relación agua/cemento, tipo de agregado y el peso unitario. Sin embargo, estos parámetros son difíciles de determinar debido a la variación a lo largo del tiempo, por lo que se necesita de ensayos complejos. Es por esto, que existen tablas desarrolladas por el ACI con las que se puede obtener valores a través del método de extrapolación.

A continuación se describe brevemente cada uno de estos parámetros.

3.2.1.1. Conducción térmica

Es definida como el flujo uniforme de calor a través del espesor de un material entre dos superficies sujetas a temperaturas distintas. Es decir, la conductividad térmica es una medida de la capacidad de un material para conducir calor. Por ejemplo, $k = 0.522$ kcal/m.h.°C, para el agua, y $k = 68.96$ kcal/m.h.°C, para el hierro, a la temperatura ambiente, indica que el hierro conduce el calor más de 100 veces más rápido que el agua.

En el concreto, este parámetro depende de la densidad del concreto, tipo de agregado y del contenido de humedad del concreto. Además, según el ACI 207.2R, su valor ronda entre 1.7 y 2.3 kcal/m.h.°C, dependiendo de los agregados que se usaron, la temperatura que tenía, entre otros.

3.2.1.2. Calor específico

Los diferentes materiales almacenan calor en forma diferente y se ha definido la propiedad de calor específico como una medida de la capacidad de un material para almacenar energía térmica. Por ejemplo, $C_p = 1$ kcal/kg.°C, para el agua, y $C_p = 0.107$ kcal/kg · °C, para el hierro, a la temperatura ambiente, indica que el agua puede almacenar casi 10 veces más energía que el hierro por unidad de masa.

En el concreto, depende de los agregados pero sobretodo del calor específico y la porosidad de la pasta de cemento, el contenido de agua y las características de la temperatura. Además, según el ACI 207.2R su valor ronda entre 0.22 y 0.24 kcal/kg.°C.

3.2.1.3. Coeficiente de transferencia de calor por convección

El coeficiente de transferencia de calor por convección no es una propiedad del fluido o sólido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo.

3.2.1.4. Difusividad térmica

Representa cuán rápido se difunde el calor por un material. Entre mayor sea la difusividad térmica, más rápida es la propagación del calor hacia el medio. Para el concreto, los valores promedios son alrededor de 0.090 m²/día.

3.2.1.5. Coeficiente de expansión térmica

Es aquel parámetro que mide el cambio relativo de longitud que se produce en un cuerpo sólido o un fluido debido a un cambio de temperatura que conlleva a una dilatación térmica. Para el concreto, su valor varía entre 10 a 12 x 10⁻⁶ 1/°C.

3.2.2. Propiedades Elásticas del Concreto

Para realizar el análisis de esfuerzos en el modelo matemático es importante conocer los siguientes parámetros:

- Módulo de Elasticidad – E (kg/cm^2)
- Coeficiente de Poisson – ν
- Densidad – (kg/m^3)

3.2.2.1. Módulo de Elasticidad

Es una de las más importantes características del concreto. La Figura 3.1 muestra las distintas definiciones que puede adoptar el módulo de elasticidad del concreto simple: el módulo tangente inicial, el módulo tangente en un punto determinado de la curva y el módulo secante entre dos puntos de la misma. Esta última definición es la más utilizada para cargas de corta duración y se suele calcular para un esfuerzo cercano a $0.4 f_c$. El módulo de elasticidad tangente inicial, normalmente es un 10% mayor que el secante.

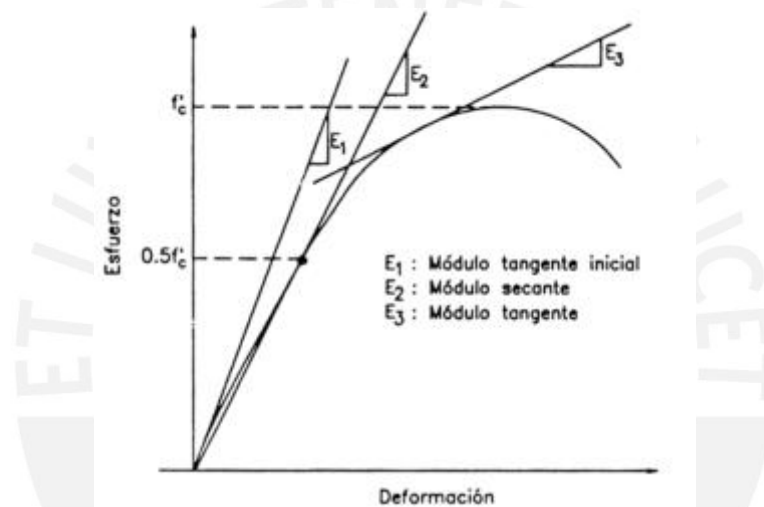


Figura 3.1: Módulo de elasticidad del concreto
Fuente: Ottazzi, 2004

El módulo de elasticidad de concreto depende de muchas variables, entre las principales están:

- El módulo de elasticidad de la pasta de cemento. Un incremento en la relación w/c aumenta la porosidad de la pasta reduciendo el módulo de elasticidad (E_c).
- El módulo de elasticidad de los agregados. Los agregados de peso normal tienen un módulo que varía entre 1.5 a 5 veces el módulo de elasticidad de la pasta. Por lo tanto, el tipo de agregado y la cantidad presente en la mezcla influyen fuertemente en el valor de E_c .
- Edad del concreto.
- La forma en cómo es colocado.

El módulo de elasticidad varía en los primeros 28 días de colocación, ya que este depende directamente del f'_c del concreto. Para concretos de peso normal

(aproximadamente 2 300 kg/m³) el ACI y la Norma Peruana permiten estimar E_c mediante:

$$E_c = 15\,000 f'_c$$

3.2.2.2. Coeficiente de Poisson

Por debajo del esfuerzo crítico (75% a 80% de f'_c) el Módulo de Poisson varía entre 0.11 y 0.21. Normalmente está en el rango de 0.15 a 0.20 y permanece aproximadamente constante bajo cargas sostenidas. En la práctica se suele adoptar $\mu = 0.15$.

3.2.2.3. Densidad

Este parámetro varía dependiendo de la cantidad y la densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado (con o sin aditivo) y las cantidades de agua y cemento. Los valores típicos de concreto convencional varían entre 2.4 y 2.6 kg/m³.

3.3. Análisis a realizar

3.3.1. Modelo térmico propuesto por el ACI 207.2R

En el Reporte del Capítulo 4 del Committee del ACI 207.2R, se muestra uno de los procedimientos que existen para predecir la temperatura máxima en el concreto, el cual utiliza series de ábacos en función de las dimensiones del elemento, del tipo de cemento, la temperatura de colocado y la temperatura del ambiente.

El procedimiento indicado consiste en:

- Hallar la relación entre el volumen y área de disipación (V/A).
- Hallar el porcentaje de calor disipado ($T_{\text{AMBIENTE}} < T_{\text{VACIADO}}$) o de calor absorbido ($T_{\text{AMBIENTE}} > T_{\text{VACIADO}}$) para luego, calcular la temperatura de vaciado efectivo (T_{PL}).
- Hallar la temperatura mínima del concreto (T_{MIN}).
- Hallar el incremento de temperatura para un cemento tipo I, el cual debe ser corregido para el tipo de cemento (T_c) y para el contenido de cemento (T_{c+f}) que se haya utilizado. Se obtiene la temperatura final (T_{FINAL}).
- Hallar el cambio final teórico final de temperatura (T_E).
- Hallar el gradiente de temperatura entre el interior y la superficie del elemento.
- Hallar el esfuerzo por temperatura.

A continuación, se realizará la estimación de la temperatura máxima que se generará debido al calor de hidratación. Es importante recordar que el valor máximo permitido es de 70 °C (PCA, 2004).

Todos los ábacos usados a continuación, pertenecen a este Reporte y se muestran desde la Figura 3.2. a la Figura 3.6.

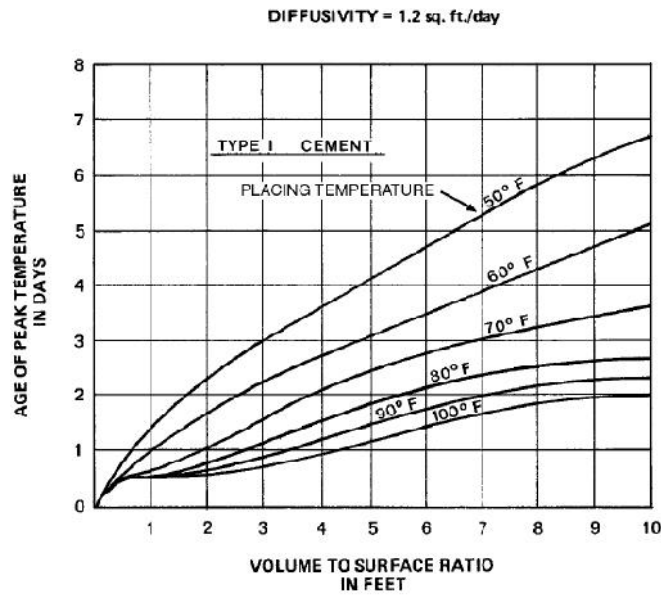


Figura 3.2: Efecto de la temperatura de colocación y de la exposición de la superficie en la edad que alcanza la temperatura máxima.
Fuente ACI 207.2R, 2007

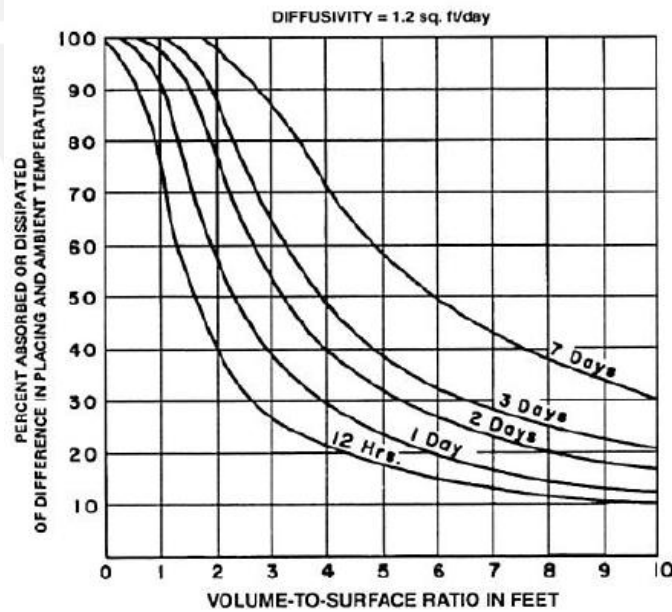


Figura 3.3: Flujo de calor entre el aire y el concreto por las diferencias de temperaturas de colocado y del ambiente.
Fuente ACI 207.2R, 2007

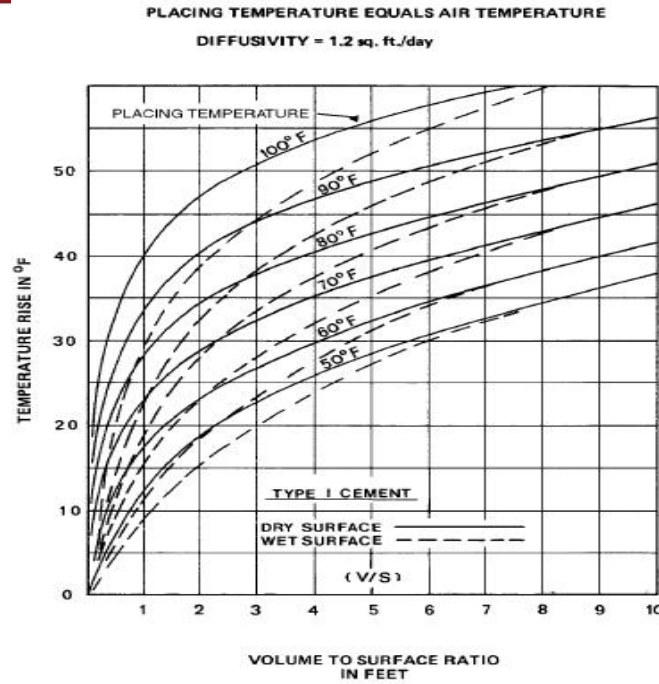


Figura 3.4. Incremento de temperatura de un elemento que contiene 223 kg/m^3 de cemento para diferentes temperaturas de colocación.
Fuente ACI 207.2R, 2007

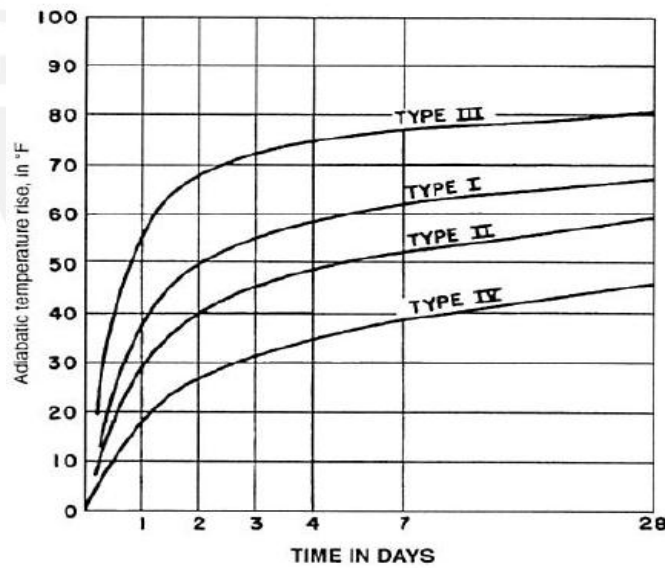


Figura 3.5: Incremento de temperatura de un elemento que contiene 223 kg/m^3 de cemento para diferentes tipos de cemento.
Fuente ACI 207.2R, 2007

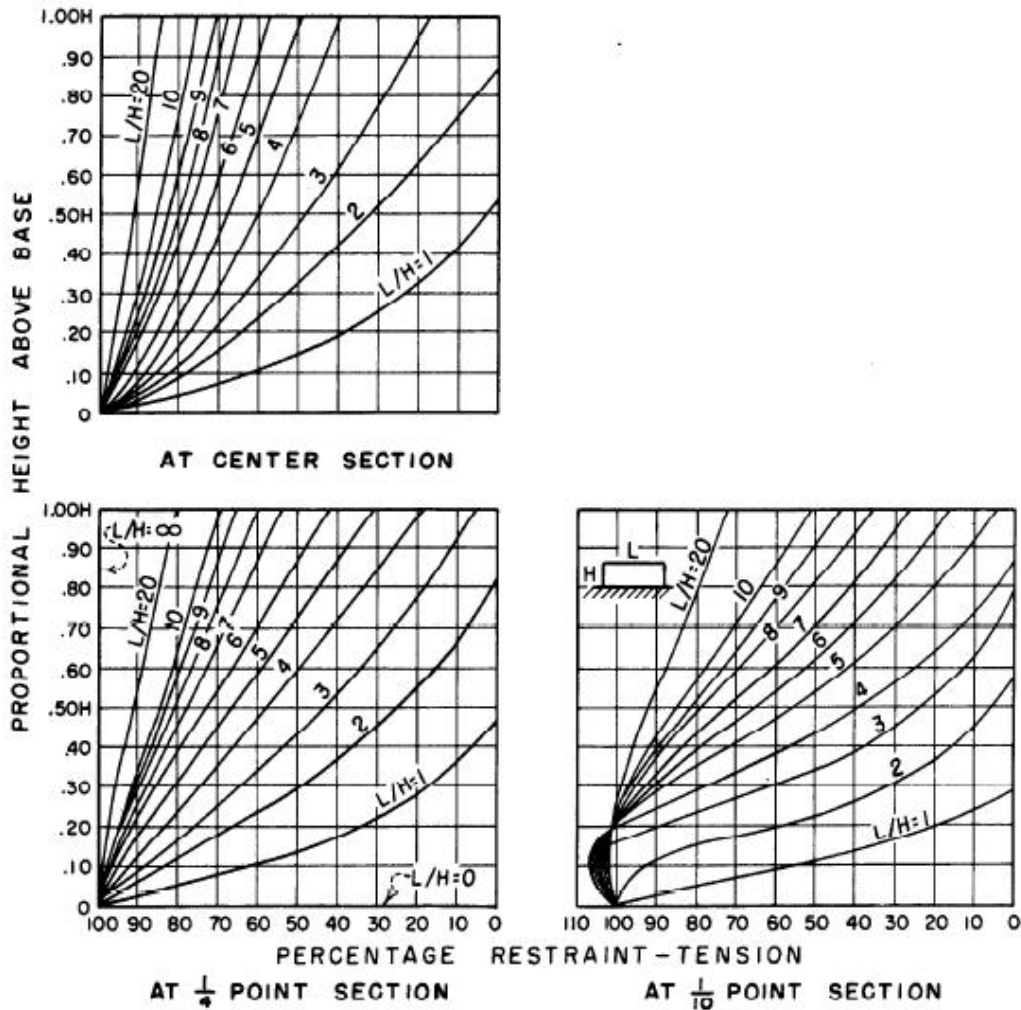


Figura 3.6: Factores de esfuerzos en el elemento estructural a analizar.
Fuente: U.S. Bureau of Reclamation, 1988.

3.3.1.1. Aplicación en la Fundación del Molino de Bolas 01 (21.40 m x 13.00 m x 2.40 m) – Condiciones frías

La cimentación presenta las siguientes condiciones de borde: las caras laterales encofradas con madera, la superficie superior expuesta y la base rocosa del terreno.

Además, el elemento posee una resistencia a la compresión $f'c = 315 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días de vaciado, contiene 450 kg/m^3 de cemento tipo IP, se considerará un valor de $0.096 \text{ m}^2/\text{día}$ de difusividad térmica (ACI 207, 1993), asumiendo un agregado de tipo granito (clasificación geológica de la cantera); así mismo, se asumirá un **encofrado de madera** para simular la situación más crítica.

Se considerará las temperaturas iniciales que aparecen en la tabla 3.1:

| ITEM | SIMBOLO | VALOR (°C) |
|-----------------------------|-----------|------------|
| Temperatura de colocación | T_{COL} | 13 |
| Temperatura de ambiente | T_{AMB} | 8 |
| Temperatura de terreno | T_M | 7 |
| Temperatura mínima promedio | T_A | 5 |

Tabla 3.1: Temperaturas Iniciales de la Estructura.

- a) En primer lugar, se debe hallar la relación V/A para un ancho unitario (donde V : Volumen y A : Área de disipación), en este caso se escogerá la situación más crítica, es decir la longitud mayor. Se debe de tener en cuenta, que para efectos de aislamiento por **cada 1"** de encofrado de **madera** es equivalente a **20" de concreto** equivalente a cada lado del elemento.

$$V = 2.40 * \left(21.4 + 2 * \frac{20}{12} * 0.3054 \right) = 53.8 \text{ m}^3 \text{ (por ml)}$$

$$A = (2.4 + 2.4 + 21.4) = 26.2 \text{ m}^2 \text{ (por ml)}$$

$$\frac{V}{A} = \frac{53.8}{26.2} = 2.05 \text{ m} = \mathbf{6.73 \text{ pie}}$$

La relación V/A representa la distancia promedio que atraviesa el calor disipado del concreto.

- b) Para hallar la temperatura de vaciado efectivo T_{PL} , se procede a usar el ábaco de la Figura 3.2, de donde se obtiene que la **temperatura máxima** se alcanzará en **4 1/2 días**, debido a la aproximación para una difusividad de 0.096 m²/día. Para este valor se ha ignorado los efectos del cemento Tipo IP. Se va a considerar que el elemento se encuentra en un microclima, por lo que la temperatura del ambiente (T_{AMB}) será de **8 °C**.

Luego, se procede a usar la información extraída de la Figura 3.3 para obtener el porcentaje de calor disipado ($\%C_{dis}$) por la diferencia de temperaturas de colocado y del ambiente ($T_{AMB} < T_{COL}$), que es aproximadamente **36%**.

Se procede a hallar el valor de temperatura efectiva de vaciado:

$$T_{PL} = T_{col} + \%C_{dis}(T_{amb} - T_{col})$$

$$T_{PL} = 13 + 0.36(8 - 13) = \mathbf{11.2^\circ C}$$

- c) El siguiente paso es determinar la temperatura mínima del concreto en la cara expuesta contra el terreno luego de unas semanas (T_{min}). Para esto, se usa los registros de temperatura de ambiente de la zona para determinar la temperatura mínima promedio (T_A). Debido a que el elemento estructural se encuentra en el interior de un **microclima**, la temperatura mínima será de **5 °C**. Es importante considerar, que luego de las primeras dos semanas el elemento estará desencofrado por lo que la nueva relación V/A será:

$$\frac{V}{A} = \frac{2.4 * 21.4}{2.4 + 2.4 + 21.4} = 1.96 \text{ m} = 77.18 \text{ in}$$

La fórmula para hallar la temperatura mínima se calcula con la relación V/A en pulgadas.

El último paso para determinar T_{min} luego de unas semanas, es seleccionar la temperatura de la base rocosa (T_M). Se puede asumir la temperatura inicial del suelo como la temperatura de ambiente promedio mensual de los últimos 3 meses, por lo que será **7 °C** (datos extraídos de registros de la zona).

$$T_{min} = T_A + \frac{2(T_M - T_A)}{3} \sqrt{\frac{V}{A} \cdot \frac{1}{96}}$$

$$T_{min} = 5 + \frac{2(7 - 5)}{3} \sqrt{\frac{77.18}{96}} = 6.2 \text{ °C}$$

- d) Finalmente, a partir de la Figura 3.4, se obtiene que para un cemento Tipo I, con una superficie expuesta húmeda, a una **temperatura efectiva de vaciado (T_{PL})** de **11.2 °C** y V/A de **2.05 m**; **el incremento de temperatura** es de **19.4 °C**.

Este resultado debe ser **corregido** usando la información del ábaco de la Figura 3.5, donde se describe el incremento de la temperatura adiabática para distintos tipos de cemento y un contenido de 223 kg/m^3 se asumirá que se puede **usar la curva** correspondiente a un **cemento Tipo II**, debido a que en nuestro país solo se comercializa el cemento Tipo IP y no el cemento mencionado. La corrección

se realizará usando los valores para una edad de temperatura pico de 4 días y medio:

$$T_C = 19.4 * \left(\frac{27.5}{33.1}\right) = 16.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Además, se debe realizar otra **corrección** debido al **contenido de cemento** de la mezcla, ya que el gráfico es para un contenido de 223 kg/m³:

$$T_{C+F} = 16.2 * \left(\frac{450}{223}\right) = 32.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por lo que la temperatura pico transcurridos los cuatro y medio primeros días será:

$$T_{FINAL} = 11.2 + 32.6 = 43.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- e) Se puede determinar el cambio final efectivo **teórico** de temperatura que tendrá considerando la diferencia entre la temperatura pico y la temperatura mínima:

$$T_E = (T_{PL} + T_{C+F}) - T_{min}$$

$$T_E = (11.2 + 32.6) - 6.2 = 37.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- f) De los resultados se obtiene que a partir de una temperatura efectiva de vaciado de **11.2 °C**, se obtendrá una **temperatura máxima de 44 °C** aproximadamente, como se puede apreciar en la Figura 3.7.

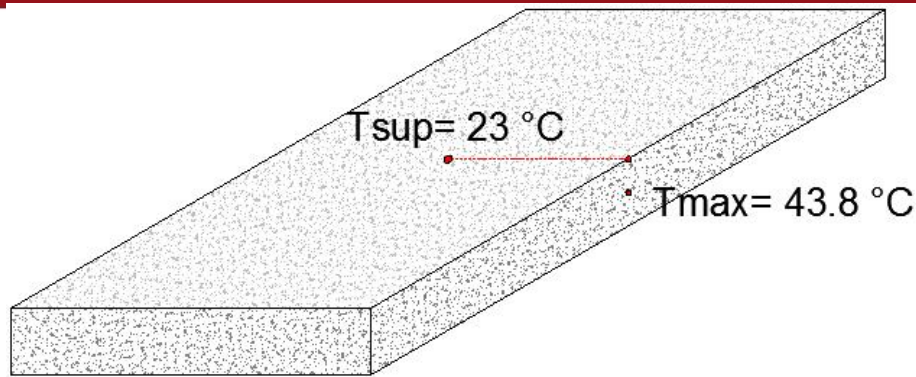


Figura 3.7: Resultados finales en el elemento estructural a analizar.
Fuente: Imagen propia

Se debe recalcar que la norma establece medir el gradiente de temperatura entre el interior del concreto y una capa superficial del elemento. Es decir, no realizar la comparación con la temperatura de la cara expuesta a en la superficie, ya que se obtendrán deltas mayores. Sin embargo, como el método solo indica una temperatura máxima, se realizará una estimación de la temperatura de la superficie a partir de la temperatura de ambiente, la cual considerará el uso de microclima.

Para este caso se ha estimado que la temperatura mínima de la superficie de concreto durante los primeros días será la $T_{AMB} + 15\text{ °C}$, es decir 23 °C . Este valor es referencial y depende de cada proyecto.

A partir de esto se generará un **gradiente térmico** de 20.8 °C . Como ya se mencionó anteriormente, cuando se genera un delta de temperatura entre la superficie y el interior mayor a los 20 °C es probable que el concreto se agriete a una edad temprana. Aparentemente, al tener un gradiente similar al de 20 °C , el elemento no sufrirá agrietamiento térmico.

- g) Sin embargo, se debe evaluar el esfuerzo que realmente se genera en la superficie del concreto utilizando la fórmula de esfuerzos por temperatura.

Para evaluar el esfuerzo que se genera, se debe considerar los efectos del tamaño del bloque de concreto por lo que se procede a usar la ecuación modificada para esfuerzos térmicos para largos bloques de concreto, dada por el U.S. Bureau of Reclamation, donde se incluye un factor de restricción en función del largo y la altura del elemento:

$$\sigma = R * E_{ef} * \alpha * (T_2 - T_1)$$

donde:

σ : esfuerzo térmico (kg/cm²)

R: factor de restricción

E_{ef} : módulo de elasticidad efectivo (kg/cm²)

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

T: temperatura (°C)

En adición, el módulo de elasticidad efectivo se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{ef} = \frac{1}{1 + 0.4 \frac{E_c}{E_r}} E_c$$

donde:

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

E_r : módulo de elasticidad de la base rocosa (kg/cm²)

Tener en cuenta que los valores del módulo de elasticidad del concreto varían según su edad, ya que es directamente proporcional a la resistencia del concreto. Sin embargo, el coeficiente de expansión térmica no varía significativamente con la edad. Se considera que tiene un valor promedio de **9.5 x 10⁻⁶ 1/°C**, asumiendo un agregado tipo granito (Davis, 1930), a partir de los resultados de los ensayos a las canteras utilizadas.

Se considera que a los cuatro días y medio, el concreto alcanzará una resistencia del **65%**, por lo que, el módulo de elasticidad del concreto se obtiene a partir de la siguiente fórmula (Norma E.060):

$$E_c = 15000 \sqrt{f'c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$E_c = 15000 \sqrt{315 \times 0.65} = 2.1 \times 10^5 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

El módulo de elasticidad de la base rocosa se encuentra entre un rango de 2 a 6×10^5 kg/cm^2 (Farner, 1968), por lo que se escogerá un valor promedio de 4×10^5 kg/cm^2 . Con estos datos, se obtiene un módulo de elasticidad efectiva E_{ef} de 1.8×10^5 kg/cm^2 .

El factor de restricción es un valor en función de la longitud del bloque y de su altura sobre la cimentación. El ábaco de la Figura 3.6, es usado para obtener los esfuerzos uniaxiales que se generan en la parte superior del bloque. Este ábaco indica cuales son los valores que normalmente se usan para el factor en mención. Para esta situación se usará el cuadro que se refiere a la sección del centro, de la que se obtiene un $R=70\%$ por lo que la relación L/H será de 8.9. Consecuentemente el esfuerzo por temperatura será el siguiente:

$$\sigma = 0.7 * 1.77 * 10^5 * 9.5 * 10^{-6} * (43.8 - 23) = 24.5 \text{ kg/cm}^2$$

La resistencia a la tracción del concreto equivale al 12% del $f'c$, es decir un valor de 24.6 kg/cm^2 . Por lo que se concluye que si bien el esfuerzo no sobrepasa el valor de la resistencia a tracción, el valor de 24.5 kg/cm^2 es cercano a 24.6 kg/cm^2 ($f't$) y sería recomendable tomar ciertas precauciones, como las ya mencionadas anteriormente, para evitar el agrietamiento por deltas térmico.

Por lo que se puede concluir que el esfuerzo por temperatura cumple con la resistencia a la tracción del concreto, por lo que no genera un gradiente mayor a 20°C . En el Anexo B, se encuentran las hojas de cálculo que se utilizaron para el cálculo de temperatura máxima.

3.3.1.2. Aplicación en la Fundación del Molino de Bolas 02 (29.05 m x 19.56 m x 1.75 m) – Condiciones Templadas

La cimentación presenta las siguientes condiciones de borde: las caras laterales encofradas con madera, la superficie superior expuesta y la base rocosa del terreno.

Además, el elemento posee una resistencia a la compresión $f'c = 280$ kg/cm^2 a los 28 días de vaciado, contiene 365 kg/m^3 de cemento tipo HE (que equivale a un tipo III, según la descripción del PCA), se considerará un valor de 0.096 $\text{m}^2/\text{día}$ de difusividad térmica, asumiendo un agregado de tipo granito (ACI 207, 1993); así mismo, se asumirá un encofrado de madera para simular la situación más crítica.

Se considerará las temperaturas iniciales que aparecen en la tabla 3.2:

| ITEM | SIMBOLO | VALOR (°C) |
|-----------------------------|-----------|------------|
| Temperatura de colocación | T_{COL} | 28 |
| Temperatura de ambiente | T_{AMB} | 17 |
| Temperatura de terreno | T_M | 16 |
| Temperatura mínima promedio | T_A | 5 |

Tabla 3.2: Temperaturas Iniciales de la Estructura.

- a) En primer lugar, se debe hallar la relación V/A para un ancho unitario (donde V : Volumen y A : Área de disipación), en este caso se escogerá la situación más crítica, es decir la longitud mayor. Al igual que el caso anterior, se considera los efectos de aislamiento del encofrado de madera.

$$V = 1.75 * \left(29.03 + 2 * \frac{20}{12} * 0.3054 \right) = 52.6 \text{ m}^3 \text{ (por ml)}$$

$$A = (1.75 + 1.75 + 29.03) = 32.5 \text{ m}^2 \text{ (por ml)}$$

$$\frac{V}{A} = \frac{52.6}{32.5} = 1.62 \text{ m} = \mathbf{5.29 \text{ pie}}$$

La relación V/A representa la distancia promedio que atraviesa el calor disipado del concreto.

- b) Para hallar la temperatura de vaciado efectivo T_{PL} , se procede a usar el ábaco de la Figura 3.2, de donde se obtiene que la **temperatura máxima** se alcanzará en **2 días**, teniendo las mismas consideraciones del primer caso. Para este valor se ha tomado en cuenta los efectos del cemento Tipo HE (alta resistencia a edades tempranas). La temperatura del ambiente (T_{AMB}) será de **17 °C**.

Se procede a usar la información extraída de la Figura 3.3 para obtener el porcentaje de calor disipado ($\%C_{dis}$) por la diferencia de temperaturas de colocado y del ambiente ($T_{AMB} < T_{COL}$), que es aproximadamente **30%**.

Se procede a hallar el valor de temperatura efectiva de vaciado:

$$T_{PL} = T_{col} + \%C_{dis}(T_{amb} - T_{col})$$

$$T_{PL} = 28 + 0.30(17 - 28) = \mathbf{24.7 \text{ °C}}$$

- c) Procedemos a determinar la temperatura mínima del concreto en la cara expuesta contra el terreno luego de unas semanas (T_{min}). Para esto, se usa los registros de temperatura de ambiente de la zona para determinar la temperatura mínima promedio (T_A). La temperatura mínima que alcanza en la zona es de **5 °C**. Es importante considerar, que luego de las primeras dos semanas el elemento estará desencofrado por lo que la nueva relación V/A será:

$$\frac{V}{A} = \frac{1.75 \cdot 29.03}{1.75 + 1.75 + 29.03} = 1.56 \text{ m} = 61.48 \text{ in}$$

La fórmula para hallar la temperatura mínima se calcula con la relación V/A en pulgadas.

Se selecciona la temperatura de la base rocosa (T_M). En este caso, se puede asumir la temperatura inicial del suelo será **16 °C** (datos extraídos de registros de la zona).

$$T_{min} = T_A + \frac{2(T_M - T_A)}{3} \sqrt{\frac{V}{A} \cdot \frac{1}{96}}$$

$$T_{min} = 5 + \frac{2(16 - 5)}{3} \sqrt{\frac{61.48}{96}} = 10.9 \text{ °C}$$

- d) Finalmente, a partir de la Figura 3.4, se obtiene que para un cemento Tipo I, con una superficie expuesta húmeda, a una **temperatura efectiva de vaciado (T_{PL}) de 24.7 °C y V/A de 1.62 m; el incremento de temperatura es de 23.9 °C.**

Como ya se mencionó anteriormente, este resultado debe ser **corregido** usando la información del ábaco de la Figura 3.5, donde se describe el incremento de la temperatura adiabática para distintos tipos de cemento y un contenido de 223 kg/m³. La corrección se realizará usando los valores para una edad de temperatura pico de 2 días:

$$T_C = 23.9 \left(\frac{37.8}{27.8} \right) = 32.5 \text{ °C}$$

Además, se debe realizar otra **corrección** debido al **contenido de cemento** de la mezcla, ya que el gráfico es para un contenido de 223 kg/m³:

$$T_{C+F} = 32.5 \left(\frac{365}{223} \right) = 53.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por lo que la temperatura pico transcurridos los dos primeros días será:

$$T_{FINAL} = 24.7 + 53.2 = 77.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- e) Al igual que en el caso anterior, se puede determinar el cambio final efectivo **teórico** de temperatura que tendrá considerando la diferencia entre la temperatura pico y la temperatura mínima:

$$T_E = (T_{PL} + T_{C+F}) - T_{min}$$

$$T_E = (24.7 + 53.2) - 10.87 = 67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- f) De los resultados se obtiene que a partir de una temperatura efectiva de vaciado de **24.7 °C**, se obtendrá una **temperatura máxima de 78 °C** aproximadamente, como se puede apreciar en la Figura 3.8.

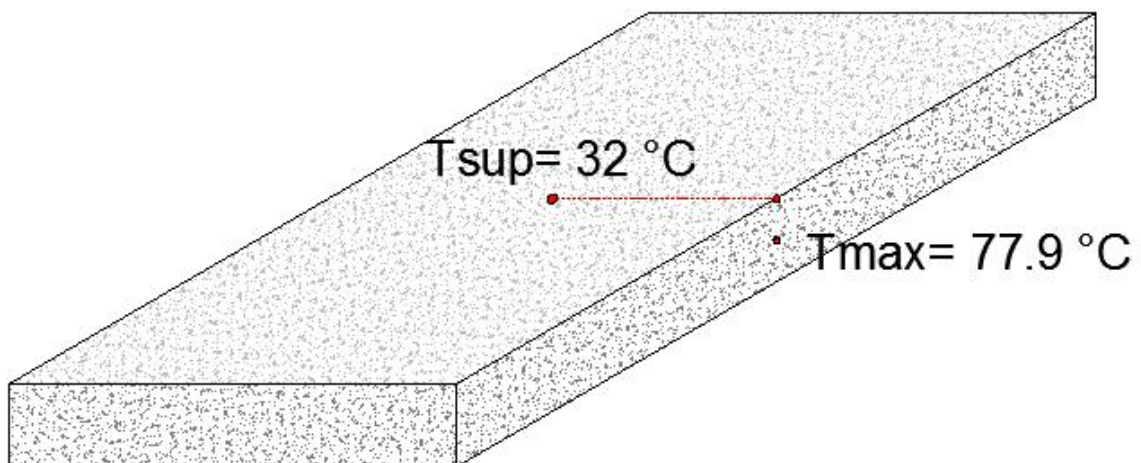


Figura 3.8: Resultados finales en el elemento estructural a analizar.
Fuente: Imagen propia

Nuevamente, se realizará una estimación de la temperatura de la superficie a partir de la temperatura de ambiente.

La temperatura mínima durante los primeros días del concreto será la $T_{AMB} + 15$ °C, es decir **32°C**. Este valor es referencial y depende de cada proyecto, el cuál debe ser verificado con el uso de las termocuplas.

A partir de esto se generará un **gradiente térmico** de **45.9 °C**. Como ya se mencionó anteriormente, cuando se genera un delta de temperatura entre la superficie y el interior mayor a los 20 °C es muy probable que el concreto se agriete a una edad temprana. Esta situación será analizada en el siguiente capítulo.

- g) Sin embargo, se debe evaluar el esfuerzo que realmente se genera y si los esfuerzos de tracción resultantes pueden agrietar el concreto. Se utiliza la anterior fórmula usando los parámetros de este caso.

Se considera que para un concreto con cemento Tipo HE (III), a los dos días se alcanzará una resistencia del **60%** (PCA, 2004), por lo que, el módulo de elasticidad del concreto se obtiene a partir de la siguiente fórmula (Norma E.060):

$$E_c = 15000 \sqrt{f'_c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$E_c = 15000 \sqrt{280 \times 0.60} = 1.9 \times 10^5 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Se usa un valor promedio de 4×10^5 kg/cm² para el módulo de elasticidad del suelo. Con estos datos, se obtiene un módulo de elasticidad efectiva E_{ef} de **1.6 x 10⁵ kg/cm²**.

Como ya se mencionó, del ábaco de la Figura 3.6 se obtienen los esfuerzos uniaxiales que se generan en la parte superior del bloque. A partir de una relación L/H de 16.6 se obtiene un R=82% por lo que consecuentemente el esfuerzo por temperatura será el siguiente:

$$\sigma = 0.82 \cdot 1.62 \cdot 10^5 \cdot 9.5 \cdot 10^{-6} \cdot (77.9 - 32) = 58.2 \text{ kg/cm}^2$$

La resistencia a la tracción del concreto está en el orden del 10% al 12% del $f'c$ lo que equivale a **20.16 kg/cm²**. Por lo que se puede concluir que el esfuerzo por temperatura sobrepasa a la resistencia a la tracción del concreto generando un gradiente mayor a 20°C en más del doble por lo que es urgente tener consideraciones para el diseño de la mezcla.

En el Anexo B, se encuentran las hojas de cálculo que se utilizaron para el cálculo de temperatura máxima.



4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Resultados obtenidos

4.1.1. Caso 01 – Condiciones frías

En el proyecto ubicado en la localidad de Ayacucho se colocó termocuplas en el interior y a 0.05 m de la superficie en el centro y a los lados del elemento estructural, con el fin de registrar las temperaturas del concreto. En total se instalaron 6 termocuplas. Además, se colocó un termómetro para medir la temperatura del ambiente dentro del micro clima.

Los datos de temperatura fueron tomados manualmente durante los primeros 6 días en la noche y en el día. Se hicieron registros cada 2 a 5 horas de cada una de las termocuplas. En las Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3 se muestran los gráficos de los registros de temperaturas ubicadas en el centro, lado izquierdo y lado derecho del elemento, respectivamente.

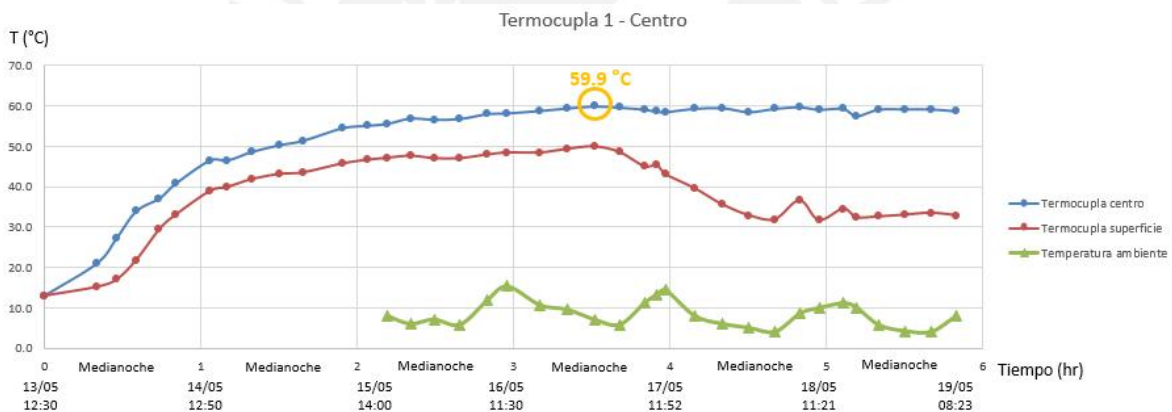


Figura 4.1: Datos de temperatura adquiridos de una de las losas de cimentación. Muestreo en la zona del centro.
Fuente: Información del proyecto

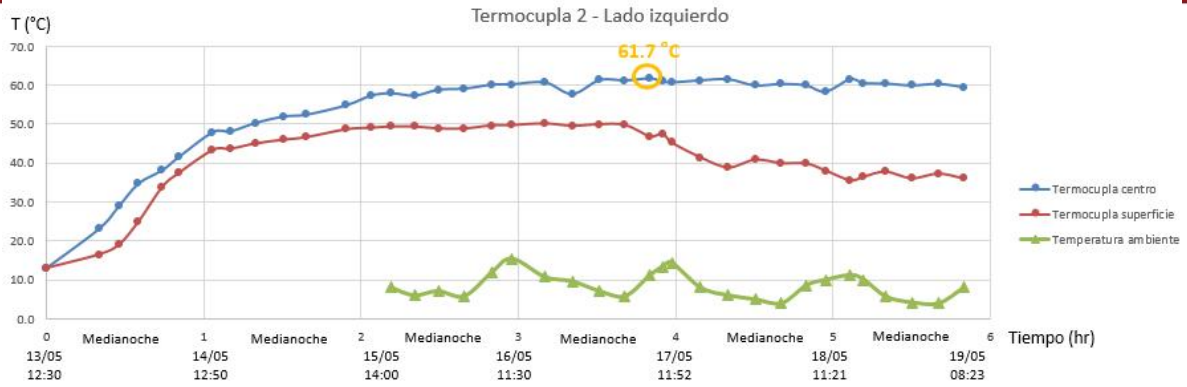


Figura 4.2: Datos de temperatura adquiridos de una de las losas de cimentación. Muestreo en la zona izquierda. Fuente: Información del proyecto

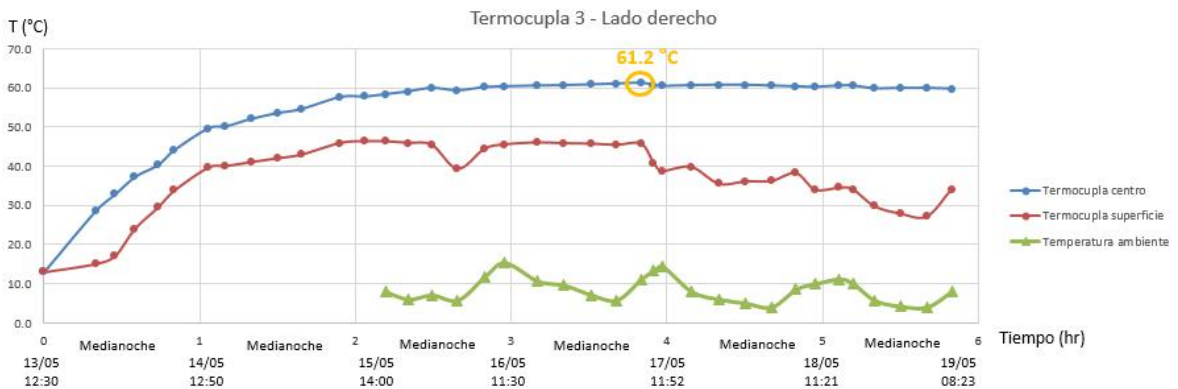


Figura 4.3: Datos de temperatura adquiridos de una de las losas de cimentación. Muestreo en la zona derecha. Fuente: Información del proyecto

La temperatura alcanzó un máximo de 59.9 °C en el centro, 61.7 °C en el lado izquierdo, y 61.2 en el lado derecho; alrededor de los 3 días y medio después del inicio del vaciado del concreto. En todos los casos, se observa que la temperatura del centro no decrece luego del 6to día de vaciado.

A su vez, la máxima temperatura alcanzada en la superficie del elemento fue de 49.9 °C, 50.1°C, 46.3 °C; en el centro, el lado izquierdo, y el lado derecho, respectivamente. Se aprecia que luego del 4to día, la temperatura de la superficie decrece ligeramente hasta alcanzar una temperatura promedio de 33.5 °C antes del 6to día.

Se aprecia que el concreto es vaciado a una temperatura promedio de 13 °C, la cual empieza a elevarse bruscamente en el centro, seguido por una elevación de la temperatura en la superficie de la losa. Se presentaron distintos deltas de temperatura

a lo largo del elemento. En el centro, el más alto diferencial de temperatura en el núcleo y la superficie de la losa fue de alrededor de 27.4 °C, alcanzado luego de 4 días y medio de vaciado; en el lado izquierdo, fue de 26 °C luego de 5 días; y en el lado derecho fue de 32.7 °C luego de 5 días y medio.

La temperatura del medio ambiente se registró a partir del 2do día hasta el 6to día luego del vaciado de concreto, presentando temperaturas máximas y mínimas de 15.4 y 4.0 °C, respectivamente. El registro completo de temperaturas se puede apreciar en el Anexo C.

4.1.2. Caso 02 – Condiciones templadas

En el proyecto ubicado en la localidad de Arequipa se colocó de forma similar termocuplas en el interior y a 0.05 m de la superficie, con el fin de registrar las temperaturas del concreto. En total se instalaron 2 termocuplas en el centro. Además, se colocó un termómetro para medir la temperatura del ambiente dentro del micro clima.

Los datos de temperatura fueron tomados manualmente durante los primeros 7 días durante la noche y el día. Se hicieron registros pasando 1 hora en cada una de las termocuplas. En la Figura 4.4, se muestra el gráfico del registro de temperaturas correspondientes al centro del elemento.

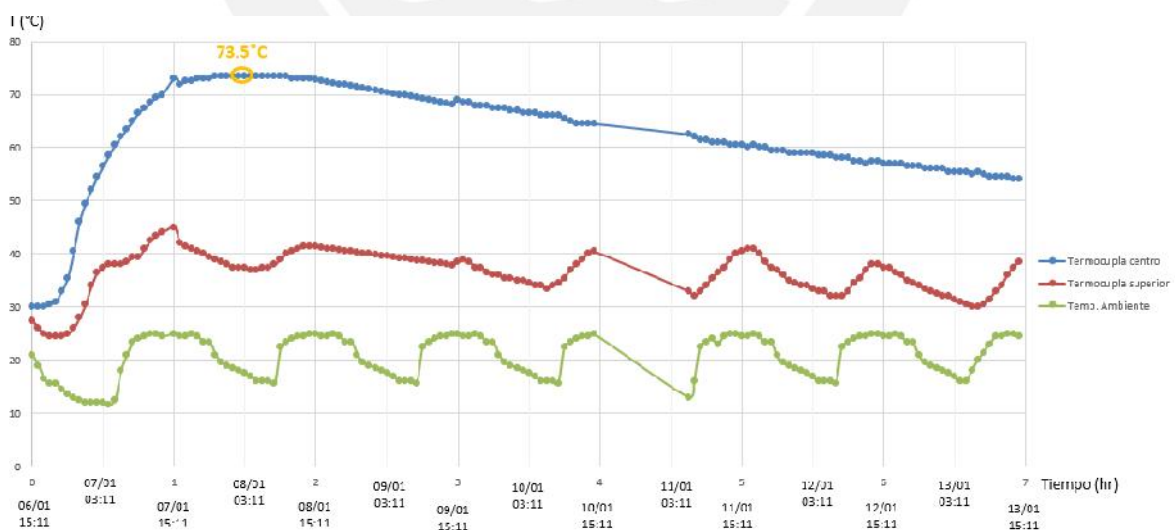


Figura 4.4: Registros de temperatura en la losa de cimentación. Muestreo en la zona del centro.

Fuente: Información del proyecto

La temperatura alcanzó un máximo de 73.5 °C en el centro, luego de un día y medio después del inicio del vaciado del concreto. Se observa que la temperatura del centro, alcanza su pico dentro de los dos primeros días de vaciado para luego decrecer hasta permanecer constante.

A su vez, la máxima temperatura alcanzada en la superficie del elemento fue de 45 °C. Se aprecia que en todo momento la temperatura de la superficie expuesta, sigue de manera casi paralela a las variaciones de la temperatura del ambiente entre la madrugada y el día.

Se aprecia que el concreto es vaciado a una temperatura promedio de 28 °C, la cual empieza a elevarse bruscamente en el centro, seguido por una elevación de la temperatura en la superficie de la losa. Se presentaron distintos deltas de temperatura a lo largo del elemento. En el centro, el más alto diferencial de temperatura en el núcleo y la superficie de la losa fue de alrededor de 36.5 °C, alcanzado luego del primer día de vaciado.

La temperatura del medio ambiente se registró desde el día del vaciado hasta el 7mo día, presentando temperaturas máximas y mínimas de 25.0 y 11.5 °C, respectivamente. El registro completo de temperaturas se puede apreciar en el Anexo C.

4.2. Análisis de resultados

4.2.1. Caso 01 – Condiciones frías

El primer caso que se evaluó fue el vaciado de una fundación de un Molino de Bolas en condiciones frías, en las cuales se obtuvo registro de temperaturas de distintos puntos del elemento.

En el modelo brindado por el ACI 207.2, se consideró condiciones iniciales similares a lo que finalmente se tuvo en el campo, tal y como se puede apreciar en la Tabla 4.1:

| CONDICIÓN INICIAL | T vaciado (°C) | T ambiente (°C) | T min (°C) | T base rocosa (°C) |
|-------------------|----------------|-----------------|------------|--------------------|
| ACI 207.2 | 13.0 | 8.0 | 5.0 | 7.0 |
| CAMPO | 11.0 | 8.4 | 4.0 | - |

Tabla 4.1: Temperaturas iniciales.

Fuente: Información del proyecto.

Se puede apreciar que la temperatura de vaciado inicial utilizada en el procedimiento, es 2.0 °C menor que las condiciones dadas en campo. A su vez, la temperatura promedio de ambiente y la temperatura mínima del ambiente fueron similares en el campo.

Se recuerda que se ubicaron termocuplas en tres ubicaciones de la fundación: en el centro y a ambos lados. La Tabla 4.2. nos muestra los resultados del método del ACI 207.2 comparados con los registros de temperatura obtenidos en campo:

| SITUACIÓN | T máx (°C) | Día del Tmáx | T en el día Tmáx (°C) | T máx(°C) |
|-------------------|------------|--------------|-----------------------|-----------|
| ACI 207.2 | 43.8 | 4 1/2 | - | 20.8 |
| CAMPO - CENTRO | 59.9 | 3 1/2 | 10.0 | 27.4 |
| CAMPO - IZQUIERDA | 61.7 | 3 1/2 | 14.8 | 26.0 |
| CAMPO - DERECHA | 61.2 | 3 1/2 | 15.5 | 32.7 |

Tabla 4.2: Registro de temperaturas en el campo.

Fuente: Información del proyecto

El método del ACI 207.2, da como resultado una temperatura máxima de 43.8 °C alcanzada a cuarto día y medio. Considerando que la temperatura de la superficie podría estar entre 15°C más que la temperatura promedio de ambiente, esta alcanza un máximo de 23 °C, por lo que el diferencial de temperatura que se puede alcanzar es de 20.8 °C. Recordar que este diferencial es un referencial que se utiliza para aproximar los esfuerzos que se generan por el delta térmico.

Según el método del ACI 207.2, en el cuarto día y medio se alcanza un pico de temperatura, no obstante, el registro de temperaturas indica que el pico se obtuvo al tercer día y medio como se puede apreciar en la Figura 4.5:

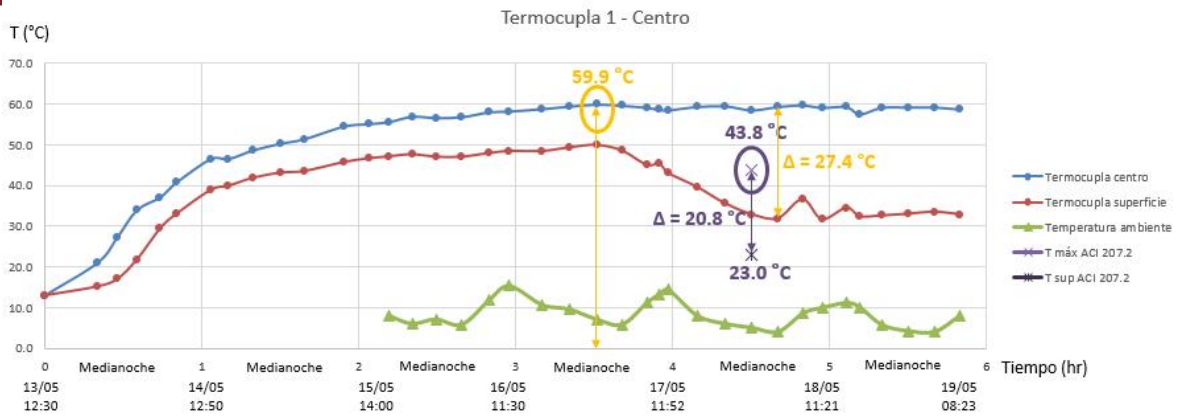


Figura 4.5: Análisis del método ACI 207.2 y campo.
Fuente: Información del proyecto

En la Figura 4.5. se puede apreciar que las temperaturas máximas para ambos casos distan de $16.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los deltas de temperatura, de $6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Al mismo tiempo, el delta real cuando el elemento experimenta el pico de su temperatura, es de $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La diferencia entre las temperaturas máximas representa el 27% del valor máximo, por lo que se podría decir que el resultado del método distancia en casi la tercera parte de la temperatura real alcanzada. Asimismo, el delta representa el 25% del valor real pero el delta obtenido desde el método del ACI ha sido asumido por lo que no es representativo para evaluar en sí la finalidad del procedimiento.

De manera similar sucede en las termocuplas ubicadas al lado izquierdo y derecho, la temperatura máxima obtenida de la técnica estudiada difiere en un 29% para ambas termocuplas, lo cual confirma que con las consideraciones tomadas el resultado tiene una variación considerable respecto al registro real.

4.2.2. Caso 02 – Condiciones templadas

En el caso donde el proyecto se encuentra en una zona de menor altitud las temperaturas no llegan a ser tan extremas. Se evaluó el vaciado de la fundación del Molino de Bolas en condiciones templadas, en las cuales se obtuvo un registro de temperaturas del centro del elemento.

En el modelo brindado por el ACI 207.2, se consideró condiciones iniciales similares a lo que finalmente se tuvo en el campo, tal y como se puede apreciar en la Tabla 4.3:

| CONDICIÓN INICIAL | T vaciado (°C) | T ambiente (°C) | T min (°C) | T base rocosa (°C) |
|-------------------|----------------|-----------------|------------|--------------------|
| ACI 207.1 | 28.0 | 17.0 | 5.0 | 16.0 |
| CAMPO | 28.0 | 20.6 | 11.5 | - |

Tabla 4.3: Temperaturas iniciales.

Fuente: Información del proyecto.

Se puede apreciar que la temperatura de vaciado inicial utilizada en el procedimiento, es la misma que las condiciones dadas en campo. No obstante, la temperatura promedio de ambiente y la temperatura mínima del ambiente fueron mayores en el campo.

La Tabla 4.4 nos muestra los resultados del método del ACI 207.2 comparados con los registros de temperatura obtenidos en campo:

| SITUACIÓN | T max (°C) | Día del Tmax | T en el día Tmax (°C) | T max(°C) |
|----------------|------------|--------------|-----------------------|-----------|
| ACI 207.2 | 77.9 | 2 | - | 45.9 |
| CAMPO - CENTRO | 73.5 | 1 1/2 | 36.0 | 36.5 |

Tabla 4.4: Registro de temperaturas en el campo.

Fuente: Información del proyecto

El método del ACI 207.2, da como resultado una temperatura máxima de 77.9 °C alcanzada al segundo día. Considerando que la temperatura de la superficie podría estar entre 15°C más que la temperatura promedio de ambiente, esta alcanza un máximo de 32 °C, por lo que el diferencial de temperatura que se puede alcanzar es de 45.9 °C. Recordar que este diferencial es un referencial que se utiliza para aproximar los esfuerzos que se generan por el delta térmico.

Según el método del ACI 207.2, en el segundo día se alcanza un pico de temperatura, no obstante, el registro de temperaturas indica que el pico se obtuvo al primer día y medio como se puede apreciar en la Figura 4.6:

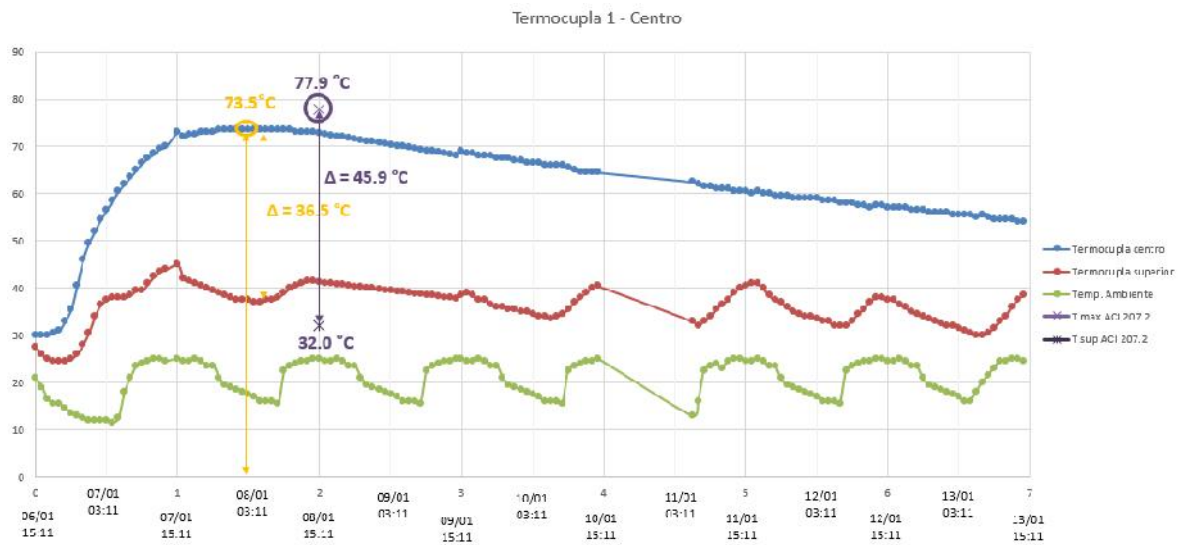


Figura 4.6: Análisis del método ACI 207.2 y campo.

Fuente: Información del proyecto.

En la figura se puede apreciar que las temperaturas máximas para ambos casos distan de 4.4 °C y los deltas de temperatura, de 9.4 °C. Al mismo tiempo, el delta real cuando el elemento experimenta el pico de su temperatura, es de 36.0 °C.

En este caso, la diferencia entre las temperaturas máximas representa el 6% del valor máximo, por lo que se podría decir que el resultado del método es cercano a la temperatura real alcanzada. Asimismo, el delta representa el 26% del valor real pero el delta obtenido desde el método del ACI ha sido asumido por lo que no es representativo para evaluar en sí la finalidad del procedimiento.

5. CONCLUSIONES

Del análisis a ambos casos experimentales en diferentes climas de la sierra peruana, se han podido extraer algunas conclusiones las cuales se enfocan en el método de predicción de temperatura del ACI 207.2, la etapa de fabricación del concreto, y la etapa de vaciado del concreto.

5.1. Método de predicción de temperatura ACI 207.2

Se pueden resaltar las siguientes conclusiones:

- El procedimiento del ACI 207 es un método preventivo, el cual permite tomar decisiones para definir el diseño de mezcla o el procedimiento constructivo.
- Se necesita una mejor toma de datos de temperatura, tanto del microclima como las temperaturas del concreto. Actualmente, existen termocuplas las cuales pueden ser programadas desde el inicio del vaciado para medir en un rango contante.
- Así como se muestra en el análisis, en uno de los casos se muestra una diferencia de temperaturas máximas alcanzadas de 27% y en el otro solo es del 6%. Esta variación se puede deber a que en el primer caso existía la presencia de un microclima, y que la lectura de las termocuplas no fue constante.
- Se necesita de una mayor toma de datos para poder establecer un factor de corrección según los parámetros que intervienen en el diseño y vaciado.
- Se aprecia que el método es útil para calcular la temperatura máxima, sin embargo se debe tener una buena referencia de la zona para predecir la temperatura de la superficie y con ello, el gradiente de temperatura máximo.
- Del análisis de esfuerzos por gradiente térmico se obtiene un esfuerzo mayor de lo que puede resistir el concreto a tracción, lo que indicaría que probablemente se fisure. No obstante, se debe recordar que el procedimiento que indica el ACI, debe ser considerado como una aproximación debido a que el método está realizado para un concreto pobre. Estudios anteriores (Gajda, 2002) indican que el concreto reforzado puede resistir hasta un gradiente de 37°C para una resistencia a la compresión de 280 kg/cm².

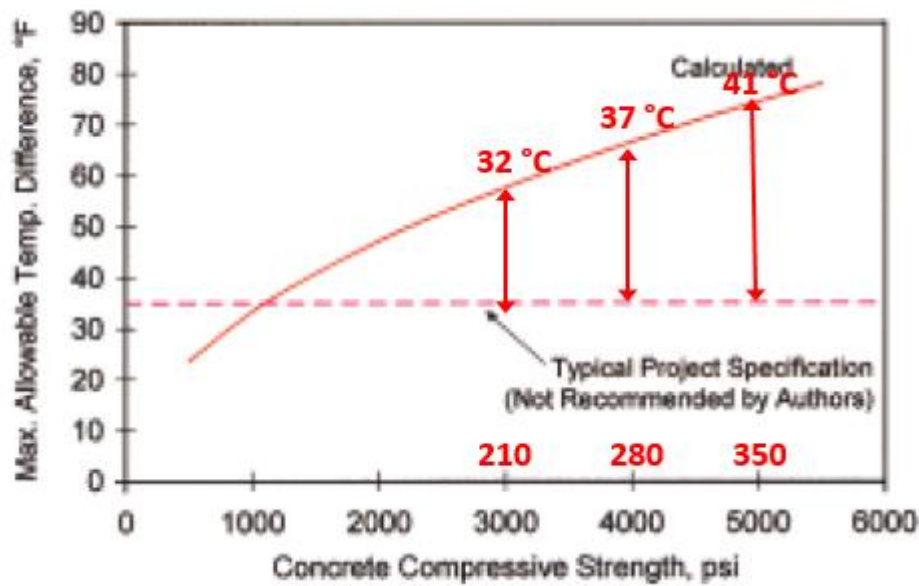


Figura 5.1: Gráfico referencial que representa cuanto es el gradiente que resiste el concreto reforzado.

Fuente: Gajda, 2002

- Las estructuras de concreto armado usan cementos con mayor generación de calor, agregados más pequeños, más agua, y menor control de temperatura que normalmente se usa o recomienda para el tipo de concretos masivos que se refiere la norma.
- Los ábacos usados fueron obtenidos a partir de cementos de la época de la primera versión del reporte ACI 207.4R; por lo que actualmente, los cementos se desenvuelven de manera distinta y poseen otro comportamiento térmico.
- Se debe tener en cuenta que se ha realizado distintas aproximaciones para adecuarlo a las condiciones comunes que se presentan en nuestro medio, tales como el microclima o los tipos de cementos comerciales, por lo que el resultado debe ser tomado como referencia.
- De los gráficos, se puede decir que la relación entre volumen y área de disipación es muy importante por lo que se debe de tomar en cuenta, al momento de realizar el procedimiento de vaciado de concreto masivo. Tomar en cuenta sectorizaciones.
- Un método más preciso para comprobar si los resultados son correctos, es realizar un modelo matemático usando un software que permita mostrar la evolución de la temperatura en el tiempo y considerando otras propiedades térmicas del concreto, así como, las condiciones ambientales de la zona. Dentro de estos programas de computación se pueden mencionar al ANSYS, ABAQUS, MIDAS-CIVIL, COMSOL, entre otros.

5.2. Etapa de Fabricación

De los resultados se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Reducir la cantidad de cemento en la mezcla, ya que así se reduciría la cantidad de calor de hidratación generado por m^3 . No obstante, como se trata de concreto masivo reforzado, la resistencia que alcance a los 28 días es de suma importancia, por lo que debería hacerse uso de algún aditivo para su diseño. Por ejemplo, se puede usar los aditivos reductores de agua – plastificantes porque permite mejorar la trabajabilidad en el concreto fresco, lo que facilitaría las labores de colocación, disminuiría las retracciones, y sobretodo más importante, permite reducir el agua de mezcla en el concreto produciendo incrementos en la resistencia.
- Cambiar el tipo de cemento, a uno que produzca menor cantidad de calor de hidratación debido a su composición química. Entre ellos podemos escoger entre el Tipo II, IV o V; sin embargo, en nuestro mercado no están disponibles los dos primeros pero si el Tipo V. Su composición química le permite reducir la temperatura del concreto, debido a su bajo contenido de aluminato tricálcico, principal componente que incremento el calor de hidratación.
- Se aprecia que en el Caso 02 – Condiciones templadas, se utilizó el cemento Tipo HE, el cual es similar al Tipo III, uno de los que generan mayor calor de hidratación. Es por esto que se alcanzan temperaturas mayores a los 70 °C permitidos. Debió realizarse un reemplazo del cemento en el diseño de mezcla.
- La elección del tamaño máximo del agregado, influye en la cantidad de cemento que ingresará en la mezcla. Si ingresa menor cantidad de cemento, se generará menor calor de hidratación en la mezcla.
- Reducir la temperatura inicial de los componentes del concreto por medio de métodos físicos o químicos. Esto se realiza antes de realizar la mezcla, es decir, se deben almacenar en lugares frescos de baja temperatura ambiental.

5.3. Etapa de Vaciado

Así mismo, para reducir la evolución de la temperatura se puede considerar:

- Realizar el vaciado de celdas a una velocidad adecuada, ya que el calor podrá ser liberado de una forma más rápida. Sin embargo, esta velocidad no debe ser menor que la de diseño ya que no cumpliría con el procedimiento establecidos.
- Para poder alcanzar las velocidades adecuadas es recomendable usar aditivos autocompactantes para que pueda tener mayor trabajabilidad. Además, al usar este aditivo no hay la necesidad de vibrar el concreto por lo que se necesitará menor cantidad de personal trabajando en el área, por lo que el avance sería más rápido. Por ejemplo, para una mezcla convencional con un slump del orden de 2" a 3", se le puede añadir el autocompactante y puede producir asentamientos del orden de 6" a 8" sin alterar la relación Agua/Cemento.
- El desencofrado debe realizarse cuando las temperaturas del interior y de la superficie sean similares, es decir cuando el elemento alcance una temperatura estable. En campo se puede determinar la temperatura estable, con el uso de las termocuplas.
- Cuando se usa un microclima se puede controlar la temperatura del interior del concreto haciendo uso adecuado de los dragones. Se puede controlar la temperatura del microclima y mantener en una temperatura estable que no exceda lo recomendado.
- Es importante que en elementos de concreto masivo exista por lo menos cuatro termocuplas que midan las temperaturas del centro y de una capa cercana a la superficie en contacto con el exterior.
- El uso del microclima permite controlar el gradiente de temperatura con mayor facilidad, ya que se puede ir manejando la temperatura con el uso de los dragones. También se puede utilizar mantas térmicas para evitar la pérdida de calor.

6. BIBLIOGRAFIA

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1990). *ACI 306.1R-90. Standard specification for cold weather concreting.* USA: ACI Committee 306.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1993). *ACI 207.4R-93. Cooling and insulating systems for mass concrete.* USA: ACI Committee 207.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1994). *ACI 207.3R-94. Practices for evaluation of concrete in existing massive structures for service conditions.* USA: ACI Committee 207.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2001). *ACI 201.2R-01. Guide to durable concrete.* USA: ACI Committee 201

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2005). *ACI 207.1R-05. Guide to mass concrete.* USA: ACI Committee 207.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2007). *ACI 207.2R-07. Report on thermal and volume change effects on cracking of mass concrete.* USA: ACI Committee 207.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2002). *C1064. Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura del hormigón fresco con Cemento Portland.* Pennsylvania: ASTM.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2015). *C186. Método de ensayo normalizado para determinar el calor de hidratación del cemento hidráulico.* Pennsylvania: ASTM.

AMIN, Muhammad et ál. (2008). *Simulation of the thermal stress in mass concrete using a thermal stress measuring device.* Artículo. Corea del Sur: Cement and Concrete Research.

BABUL, Paulina (2013). *Análisis de aplicabilidad en Chile de la guía "Pautas para el control de fisuración en hormigón masivo 2008 – Instituto del Concreto de Japón".* Tesis de título en Ingeniería Civil. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.

BALLIM, Yunus. *A numerical model for predicting time-temperature profiles in concrete structures due to the heat of hydration of cementitious materials.* Monografía. Johannesburgo: University of the Witwatersrand, School of Civil & Environmental Engineering.

BASF (2006). *Vaciado de concreto en climas fríos.* Boletín técnico. México: BASF, The Chemical Company.

BRANCO, Fernando et ál. (2002). *Heat of hydration effects in concrete structures.* Paper técnico. USA: American Concrete Institute.

CANDELAS, Luis (2008). *El concreto masivo.* Tesis de maestría en Ingeniería Civil. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma De México, Facultad de Ingeniería.

CHU, Inyeop et ál. (2013). *Application of a thermal stress device for the prediction of stresses due to hydration heat in mass concrete structure.* Artículo. Corea del Sur: Construction and Building Materials.

ENGEL, Yunus A. (2007). *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico.* Tercera edición. México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.

FIGUEROA, Miguel y DELFIN, Federico (2009). *Experiencia del IDIEM en el Control y Seguimiento de Obras de Hormigón Masiv.* [diapositivas]. Santiago de Chile: Seminario Internacional de Hormigones Estructurales Masivos.

GAJDA, John y VANGEEM, Martha (2002). *Controlling temperaturas in mass concrete.* Concrete International

INSTITUTO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGON DE CHILE (2009). *Hormigones masivos* [diapositivas]. Chile: ICH.

KAMINSKI, M. y ZIELENKIEWICZ, W. (1982). *The heats of hydration of cement constituents.* Polonia: Institute of Physical Chemistry of the Polish Academy of Sciences.

KOSMATKA, Steven et ál. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto.* Illinois: Portland Cement Association.

LARA, Ruben (2011). *Vaciados de concreto masivo en clima frío* [diapositivas]. Lima.

LEE, Jason (2007). *Early-age cracking of mass concrete structures.* Tesis de maestría en Ciencias. Alabama: Auburn University.

LIVESEY, P. et ál. (1991). *Measurement of the heat of hydration of cement.* Publicación. England: Cement & Concrete Composites.

MOSER, Robert (2009). *Mass concrete.* [diapositivas]. Atlanta: Georgia Institute of Technology.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION (2009). *CIP 42 – Thermal cracking of concrete.* Publicación. Maryland

OTTAZZI, Gianfranco (2004). *Material de apoyo para la enseñanza de los cursos de diseño y comportamiento del concreto armado.* Tesis de maestría en Ingeniería Civil. Lima.: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ingeniería.

PASQUEL, Enrique (1998). *Tópicos de tecnología del concreto.* Segunda Edición. Lima: Colegio de Ingenieros del Perú Consejo Nacional.

POWERS, T.C. (1956). *Resistance of concrete to frost at early ages.* Boletín técnico. Illinois: Portland Cement Association.

REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES (2009). *Norma E.060 Concreto armado.* Lima: RNE.

RIDING, Kyle et ál. (2006). *Evaluation of temperature prediction methods for mass concrete members.* Paper técnico. USA: American Concrete Institute.

RIVVA, Enrique (2008). *Materiales para el concreto*. Primera Edición. Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia.

SLAG CEMENT ASSOCIATION (2002). *Reducing thermal stress in mass concrete*. Publicación. Georgia.

SOO GEUN, Kim (2010). *Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement*. Tesis de maestría en Ciencias. Iowa: Iowa State University.

U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION (1981). *Control of cracking in mass concrete structures*. Monografía. Denver: U. S. Government Printing Office.

U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION (1988). *Concrete manual. A water resources technical publication*. Monografía. Denver: U. S. Government Printing Office.

WYRZYKOWSKI, Mateusz (2011). *Thermal cracking in massive concrete structures* [diapositivas]. Suiza: EMPA Materials Science & Technology.

ZARATE, Maria Luisa (2011). *Planeamiento para el control de calidad de vaciados masivos de concreto* [diapositivas]. Lima.