



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Metodología de evaluación y cálculo de la variación del gradiente térmico en concretos masivos

Camilo Esteban Benavides Zárate

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C., Colombia
2024

Metodología de evaluación y cálculo de la variación del gradiente térmico en concretos masivos

Camilo Esteban Benavides Zárate

Trabajo Final presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Estructuras

Director (a):

Ph.D., Ing. Juan Manuel Lizarazo Marriaga

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Bogotá D.C., Colombia

2024

A mi familia, mi esposa y mis hijos por su apoyo, su aliento y su confianza.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Camilo Esteban Benavides Zárate

Fecha 30/01/2024

Agradecimientos

Agradezco a mi familia, mi esposa, mis hijos que son parte de este proceso, y a las personas que han apoyado y dedicado su tiempo en la ejecución de las actividades y en la formulación del presente documento.

Resumen

Metodología de evaluación y cálculo de la variación del gradiente térmico en Concretos Masivos

Cuando se habla de materiales de construcción, todo está enmarcado en los coloquialismos propios del gremio, dado que son pocas las variaciones existentes en los procesos constructivos de las infraestructuras que dominan el espectro del sector que es considerado como uno de los pilares del crecimiento económico de los países. Sin embargo, si bien los materiales tradicionales son la base del ejercicio constructivo estos experimentan cambios debido al avance de los métodos de fabricación, la optimización de sus sistemas de producción, y el aprovechamiento de sus características mecánicas.

Materiales como el concreto hidráulico, con condiciones para ser considerado masivo viene experimentando cambios en su composición, comportamiento, producción y utilización, ya que, dadas las patologías presentadas en elementos que según el comité ACI 116, cumplan con la condición de presentar dimensiones suficientemente grandes, para requerir la toma de medidas preventivas para contrarrestar la generación de calor interno debido a la hidratación de cemento causando cambios volumétricos y fisuras o grietas, indicando cuáles deben ser los parámetros más indicados para mejorar su funcionamiento desde el diseño de las mezclas.

En concordancia con lo anterior, la revisión de la variación de la temperatura de la mezcla como resultado de la reacción interna en el material es un derivado de las proporciones de los materiales que lo componen así como de las condiciones de ambientales, por lo que se hacen importantes los métodos para prever las variables de las reacciones capaces de mejorar las características mecánicas y la durabilidad de los concretos.

Palabras Clave: Concreto hidráulico, Resistencia, Concreto masivo, Cemento Portland, Calor de Hidratación, Fraguado, Cambios volumétricos, Gradiente térmico, Reacción exotérmica, Fisuras, Endurecimiento, Convección.

Abstract

Methodology for evaluation and calculation of the variation of the thermal gradient in Massive Concretes

When talking about construction materials, everything is framed in the colloquialisms of the union, given that there are few variations in the construction processes of the infrastructures that dominate the spectrum of the sector that is considered one of the pillars of the economic growth of countries. However, although traditional materials are the basis of the construction exercise, they undergo changes due to the advancement of manufacturing methods, the optimization of their production systems, and the use of their mechanical characteristics.

Materials such as hydraulic concrete, with conditions to be considered massive, are experiencing changes in their composition, behavior, production and use, since, given the pathologies presented in elements that, according to the ACI 116 committee, meet the condition of presenting sufficiently large dimensions. , to require the taking of preventive measures to counteract the generation of internal heat due to the hydration of cement causing volumetric changes and fissures or cracks, indicating which parameters should be most indicated to improve its performance from the design of the mixtures.

In accordance with the above, the review of the variation in the temperature of the mixture as a result of the internal reaction in the material is a derivative of the proportions of the materials that compose it as well as the environmental conditions, so it is Methods are important to predict the reaction variables capable of improving the mechanical characteristics and durability of concrete.

Keywords: Hydraulic concrete, Strength, Mass concrete, Portland cement, Heat of Hydration, Setting, Volumetric changes, Thermal gradient, Exothermic reaction, Cracks, Hardening, Convection.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	X
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XV
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVI
Introducción	17
1. Concreto Masivo: Descripción y características	21
1.1 Características de las Mezclas de concreto Masivo	22
1.1.1 El cemento	22
1.1.2 Agregados.....	25
1.1.3 Aditivos en el concreto masivo	26
1.2 Cambios volumétricos de la mezcla	28
1.3 Temperatura en el Concreto	29
1.4 Determinación de la Temperatura máxima del concreto	30
2. Gradiente térmico	35
2.1 La variación de la temperatura en el concreto masivo	35
2.2 Controles de la temperatura del concreto masivo	36
2.3 Esfuerzos internos producidos por efectos de temperatura.....	38
Tabla 2.1. Valores típicos de expansión térmica de materiales.....	40
3. Influencia del gradiente térmico en el concreto masivo	41
3.1 Definición y parámetros del gradiente térmico	41
3.2 Método de la madurez	42
3.3 Método de análisis de resistencia a la tracción	43
3.4 Método de prueba de esfuerzos por temperatura.....	44
3.5 Inhibidor de aumento de la temperatura.....	45
3.6 Método de concreto degradado	46
4. Métodos para la determinación del gradiente térmico del concreto	49
4.1 Método PCA	51
4.2 Método Schmidt.....	52
4.3 Método por elementos finitos	53
4.3.1 Modelado térmico por el método de los elementos finitos	54
4.4 Evaluación de un caso experimental de medición de las condiciones de temperatura de un bloque de concreto masivo.....	55
4.4.1 Relación de Poisson.....	58
4.4.2 Conductividad térmica	58
4.4.3 Calor específico.....	58
4.4.4 Coeficiente de expansión	58
4.4.5 Consideración de las condiciones de borde	58

4.5	Evaluación de la metodología de modelación por el método de los elementos finitos	61
Tabla 4.1. Tasa de generación de calor de hidratación		67
4.6	Evaluación de la metodología de análisis del modelo gráfico de ACI 207.2R-22	71
4.7	Propuesta de metodología de análisis para la determinación del gradiente térmico del concreto masivo	79
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	82
5.1	Conclusiones.....	82
5.2	Recomendaciones.....	85
A.	Anexo: Resultados proceso de Modelación por elementos finitos	86
	Bibliografía	105

Lista de figuras

	Pág.
Tabla 2.1. Valores típicos de expansión térmica de materiales 37	XV
Figura 1.1: Calor de hidratación de diferentes tipos de cemento	24
Figura 1.2: Porcentajes de la resistencia de concreto para diferentes tipos de cemento.	25
Figura 1.3: Temperatura Inicial Vs Calor de Hidratación en °F	29
Figura 1.4: Aumento adiabático de la temperatura Vs tiempo de colocación.....	31
Figura 1.5: Variación de la temperatura con el contenido de pasta	32
Figura 1.6 Esquema del cambio de temperatura interna de un elemento de concreto masivo con respecto al tiempo.....	33
Figura 2.1 Humedad de la mezcla Vs Resistencia	37
Figura 2.2 Esquemas de alabeo en losas de concreto producido por gradientes de temperatura, (a) Concavidad hacia arriba, (b) Concavidad hacia abajo.	39
Figura 3.2: Laboratorio y ambiente artificial para múltiples muestras TSTMs.....	44
Figura 4.1: Esquema ubicación de elementos de medición de temperatura (termocuplas)	56
Figura 4.2: Esquema de encofrado y geometría del bloque propuesta.....	57
Figura 4.3: Elementos fundido en concreto.	57
Figura 4.4: Cambio de temperatura en el núcleo con respecto al tiempo.	59
Figura 4.5: Gráfica de la ecuación de regresión de la ecuación de generación de calor propuesta por Suzuki y calibrada con el ensayo de Abeka.	67
Figura 4.6: Bloque de concreto modelado.....	68
Figura 4.7: Trazabilidad lineal de la variación progresiva del tiempo y la evaluación de la temperatura en cada punto.	69
Figura 4.8: Trazabilidad no lineal de la variación progresiva de la temperatura con respecto al tiempo.....	69
Figura 4.10: Gráfica 4.4 ACI 207 2R-22, edad del concreto en la que se presenta el pico de temperatura, con respecto al tiempo en días.....	75
Figura 4.11: Gráfica 4.6 ACI 207 2R, porcentaje absorbido o disipado entre la diferencia de temperatura ambiental y de colocación	76
Figura 4.12: Gráfica 4.3 ACI 207 2R-22, incremento de la temperatura adiabática con respecto al tiempo.....	78

Lista de tablas

	Pág.
.....	
Tabla 2.1. Valores típicos de expansión térmica de materiales	40
Tabla 4.1. Tasa de generación de calor de hidratación	67

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m^2	$\iint dx dy$
A_{BET}	Área interna del sólido	$\frac{m^2}{g}$	ver DIN ISO 9277
A_g	Área transversal de la fase gaseosa	m^2	Ec. 3.2
A_s	Área transversal de la carga a granel	m^2	Ec. 3.6
a	Coeficiente	1	Tabla 3-1

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
α_{BET}	Factor de superficie	$\frac{m^2}{g}$	$(W_{F,waf})(A_{BET})$
β_i	Grado de formación del componente i	1	$\frac{m_j}{m_{bm} \rho}$
γ	Wandhfreiwinkel (Stahlblech)	1	Sección 3.2
ε	Porosidad de la partícula	1	$1 - \frac{\rho_s}{\rho_w}$
η	mittlere Bettneigungswinkel (Stürzen)	1	Figura 3-1

Subíndices

Subíndice	Término
bm	Materia orgánica
DR	Dubinín-Radushkevich
E	Experimental

Superíndices

Superíndice	Término
n	Exponente, potencia

Abreviaturas

Abreviatura	Término
1.LT	Primera ley de la termodinámica
DF	Dimensión fundamental
RFF	Racimos de fruta fresca

Introducción

En el desarrollo de las obras de infraestructura de la actualidad, las premisas de la construcción tradicional han sufrido cambios de fondo, ya que se han impuesto nuevos modelos y métodos de diseño que van modificando las interacciones en las comunidades, reforzando las evoluciones de los comportamientos sociales y adaptándose a la forma como nos relacionamos, reflejándose así en la necesidad de generar proyectos cada vez más ambiciosos desde el punto de vista técnico, con un alcance de capacidad que cubra cada vez más usuarios y con unas inversiones que de manera proporcional tienden a ser más importantes.

Es por eso que la implementación de los diferentes sistemas de servicios, como transportes, viviendas, y en general todas las infraestructuras de atención y bienestar, que hacen parte de la ola de renovación de los centros poblados, han decantado en la redefinición de las cualidades de dichas estructuras, de los tipos de sistemas usados para el ensamble de las edificaciones y así mismo de los elementos que las componen, provocando la evolución del uso de las materias primas, y en conjunto la constante producción de avances en la tecnología de los materiales como el concreto hidráulico.

Actualmente en nuestro país, se presenta la ejecución de obras de infraestructura de gran envergadura, de carácter nacional y regional, así como en los tipos de sistemas y proyectos que implican la construcción de elementos de grandes dimensiones, y grandes volúmenes de concreto, requiriendo de la ejecución de actividades importantes tendientes a la protección adecuada del material y de los elementos, específicamente en el control del gradiente térmico producido por la diferencia entre la temperatura de la superficie externa del elemento y el interior donde ocurre la reacción química exotérmica del material.

Una parte de la investigación que se encuentra sobre concretos conocidos como masivos tienen que ver con el seguimiento y la medición de las variaciones de temperatura, basadas

en ejercicios de monitoreo de elementos contruidos y puestos al servicio de la comunidad, como el propuesto por los investigadores (Xiaoda y Zhipeng, 2023), donde se pretende indagar y evaluar las características de los materiales para limitar el aumento de las temperaturas medidas durante el proceso de colocación, fraguado y endurecimiento del concreto.

Tales características han derivado en la posibilidad del uso de hielo para controlar la hidratación como se expresa en el documentos (ACI 305R-20), donde se establecen las condiciones para el uso de concretos en climas calurosos y de la misma manera se establece el uso del hielo como método para disminuir alrededor de 4°C la temperatura del agua para lograr una disminución de 1°C en la mezcla, así mismo, en algunos casos del enfriamiento de los agregados, sin embargo, no hay unificación en las metodologías de análisis, evaluación, cálculo o medición de procedimientos o algoritmos simplificados que permitan determinar la tasa de variación del gradiente térmico.

La diferencia más importante entre el concreto considerado masivo y otro que no lo es, radica en su comportamiento térmico. Las grandes dimensiones de las secciones de concreto vertido, son las que generan el potencial para el desarrollo de grandes diferencias de temperatura entre la cara exterior y cualquier punto en el interior de la pieza, determinando la existencia de un gradiente de cambio de la temperatura en los elementos, incidiendo de manera directa y en tasas muy altas en otras características del concreto como los cambios volumétricos asociados, y las restricciones a la contracción de las piezas dando como resultado, esfuerzos de tensión que agrietan el concreto en magnitudes que incluso pueden generar la pérdida total de las características mecánicas del objeto fundido. Es así como este problema específico de la temperatura, cobra gran importancia en materiales como el concreto, quien, por su característica de conductividad térmica particularmente baja, tiende a disipar con mucha lentitud el calor generado por la hidratación a menos que sea ayudado o controlado artificialmente.

La evaluación de las condiciones relacionados con el comportamiento térmico del concreto se basa efectivamente en las mediciones y gráficas obtenidas en obras de gran magnitud, documentadas en reportes técnicos y documentos académicos, a partir de los cuales, se pueden identificar comportamientos de variabilidad medida de manera directa.

En la construcción, la aplicación derivada del uso de los concreto masivos, no es exclusiva de las grandes obras de infraestructura. Las cualidades de los concretos utilizados comúnmente en el ejercicio de su producción pueden tener variables asociadas con sus dimensiones, variaciones en su temperatura de curado, las propiedades térmicas del material y las prestaciones mecánicas, con lo cual se define que es necesario conocer el comportamiento térmico de cualquier volumen de concreto colocado en obra, con el objeto de tomar medidas para controlar la generación de calor o atender el cambio de volumen para minimizar el agrietamiento.

Con base en las relaciones de estos datos y a las características de los elementos, modelos de las variaciones de los gradientes basados en modelos complejos que ofrecen algún grado de aproximación, sin embargo esta condición no permite que sea fácilmente identificable la manera como pueden realizarse los ajustes o la determinación de los factores que influyen en la variación de la temperatura en el uso de concretos de grandes dimensiones, por lo que la propuesta puede aportar la directrices mínimas, y una secuencia que permita desarrollar de manera rápida el análisis de la variación del gradiente térmico en concretos considerados masivos.

Así, con el fin de definir un método rápido y confiable para la determinación del gradiente térmico en concretos definidos como masivos, inicialmente se hará una definición de cuáles son las características de este material de acuerdo con lo dispuesto en (ACI PCR-207.1-21), se definirán sus condiciones y composición, para posteriormente adentrarnos en las metodologías que se han venido utilizando para su evaluación, basados en evaluaciones previas como las dispuestas por (ASTM C1064M-12), con el fin de proponer una metodología de fácil uso para la determinación de la variación de la temperatura en las mezclas de concreto.

OBJETIVO GENERAL

Proponer una metodología de evaluación y cálculo para la aproximación de la variación del gradiente térmico en concretos masivos. Basados en que en la actualidad el uso de este tipo de concretos se ven más extendidos en un mayor número de construcciones de uso común, y que no es fácil encontrar metodologías de fácil desarrollo que permitan prever el comportamiento térmico, más teniendo en cuenta que esta variable toma importancia en las condiciones de servicio y la durabilidad de los elementos fundidos bajo estas condiciones, dependiendo de su composición y de las

condiciones ambientales de la ubicación de su producción.

ALCANCE

La identificación de las variables o parámetros de evaluación en busca de determinar la variación de la temperatura interna y externa en la implementación de elementos de concreto masivo, así como sus métodos de cálculo analítico con el fin de establecer una metodología de evaluación y cálculo de fácil uso, como herramienta para la aplicación en obra, o la determinación de las variaciones de funcionamiento de un elemento, ante los efectos de la reacción interna de hidratación del material.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar las variables que influyen en la determinación de las fluctuaciones de temperatura de los elementos de concreto masivo.
- Establecer los métodos de cálculo disponibles para el cálculo de la variación del gradiente térmico en concretos masivos.
- Proponer un ejercicio metodológico para abordar el problema de la determinación de la variación del gradiente térmico en concretos masivos a partir del análisis de datos y ejercicios de solución del problema abordándolo desde el ejercicio práctico, que sea de fácil uso para ser consideradas dentro de las suposiciones de diseño de dichos tipos de elementos o incluso para su uso en obra.

1. Concreto Masivo: Descripción y características

Una de las características principales del concreto hidráulico, es que por su funcionamiento y por su composición, son innumerables las posibilidades de formulación para responder a las necesidades, según las notas de clase del curso tecnología del concreto (Gómez, 2013), estas se pueden caracterizar por resistencia, manejabilidad, permeabilidad o durabilidad, respondiendo indistintamente a las características mecánicas del material sea en estado simple o compuesto con materiales complementarios, con adiciones o aditivos que faciliten el control de su reacción química y el cambio de estado constituye su principal característica, lo que lo ha impulsado como el material más ampliamente utilizado en casi cualquier tipo de infraestructura civil.

En la actualidad, son amplias las investigaciones que estudian y determinan el funcionamiento de materiales como el concreto en diferentes escenarios, ambientes de exposición, materiales complementarios e incluso procedimientos y métodos de fabricación, lo que ha permitido entender su composición, mejorar su funcionamiento, e incluso optimizar sus características mecánicas, definiendo según su composición, y método de empleo, diferentes tipos mezclas que varían entre la modificación de los tipos de material cementante, hasta la variación en composición y en proporción de aporte de materiales complementarios como agregados, aditivos y agua.

Cuando se define la terminología, el concreto masivo se refiere a la utilización de grandes volúmenes de concreto, sin que hasta allí sea diferente su definición, a la de cualquier otro elemento constituido a partir del mismo material, por lo que es relevante definir las condiciones del material a estudiar en este caso. Es por eso por lo que según (ACI 207.1-21) y (ACI 116-R-00), se puede definir el concreto masivo como, "Cualquier volumen de

concreto colocado en obra con dimensiones tales que requieran ser tomadas medidas para controlar la generación de calor debida a la hidratación del cemento y al control de los cambios volumétricos de los elementos fundidos, con el fin de minimizar los agrietamientos, y controlar la posibilidad de tener pérdidas de resistencia o atender el cambio de volumen para minimizar el agrietamiento”.

Algunos autores un poco más específicos, como el código (CIRSOC 201, 2005) intenta definir algunos criterios dimensionales y mecánicos a la definición de los concretos masivos, como que la mínima dimensión del lado de un elemento que excede los 75 cm, o cuando se utilizan cantidades de cemento mayores a los 380 kg/m³ ya tiene comportamientos de temperatura y esfuerzos que lo catalogan como masivo, por otro lado el comité (ACI PRC-211.1-22), establece que cuando las dimensiones mínimas de la sección transversal de un elemento estructural se aproximan o exceden de 2 a 3 pies (0.61 a 0.91m), o cuando se utilizan contenidos de cemento por encima de 600lb/yd³ (356kg/m³)

Al diseño de las estructuras masivas, los rigen la durabilidad, la economía y la generación de calor. La resistencia mecánica generalmente resulta siendo un factor secundario, dado que son elementos o estructuras en genera con capacidades de soporte de cargas muy grandes, debido a las dimensiones de estos, así como su concentración de masa.

1.1 Características de las Mezclas de concreto Masivo

1.1.1 El 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:

De acuerdo con el (ASTM C150M-22), donde se establecen las especificaciones estándar para cemento tipo Portland: del Tipo I al Tipo 5 con diferentes conformaciones químicas y diferentes respuestas de mezcla.

- El cemento Tipo I, es el más común comercialmente, y en composición y proporciones puede considerarse normal.
- El cemento Tipo II, puede estar compuesto de minerales que le permiten tener al final un calor de hidratación moderado, con contenido bajo de C3A (Aluminato Tricálcico) y altos contenidos de C4AF (Ferraluminato Tetracálcico) y C2S (Silicato Bicálcico)
- El cemento Tipo III, tiene un contenido cuya característica más importante es que le permite desarrollar altas resistencias iniciales, su alto contenido de C3A y bajo contenido de C2S (Silicato Bicálcico) le permiten comportarse de esta manera.
- El cemento Tipo IV, contiene bajos contenidos de C3A (Aluminato Tricálcico) y altos contenido de C4AF (Ferraluminato Tetracálcico) y C2S (Silicato Bicálcico), lo que le permite tener bajas tasas de generación de calor de hidratación.
- Finalmente el cemento Tipo V, es un concreto resistente a la presencia de sales, y tiene bajos contenidos de C3A (Aluminato Tricálcico), lo que implica que también tiene características de baja tasa de calentamiento den la reacción.

De acuerdo con el tipo de composición, cuando se trata de la pasta cementante, esta puede estar conformada de 4 maneras principales.

- El cemento donde predomina el compuesto C3S, compuesto conocido como Silicato Tricálcico, que provee altas resistencias iniciales, endurecimiento rápido, pobre comportamiento ante la presencia de sulfatos y una reacción con alto calor de hidratación.
- El cemento donde predomina el compuesto tipo C2S, conocido como Silicato Bicálcico, compuesto que le otorga a la mezcla, altas resistencias a largo plazo, endurecimiento lento, buen comportamiento ante la presencia de sulfatos en el ambiente, y bajo calor de hidratación, debido principalmente a que es un cemento de endurecimiento lento por lo que la velocidad de la reacción se ve afectada, y en eso escenario, menor energía de reacción implica menor temperatura.

- El cemento compuesto de Aluminato Tricálcico C_3A , que provee velocidades muy altas de endurecimiento de la mezcla, un pésimo comportamiento ante la presencia de sulfatos, lo que lo hace proclive a la generación de Ettringita, afectando en ese caso sus características de resistencia y durabilidad, produciendo a su vez altos niveles de temperatura en su reacción, por lo que debe ser controlado antes y durante su producción.
- El cemento compuesto de Ferraluminato Tetracálcico, denominado C_4AF , cuya principal característica es que genera un cemento de endurecimiento rápido, que no alcanza niveles de resistencia sobresalientes, aunque se comporta bien ante la presencia de sulfatos y cloruros en el ambiente, con una baja tasa de calor de hidratación, lo que lo hace atractivo para algunos tipos de obras, adicionalmente es un cemento de color oscuro debido a su composición mineral.

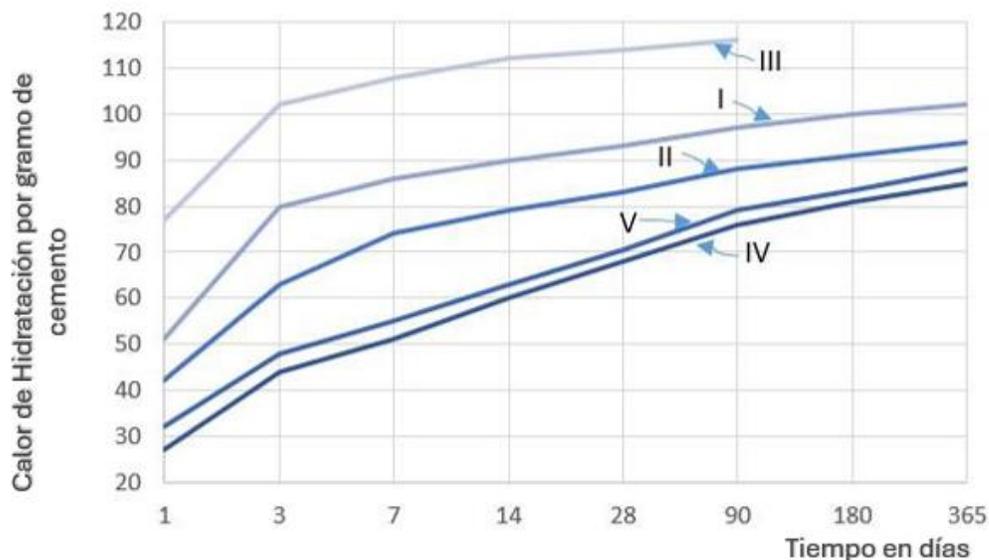


Figura 1.1: Calor de hidratación de diferentes tipos de cemento

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation, 2001

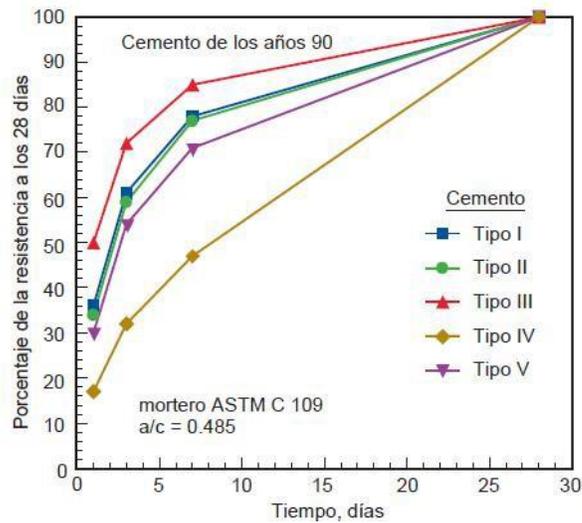


Figura 1.2: Porcentajes de la resistencia de concreto para diferentes tipos de cemento
Fuente: PCA, 2004

1.1.2 Agregados

Los agregados utilizados en la mezcla y colocación del concreto masivo, 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), todo de acuerdo con las disposiciones y recomendaciones del comité (ACI 211.4R-08), que cumple la función de guía en la selección de proporciones predeterminadas para la conformación de concretos de alta resistencia mediante el uso de cemento Portland principalmente.

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 cuanto a los agregados, se pueden apreciar unos rangos establecidos por el (ACI 207.1R–21) 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.

1.1.3 Aditivos en el concreto masivo

Los compuestos o elementos determinados como aditivos para la colocación del concreto constan de todos aquellos ingredientes orgánicos e inorgánicos que se mezclan en el proceso previo y durante el mezclado y posteriormente en la colocación, con el fin de modificar las condiciones de la reacción como el proceso de hidratación el curado en sus características generales. En algunos casos incluso se pueden modificar las magnitudes de las resultantes de capacidad de los concretos en cuanto se refiere a sus diferentes características mecánicas, que van incluso más allá de condiciones como la resistencia.

De hecho, la dosificación utilizada para la producción de concretos masivos, no dista mucho de la producción de otros tipos de concreto de uso común, dado que la su composición principal se basa en el uso de cemento, agregados, agua y aditivos de diferentes fuentes, siendo en todo caso solamente el material cementicio el que genera la reacción exotérmica durante su reacción con el agua. Es por esta razón que la elección de

los compuestos que van a ser adicionados a la mezcla debe tomar en cuenta consideraciones como el costo, la reducción en la aparición de fisuras, reducción en su índice de permeabilidad en el caso de tratarse de estructuras hidráulicas, el control de la temperatura de la mezcla, la trabajabilidad, la durabilidad o la resistencia.

De acuerdo con la norma (ASTM C595-17), en la cual se encuentran las recomendaciones para la formulación y uso de cementos Portland adicionados, la proporción de material cementante, reactivo térmicamente podría minimizarse mediante el uso de adiciones como cenizas volantes, puzolanas, reductores de agua, incorporadores de aire, mientras se cumplan con los requisitos de manejabilidad, resistencia y durabilidad, con el fin de minimizar el aumento de la temperatura en el concreto.

El uso de estos compuestos tiene que ver directamente con el aseguramiento de la calidad del concreto durante el proceso de mezcla y colocación, el control de las condiciones de transporte y curado, el manejo de las reacciones inherentes al estado medioambiental de la instalación, la reducción de costos de los procesos de fundida, el mejoramiento o modificación de las propiedades y el mejor manejo de la operación de producción y fundida.

En la industria actualmente, este tipo de materiales son cada vez más populares debido al mejoramiento de las condiciones que producen en el material final, y a las facilidades que ofrecen para la manejabilidad y producción del mismo, como en el caso de los aditivos retardadores de fraguado, los especializados en hacer control de hidratación, los aditivos reductores de agua, quienes entre otras cualidades ofrecen la posibilidad de reducir el calor de hidratación en la reacción de la mezcla y de esta misma manera mejorando las condiciones de funcionamiento de concretos de grandes dimensiones.

De hecho, los que han demostrado mayor efectividad, son los compuestos orgánicos e inorgánicos reductores de agua, que permiten como lo indica su nombre, el empleo de una menor cantidad de agua a las que se usan normalmente en las mezclas, produciendo mejores características de resistencia y trabajabilidad. Usualmente, en la conformación de los diseños de las mezclas de los concretos, sobre todo los que por sus dimensiones de fundida pueden ser considerados como masivos, cualquier apoyo en el control del calor de hidratación propio de la reacción exotérmica del concreto, es deseable y recomendable, toda vez que limita los problemas de curado asociados al proceso de fraguado del concreto.

Adicionalmente, entre las recomendaciones generales para el desarrollo de un ejercicio cuidadoso de diseños de las mezclas de concreto masivo, se recomienda también el uso de otros compuestos como los llamados incorporadores de aire, que son materiales que ayudan en la producción de burbujas de aire que se producen durante el mezclado principalmente y que se acomodan a lo largo del elemento durante el vaciado, reduciendo la posibilidad de sufrir pérdidas de resistencia y daños internos o de superficie, como resultado de los ciclos de temperatura que generan gradientes importantes, es decir la pérdida y la ganancia de temperatura de manera acelerada y repetitiva. Adicionalmente, una vez se tiene en cuenta que se debe reducir el agua que produce el cambio de estado en la mezcla, toma mayor preponderancia el uso de los incorporadores de aire ya que estas burbujas actúan como cámaras en las que el agua de la mezcla puede entrar, aliviando la presión y previniendo los daños como el sangrado, además de que optimiza la velocidad a la que se genera la hidratación de la mezcla reduciendo así el calor intrínseco en la reacción química de la mezcla.

1.2 Cambios volumétricos de la mezcla

Dado que el proceso reactivo de la mezcla del concreto supone el cambio de estado de la materia, de un estado líquido debido a la hidratación necesaria para el comienzo de la reacción, a un estado sólido producido por el secado, que implica tanto la pérdida de algún grado de agua de hidratación, como la generación de calor, es importante contar con la modificación de las cualidades volumétricas, se generan esfuerzos de tensión debido a que son esfuerzos residuales que se ven restringidos, bien sea por la misma formaleta, o por los tipos de conexiones del elemento fundido, con otro con el que genera la continuidad de la composición estructural del sistema. Estas restricciones se convierten en esfuerzos de compresión y de tensión, requiriendo especial atención en la aparición de los esfuerzos a tensión, dada la poca capacidad del material para el soporte de estos tipos de esfuerzo.

Las restricciones externas se generan cuando el elemento de concreto fresco comienza sus procesos de fraguado, estando restringido de manera externa, mediante la cercanía con miembros anexos como la conexión en la base de un elemento de concreto de gran tamaño con su elemento de cimentación, o por la misma formaleta. Estas diferencias volumétricas y esfuerzos de tensión residuales pueden aparecer después de que el concreto haya alcanzado su temperatura máxima comenzando su proceso de

enfriamiento, que terminará una vez que el material llegue a la igualdad de la temperatura ambiente. Esta condición deriva en la aparición de agrietamientos de profundidades importantes a partir de esfuerzos de compresión a edades tempranas y posteriormente de esfuerzos de tracción. (Kosmatka & Wilson, 2011)

De forma similar, las restricciones internas del material se producen cuando existen diferencias importantes entre las temperaturas que se producen en la reacción, la temperatura ambiental, la temperatura inicial de fraguado y la temperatura de la reacción, generando en ese caso expansión por este gradiente en el volumen interno de la pieza, sin que este comportamiento llegue a producir grandes agrietamientos a nivel de la piel del elemento. Estas diferencias de las magnitudes de la temperatura entre el núcleo y la cara externa del concreto inducen a la generación de los llamados esfuerzos térmicos, cuyos agrietamientos tienden a ser internos y de poca profundidad.

1.3 Temperatura en el Concreto

En condiciones normales, el proceso de fundido debe tener en cuenta la variable de la temperatura ambiente, dado, que dicha temperatura afecta de manera directa la producción de calor de hidratación, así como la temperatura a la que se vierte la mezcla, por lo que entre más baja sea a temperatura del concreto en el vaciado, menor será su calor de hidratación, y de manera contraria, se mantiene una relación directamente proporcional.

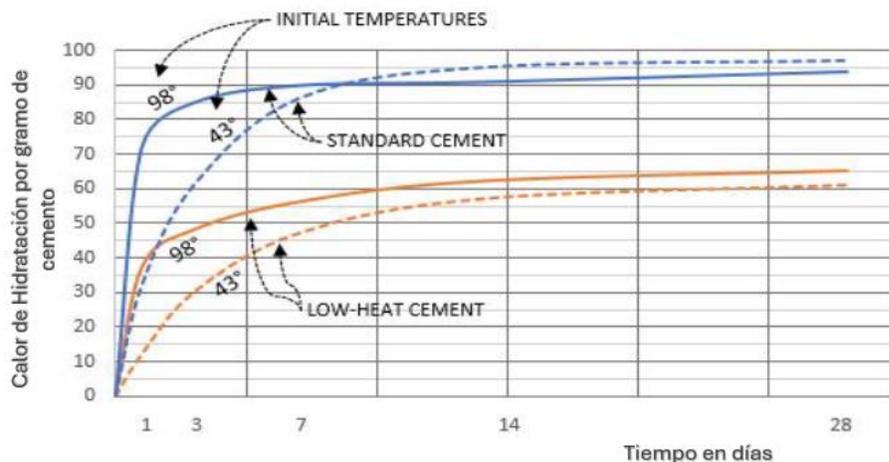


Figura 1.3: Temperatura Inicial Vs Calor de Hidratación en °F
Fuente: US Bureau of reclamation, 2001.

1.4 Determinación de la Temperatura máxima del concreto

A partir del mismo momento, en el que se activa la reacción del concreto en el vaciado de elemento grandes se inicia el proceso de calentamiento propio de la reacción química exotérmica de la pasta cementante, esta tasa ha sido evaluada en diferentes instancias y que se considera de manera un proceso adiabático, producido mayormente en el centro de la pieza y que se va disipando en la medida en la que se aleja del centro y se va acercando a la cara expuesta del elemento. Así el proceso, la temperatura inicial cobra una importancia preponderante en el desempeño térmico del material, dado que a partir de allí se puede establecer la magnitud máxima esperada de la temperatura, entendiendo que siempre la temperatura inicial será inferior a la temperatura final de la reacción, determinando entonces el control que se debe tener las condiciones ambientales y las condiciones del material en el vaciado.

La determinación de la temperatura inicial de la mezcla vendrá dada por la siguiente expresión (NRMCA, 1962), que ha sido la base del desarrollo de las investigaciones sobre las variaciones térmicas de los materiales, toda vez que permite hacer la aproximación de la medición a partir de la temperatura de los materiales que componen la mezcla, en el momento de la ejecución de dicha actividad indistintamente de las condiciones técnicas de los mismos, debido a que es una expresión derivada de la física en la que se evalúa el diferencial de la temperatura del agua durante el proceso de calor de fusión del hielo.

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

Ecuación 1. Expresión para determinar la temperatura inicial de vaciado

donde:

T_i : Temperatura inicial °C del concreto

T_a : Temperatura en °C de los agregados

T_c : Temperatura en °C del cemento

T_w : Temperatura del agua en °C

W_a : Peso de agregados en Kg

W_c : Peso del cemento den Kg

W_w : Peso del agua en Kg

La constante relacionada en la ecuación con valor de 0.22 corresponde a la relación que supuesta entre los calores específicos de los materiales que componen la mezcla, con el calor específico del agua, donde hay que tener en cuenta un aumento adicional a las características analítica de la ecuación en virtud del calor adicional producido por la energía mecánica de la mezcla, y por otro lado la disipación del calor, esto dependerá específicamente de las características geométricas y la escala del elemento fundido.

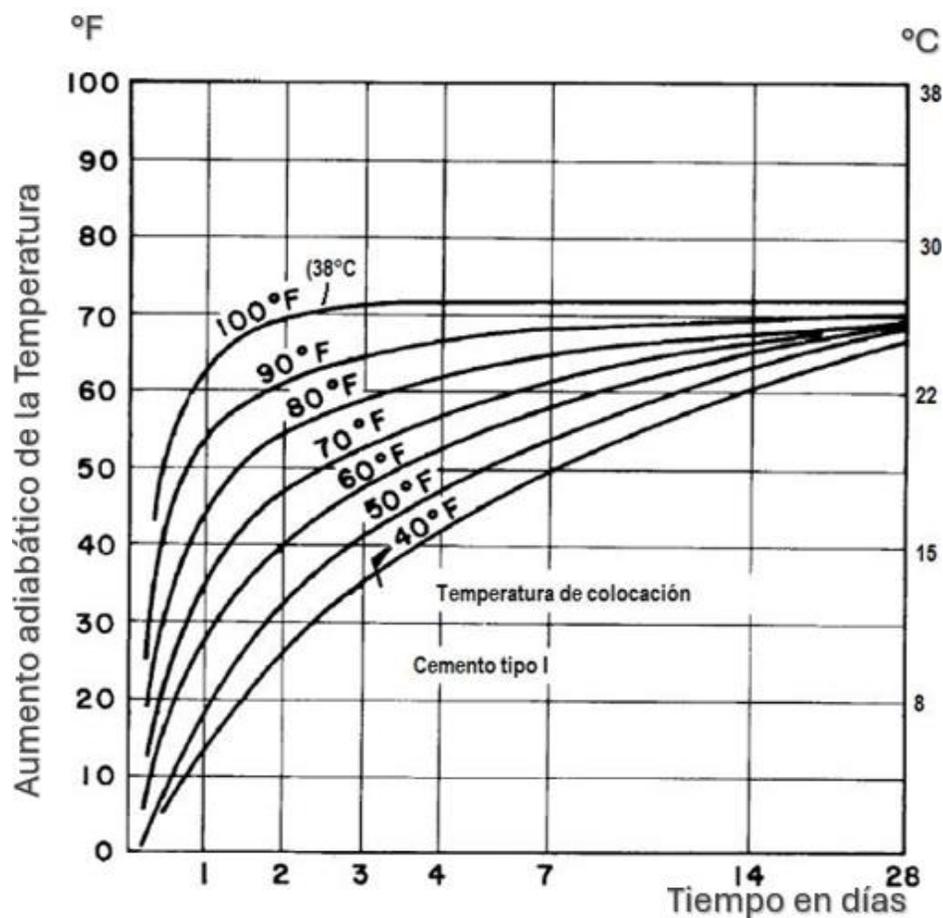


Figura 1.4: Aumento adiabático de la temperatura Vs tiempo de colocación
 Fuente: U.S. ACI 207.2R, 2021.

Durante el tiempo, en el proceso de producción de concretos masivos, se ha atribuido muchas veces a la temperatura del cemento un efecto adverso sobre el comportamiento de las piezas de grandes dimensiones, sin embargo de acuerdo con (Gómez, 2014), esta

consideración si bien cierta, desconoce el gran aporte del calor de los agregados expuestos al sol, sobre todo en zonas intertropicales.

Adicionalmente de acuerdo con (ACI 207.2R-21), para aumentar 1 grado centígrado la temperatura de la mezcla se requiere aumentar el cemento 9°C ó $3,5^{\circ}\text{C}$ el agua con que se mezcla, ó 1,8 grados centígrados la temperatura de los componentes de la mezcla, lo que implica que no solamente la temperatura ambiente, sino la exposición de los materiales a los calores específicos por ubicación o por radiación solar también son determinantes en las condiciones de comportamiento térmico de la mezcla.

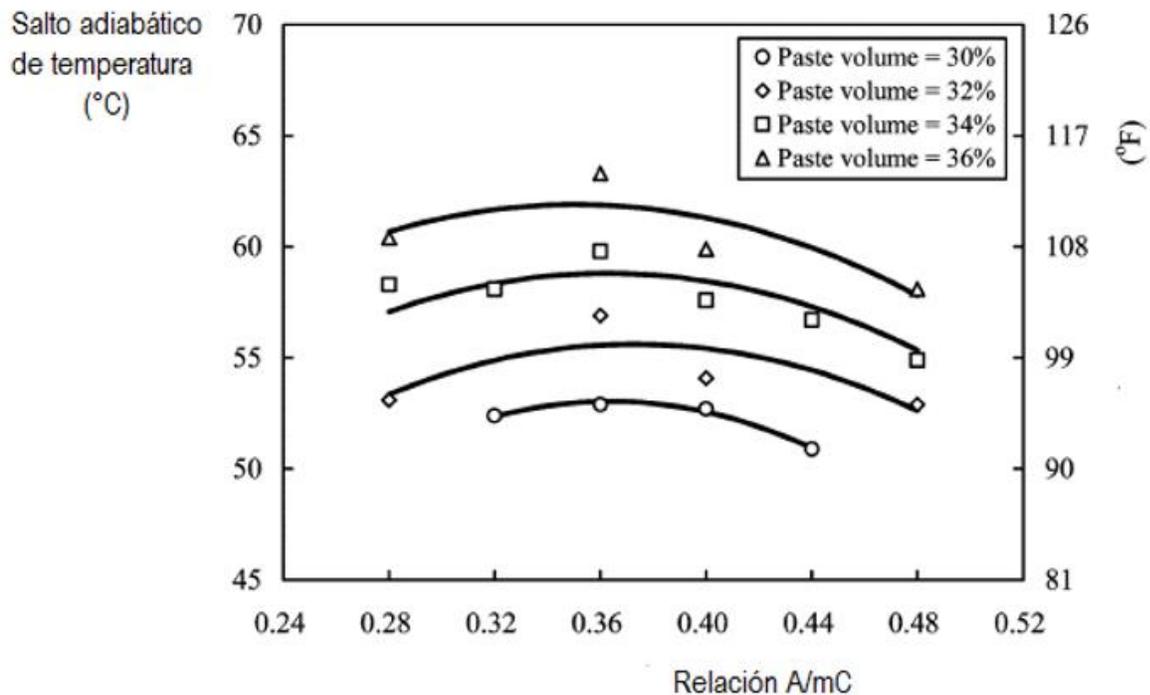


Figura 1.5: Variación de la temperatura con el contenido de pasta
Fuente: U.S. ACI 207.2R, 2021.

Luego de que la mezcla llega a sus valores máximos, va reduciéndose en la medida en la que el tiempo va transcurriendo, hasta alcanzar finalmente la temperatura de la cara externa, es decir la estabilización de la temperatura ambiente, como se observa en la figura 1.6 en la que se resume el esquema del cambio de la temperatura interna generada por la

reacción adiabática del concreto con respecto al tiempo, partiendo desde su colocación, durante su proceso de curado.

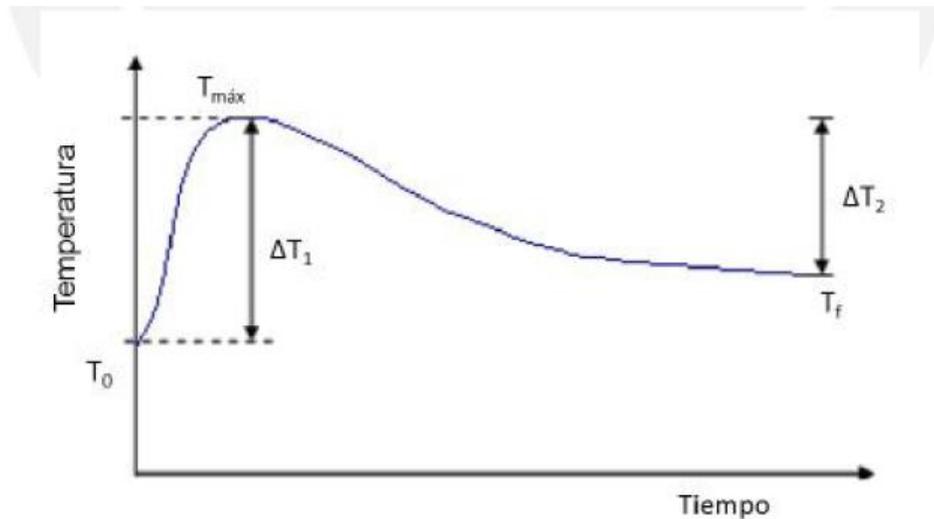


Figura 1.6 Esquema del cambio de temperatura interna de un elemento de concreto masivo con respecto al tiempo.

Fuente. Figueroa y Delfín, 2009.

El problema de la medición de la temperatura también ha sido un caso de análisis en Colombia, toda vez que las condiciones ambientales son exigentes desde el punto de vista climático y logístico, dadas las condiciones geográficas del país y a la variedad de climas que se presentan, razón por la cual el desarrollo de las investigaciones han sido enfocadas a la medición de las variables que pudieran afectar la temperatura del concreto en su proceso de fundida, de acuerdo con (Argos, 2011), el uso del hielo resulta ser un proceso de bajo costo, de fácil implementación y alta eficiencia, para contribuir con la baja temperatura en el concreto. De la misma manera que ahonda en la posibilidad de normalizar las técnicas de preenfriamiento en el país, toda vez que las condiciones ambientales en el país son exigentes desde el punto de visto de la exposición del material a la radiación solar y ambiental.

De igual manera, procesos de evaluación de las condiciones de las obras donde se hace el vertido de grandes cantidades de volúmenes de concreto, dan contexto a la importancia del control de las condiciones de temperatura en el concreto masivo, como el caso de estudio del nuevo Puente Pumarejo en la ciudad de Barranquilla, que ha servido como

escenario de prueba en la que (Rodríguez, 2019), formula una “Evaluación termodinámica de las estructuras de concreto masivo”, y en la cual se hace seguimiento de las condiciones de generación de calor en lagunas piezas del puente identificando variables y controlando los reemplazos de proporciones de cemento por escorias de alto horno, el control de la exposición al sol de los agregados principales, y el reemplazo de proporciones de agua por hielo en escamas, lo que permitió que las mezclas realizadas obtuvieran temperaturas de vaciado, y posteriormente temperaturas máximas que se adecuaron a las disposiciones de las normas aplicadas.

Dadas las variables que intervienen en las condiciones de colocación de los concretos masivos, y de las cualidades de los materiales que lo conforman, se hace evidente que la medición de las variables más significativas y la incidencia de estas en la mezcla final, determinará de mejor manera la calidad del material que se instale, y de manera proporcional se verá una mejora en las condicione de durabilidad de los concretos masivos.

2. Gradiente térmico

Con el fin de dar contexto al término del gradiente térmico y como parte del inicio de la identificación de las variables que influyen en la determinación de las fluctuaciones de temperatura de los elementos de concreto masivo, como base para el desarrollo de la caracterización de las variables y posterior evaluación se plantean los temas en los cuales la temperatura actúa como la variable más determinante en la calidad del concreto masivo y en la calidad de la obra que este tipo de material puede ofrecer. No solo la generación de calor en la reacción del concreto masivo, sino la forma como este puede variar su incremento, las medidas técnicas que se pueden implementar para controlar su magnitud, a la vez que se determina cuáles son algunas de las consecuencias del aumento la temperatura en los elementos, con el fin de conocer la importancia evaluar las magnitudes de la temperatura de la mezcla antes durante y después de su proceso de construcción.

2.1 La variación de la temperatura en el concreto masivo

Las variaciones de la magnitud de la temperatura, de los componentes de las mezclas de concreto masivo, y en general de los materiales compuestos o rígidos puede producir diferentes tipos de patologías, las más comentadas en los procesos de evaluación de los concretos masivos así como en los concretos de alto rendimiento por lo general se basan en condiciones de alabeo dependiendo de la geometría de la pieza así como la contracción o expansión térmica derivada en el proceso de curado, en cualquier cosa produciendo agrietamientos de diferentes magnitudes y profundidades, que conllevan a la necesidad del cambio total de la pieza o la ejecución de reparaciones.

En el caso de las patologías por alabeo, estas se presentan principalmente cuando los elementos tienen un eje de sección predominante como en el caso de losas verticales u horizontales, que por su diferencia de sección en unos de los sentidos tiende a sufrir deformaciones en ese sentido, coincidente con el más débil del elemento. En estos casos, cuando se generan diferencias muy marcadas entre las temperaturas de los extremos, o de las caras con respecto al centro, se producen contracciones y dilataciones, este es un

fenómeno en el cual los esfuerzos que se producen se concentran en los bordes, modificando los apoyos de los elementos e induciendo la aparición de las fallas a edad temprana, las que si no se controlan de manera rápida pueden requerir reparaciones importantes e incluso la reconstrucción del elemento.

Por otra parte, el control de la contracción por secado se convierte en una medida importante, reducción puede ser impactada, evitando entre otros el uso de agregados que tengan alta contracción por secado o agregados que contengan altos contenidos de arcilla. Agregado como caliza, granito cuarzo u otro tipo de minerales y feldespatos y la dolomita, son materiales de agregado que ayudan a reducir efectos como la contracción en el concreto.

De la misma forma, la duración del curado tiene entre otros efectos, la afectación en aspectos como la contracción por secado, así como el uso de compuestos selladores y revestimientos para el control del curado del concreto, pueden retener la humedad por largos periodos de tiempo retrasando los efectos de contracción hasta la finalización de los tiempos de resistencia tempranas y los efectos más rápidos del curado del material. Los métodos de curado húmedo, tales como los lechados o nieblas y los elementos del rociado, retardan los efectos de temperatura en la mezcla controlando los efectos de contracción hasta el final del proceso de curado, para finalmente alcanzar tasas normales de secado y contracción.

2.2 Controles de la temperatura del concreto masivo

De acuerdo con la ubicación geográfica y la altura sobre el nivel del mar, donde se estén desarrollando las actividades de producción de concretos, donde según las recomendaciones del ACI 306R-16, es menos problemático el comportamiento de los materiales en climas fríos y templados debido a que las consideraciones ambientales permiten que los materiales se encuentren dentro de temperaturas que se mantienen en niveles seguro para el funcionamiento.

La durabilidad cobra especial importancia en el desarrollo de las obras, y el material debe tener la capacidad de soportar tanto las condiciones de esfuerzo a la que es sometida como su propia instalación, requiriendo de acciones específicas para garantizar procesos

adecuados de protección y curado, debido a que la pérdida de agua y los excesos de calor en la exposición de los materiales, puede derivar en la producción de grietas y fisuras superficiales que afecten la calidad del concreto y seguramente su resistencia.

El sangrado en el concreto resulta ser una característica importante para garantizar el buen funcionamiento del concreto masivo, ya que afecta directamente la calidad y la durabilidad, este fenómeno en el cual por efectos de temperatura o de exposición o erosión el concreto pierde el agua de la mezcla necesaria para su hidratación, debe ser controlada mediante procesos de humedecimiento constante o inmersión que garanticen de alguna manera la tasa de apropiación de las características de resistencia, de tal manera que se alcance el 65% del total de sus cualidades mecánicas a los 7 días de colocación de acuerdo con la norma (ASTM C39-20).

El proceso de curado es aquel por el cual se produce la maduración y el endurecimiento de la mezcla, como resultado del proceso de hidratación, determinada de forma importante por la relación agua cemento y la tasa de ganancia de calor (ACI 308R), con lo cual se obtiene un buen proceso de curado una vez que se controla la correcta hidratación de la mezcla y mantener el concreto en temperatura templadas entre 10°C y 25°C.

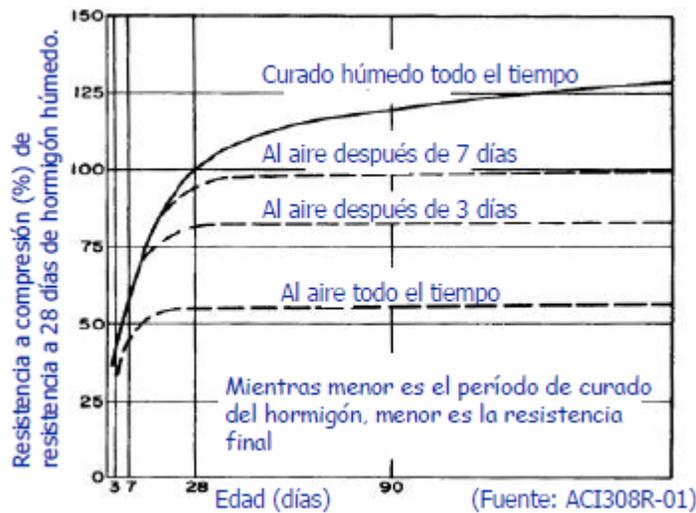


Figura 2.1 Humedad de la mezcla Vs Resistencia
Fuente: ACI 308R-01

A partir de lo anterior es importante determinar cuáles son las actividades necesarias, de acuerdo a las condiciones ambientales para garantizar las cualidades de las mezclas y la

cantidad de medidas que deben responder a las variables ambientales que pueden modificar o intervenir en su configuración física o en su composición en general. Efectos de malas prácticas logísticas o de cronograma de las actividades de ejecución de fundida, aumentando las horas de exposición de las mezclas, el uso de materiales complementarios como aditivos para el control o mejoramiento de las condiciones de secado o de protección ante el calor, incorporadores de aire o medidas de control físico como la instalación de protecciones o sombras, que, e incluso de barreras que lo protejas de la erosión se convierten en medidas importantes que pueden hacer la diferencia en la instalación del material.

2.3 Esfuerzos internos producidos por efectos de temperatura.

Las variaciones en las condiciones ambientales suelen producir esfuerzos en el material, debidos principalmente a la diferencia que hay entre la relación de las dimensiones del elemento, y su disposición geométrica, lo que implica el cálculo de dichas variaciones a partir de la tasa de rigidez relativa " γ ", que en términos prácticos relaciona la distribución de los esfuerzos internos en los objetos.

Si un elemento tiene relación de esbeltez, es decir que tiene un sentido dimensional predominante como en el caso de una losa de concreto, ese radio de disipación igualmente será predominante en el sentido corto de la pieza, llegando del centro del elemento a una de sus caras externas en longitudes muy cortas e intercambiando la temperatura de manera muy rápida, lo que puede generar esfuerzos de tensión demasiado grandes en su sección más larga, lo que derivará inevitablemente en efectos de alabeo a lo largo la sección trasversal, siendo más evidentes en las esquinas, debido a que son los puntos más alejados del centro donde se ha producido el mayor gradiente de temperatura.

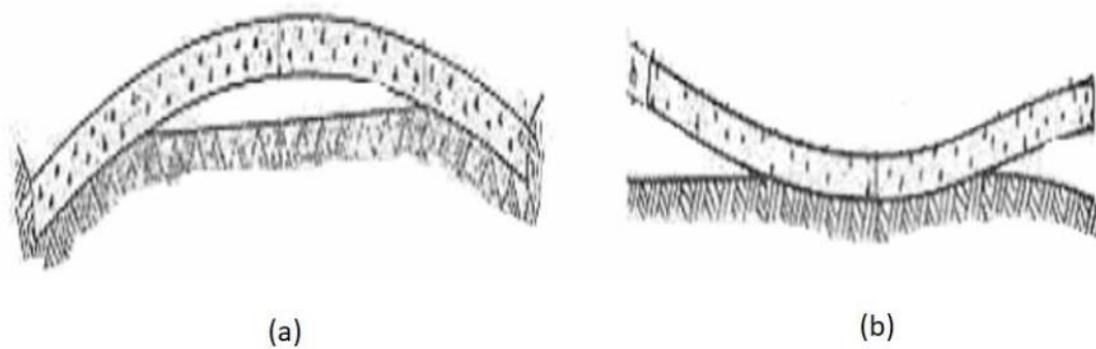


Figura 2.2 Esquemas de alabeo en losas de concreto producido por gradientes de temperatura, (a) Concavidad hacia arriba, (b) Concavidad hacia abajo.

Fuente: (Siddique et.al, 2005)

De manera complementaria, en el caso de las losas de concreto, se comenzó con la determinación de cuáles serían las condiciones derivadas de este mismo fenómeno en elementos prismáticos con relaciones dimensionales inferiores, como los bloques, encontrando que si se tienen en cuenta las consideraciones del diferencial de temperatura entre el centro del elemento y su temperatura superficial, puede ser posible explicar daños en los elementos relacionados con la fisuración siguiendo la forma de la deformación volumétrica, y exponiendo el concreto a pérdidas importantes de resistencia, o incluso a la inducción de fallas como descascaramientos o perdidas de nivel en la exposición de las caras.

En cualquiera de los casos, con las condiciones generales basadas en las condiciones de base de los estudios de los autores, era posible aproximar u obtener en algunos otros las magnitudes típicas de los coeficientes de expansión térmica de cada material

Valores típicos de expansión térmica		
Tipo de agregado grueso	α ($10^{-6}/grado$)	
	°C	°F
Cuarzo	3,7	6,6
Arenisca	3,6	6,5
Grava	3,3	6,0
Granito	2,9	5,3
Basalto	2,7	4,8
Caliza	2,1	3,8

Valores típicos de coeficiente de contracción		
Resistencia a tracción indirecta del concreto		Coeficiente de contracción
Mpa	PSI	
2.1 o menos	300 o menos	0,0008
2.8	400	0,006
3.4	500	0,00045
4.1	600	0,0003
4.8	700 o más	0,0002

Tabla 2.1. Valores típicos de expansión térmica de materiales
Fuente: Delatte, N. "Concrete Pavement Desing". Pg.294

3. Influencia del gradiente térmico en el concreto masivo

Han sido diversas las metodologías que se han propuesto para determinar la variación de la temperatura en los materiales cementantes, por lo que en el presente capítulo con el fin de dar alcance a las disposiciones del primer objeto específico que pretende identificar las variables que influyen en la determinación de las fluctuaciones de temperatura de los elementos de concreto masivo, iniciando por definir las cualidades de las características térmicas de los concretos de grandes dimensiones, estableciendo como la diferencia más importante entre un concreto masivo de otro que no lo es, radica en su comportamiento térmico, más que su específica caracterización geométrica, o su volumen de fundida.

3.1 Definición y parámetros del gradiente térmico

Las grandes dimensiones, son las responsables de la generación del potencial para que se desarrollen grandes variaciones entre las temperaturas del interior y del exterior de la pieza, lo que se defina como el gradiente térmico, razón por la cual con base en las condiciones mecánicas estudiadas del material y de otras metodologías de caracterización del material finalmente identificaremos las variables que influyen en la determinación de las fluctuaciones de temperatura de los elementos de concreto masivo, como base del presente estudio para avanzar en los análisis complementarios que permitan el análisis de las condiciones del material y las variaciones teóricas posibles en cada caso.

Los cambios de volumen asociados y las restricciones a la libre contracción dan como resultado esfuerzos de tensión que pueden agrietar el concreto. Debido también, a su baja

conductividad térmica, el calor interno generado por la reacción de la hidratación tiende a disiparse de manera lenta, a menos que se tomen medidas para controlar esas condiciones de manera artificial.

Dado que se le ha atribuido cierta importancia a la temperatura del cemento, como un agente adverso al buen comportamiento del concreto masivo, desconociendo en algunos casos el aporte del calor de los agregados sometidos a las condiciones ambientales de mezcla o de fundido, los cálculos se basan en que la resistencia y otras propiedades del concreto están estrechamente relacionadas tanto con la edad como con el historial de la temperatura dentro del material.

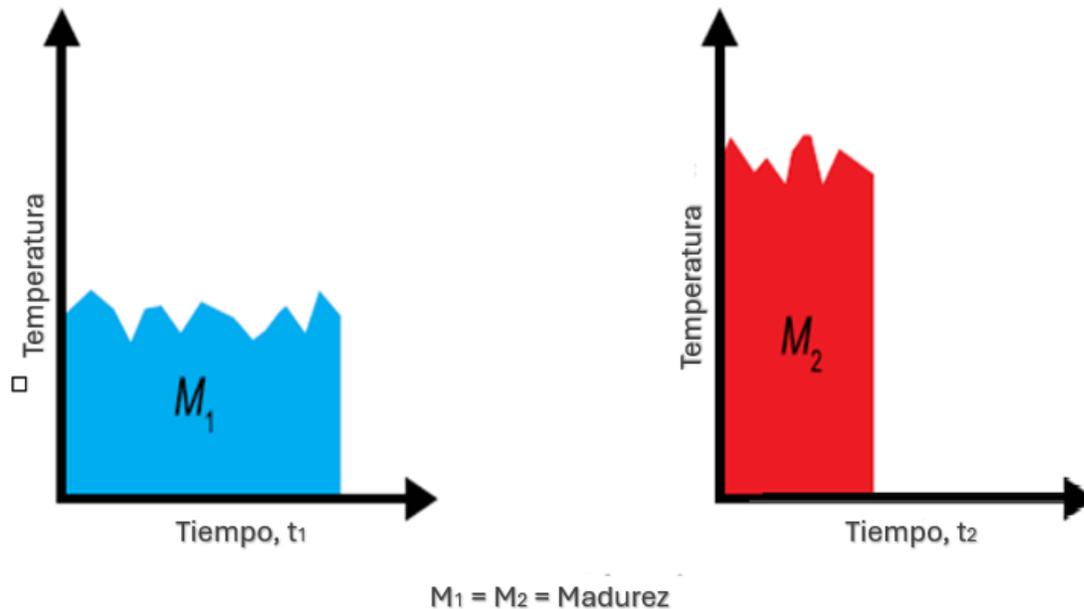


Figura 3.1: Relación de madurez de concreto

Fuente: ("Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method")

3.2 Método de la madurez

Con base en la determinación del "índice de madurez", este método se utiliza para determinar el desarrollo de la resistencia del concreto con base en la calibración de la velocidad de disipación de la temperatura con respecto al tiempo, sin embargo, las fluctuaciones entre pruebas y entre resultados del mismo conjunto de muestras, no son altas, limitando las expectativas de aproximación de los resultados asociados a tal proceso,

a continuación se marcan las principales variaciones que tienen impacto importante en la obtención de resultados.

- El concreto de la estructura no es estrictamente igual al concreto de las probetas ensayadas en el laboratorio, es decir, que las condiciones de mezclado si bien son iguales, varían de manera importante entre el impacto de las variables ambientales y las suposiciones de interacción de estas en laboratorio, haciéndolas menos agresivas, modificando de manera considerable las condiciones de maduración del concreto.
- Altas temperaturas a edades tempranas hacen imprecisas las estimaciones de resistencia a edades mayores.
- El material debe ser colocado, compactado y curado de manera tal que se permita la hidratación continua del cemento.

3.3 Método de análisis de resistencia a la tracción

Dadas las condiciones, se presentan diferentes propuestas para la evaluación de los cambios de la temperatura en las muestras de concreto, mientras se evalúan los comportamientos mecánicos ante la aparición de esfuerzos en diferentes escenarios. El trabajo desarrollado por (Zhu y Hu, 2021), quienes establecen que el criterio de evaluación de la falla debe ser evaluado de manera lineal, teniendo en cuenta que el gradiente térmico en términos de magnitud se encuentra dentro de tasas controladas, variaciones que en casi todos los casos coinciden aproximadamente de acuerdo con la consideración dimensional de las muestras y las características del diseño de la mezcla utilizadas.

Este modelo lineal, en la que la falla por causa de la variación térmica exhibe una tensión de menor que la resistencia a la tracción y una deformación de falla mayor que la capacidad de deformación producida por el mismo esfuerzo de tracción, lo que lleva a que el criterio de resistencia a la tracción sea en escala muy diferente en magnitud a los esfuerzos que se puedan derivar del aspecto térmico, mientras que el criterio de capacidad de deformación es demasiado conservador cuando se considera la fluencia en la deformación total.

3.4 Método de prueba de esfuerzos por temperatura

A partir de la medición de muestras controladas, aparece el método TSTM o “Temperature stress testing method”, que monitorea la deformación del concreto directamente y una vez que la deformación excede el umbral preestablecido (es decir, 2 μm), el motor comienza a funcionar y restaura el concreto a su posición original, lo que lleva a una prueba de restricción total. En resumen, el sistema de prueba TSTM puede ser dividido en un sistema de software, dos funciones (monitoreo en tiempo real y control de retroalimentación) y tres factores (temperatura, esfuerzos y tensión).

Si bien el equipo TSTM ha sido ampliamente estudiado, las secciones siguientes analizan principalmente las tecnologías TSTM relacionadas con el criterio y mecanismo de falla térmica, enfocándose en la simulación de temperatura, la medición de la deformación, el sistema de control de software y su efecto en la estrés y deformación por falla, son criterios que pueden complementar de manera importante las condiciones iniciales de las muestras y monitorear las condiciones de funcionamiento en un tiempo determinado de manera cercana.



Figura 3.2: Laboratorio y ambiente artificial para múltiples muestras TSTMs.

Fuente: (Zhu et al., 2021)

Sin embargo, al parecer la eficiencia de la prueba es el principal impedimento de la popularidad del método TSTM. Se sugiere que más muestras TSTM asociadas con los

métodos numéricos trabajen juntas para mejorar la eficiencia del experimento en trabajos futuros, teniendo en cuenta que Los actuales criterios de rotura y ensayos de tensión térmica se centran en el concreto evaluado de manera unidimensional.

La imposibilidad de realizar análisis de manera tridimensional de las muestras del método TSTM limita de manera importante la capacidad de probar el comportamiento tridimensional del concreto bajo restricción y gradiente térmico, para comprender mejor el comportamiento y el criterio de agrietamiento en una estructura práctica, dado que el elemento tiene que instalarse de manera lineal y debe estar controlado a lo largo de toda su área superficial, dado que la idea del ensayo se basa en mantener el elemento inalterado, corrigiendo su deformación una vez que se llega al umbral. Esta condición obliga a que el elemento esté confinado y no exista intercambio de calor con el ambiente, ni efectos de liberación en las caras, haciéndolo trabajar únicamente ante los efectos de esfuerzos axiales como la compresión y la tracción a través de su eje principal.

3.5 Inhibidor de aumento de la temperatura

De hecho, las condiciones de implementación de los procedimientos y métodos de control de la temperatura han determinado la importancia de disminuir la emisión de calor de la reacción del concreto, como base para el mejoramiento de su comportamiento mecánico, según (Leng, & Liang, 2023), es más efectivo, en cualquier caso, el uso de compuestos adicionales, que estén especialmente diseñados para producir en la mezcla una reducción de la temperatura, como un adicionador de aire o un retardante de fraguados, con el cual se puedan evaluar definitivamente tasas de reducción del gradiente de temperatura de las mezclas de manera directa con su participación volumétrica en la mezcla.

En la propuesta de la técnica, se plantea la implementación de un nuevo aditivo para concreto, el inhibidor del aumento de temperatura del concreto (TRI "Temperature Rising Inhibitor"), que limita la tasa de pérdida de temperatura en la reacción de hidratación inicial del concreto. Sin embargo, debido a la falta de datos para el análisis de viabilidad, su aplicación en ingeniería es limitada. Resulta hasta el momento más una propuesta de la industria química a la preparación de mezclas con resultados esperados en el campo de la construcción. Es así como, los parámetros termodinámicos del concreto con diferentes TRI se obtienen ajustando los datos experimentales.

Además, el efecto del TRI y su incidencia en el control de temperatura es más notorio para estructuras masivas de hormigón de paredes delgadas. En comparación con otras medidas de control de temperatura, como la reducción del valor máximo del aumento de temperatura adiabático y la temperatura de vertido, el efecto del TRI es más eficaz. Puede usarse como medio de control de temperatura en ingeniería y combinarse con otras medidas para lograr una temperatura más razonable y económica.

3.6 Método de concreto degradado

El desarrollo y variaciones de los efectos de temperaturas en las mezclas, se ha convertido en motivo de evaluación en todo tipo de estructuras, debido a que son contadas las edificaciones en las que no se utilizan concreto que por su geometría o volumetría, puedan ser consideradas estructuras masivas, de allí que las condiciones de alta temperatura formadas por la hidratación del cemento son las causantes de un riesgo significativo de tensiones y grietas inducidas por la temperatura, por lo que es fundamental centrarse en el desarrollo de la temperatura y los métodos de control de grietas. Es en ejercicios recientes como en el caso de la construcción de un túnel masivo de hormigón en la ciudad de Shantou, China, se analizó teóricamente el rendimiento térmico y los riesgos de agrietamiento de los componentes y se estimó el efecto de las tuberías de agua de refrigeración. Posteriormente, a partir de un monitoreo continuo del desarrollo de temperatura de cada componente durante el curado del concreto se propuso el uso de dos métodos de control de fisuras (concreto en gradiente y rejilla plástica antifisuras). Los resultados en esos casos indicaron que la pared lateral presentaba el mayor riesgo de agrietamiento de todos los componentes y no se utilizaron tuberías de agua de refrigeración, ya que su influencia sobre el campo de temperatura no era perceptible.

Además, los resultados simulados se correspondían bien con el desarrollo de la temperatura real y los dos controles de agrietamiento propuestos.

Los métodos fueron validados mediante observaciones reales de grietas. En comparación con el método de rejilla plástica anti-fisuras, el método de concreto degradado tuvo un efecto superior en el control de fisuras y pudo reducir simultáneamente la temperatura de los componentes. Por lo tanto, este método fue altamente recomendado para aplicaciones prácticas.

Ese ejercicio se basa en un proceso ejecutivo, más que un proceso de proceso analítico y, sin embargo, las condiciones iniciales y sus variaciones suponen que la evaluación con el uso de simuladores arroja datos que son relativamente cercanos a los valores medidos de manera presencial, e incluso a los valores revisados analíticamente. Esta condición, hacer prever que la si bien la modelación permite algunos grados de medición y trazabilidad del fenómeno, sigue los parámetros de las ecuaciones diferenciales para encontrar las variaciones de la temperatura adiabática por medio de la expresión a continuación

$$T(t) = \frac{WQ}{C_c \rho} (1 - e^{-mt})$$

Ecuación 6. Incremento de la temperatura adiabática en el concreto en el día t

Fuente: (Xioda et al., 2023)

Donde W es la dosificación de materiales cementantes, con el valor de 494 Kg/m³, C_c es la capacidad calorífica específica del hormigón, con un valor de 0,96 kJ/(kg·°C) según el código. ρ es el peso unitario del concreto, con un valor de 2400 kg/m³, m es el coeficiente relacionado con el tipo de cemento, temperatura de vertido, con un valor de 1,4 ÷ 1. Además, Q es el calor de hidratación total de los materiales cementosos, que puede expresarse como:

$$Q = k_1 k_2 Q_0$$

Ecuación 7. Calor de Hidratación del compuesto cementante

Fuente: (Xioda et al., 2023)

Donde k₁ y k₂ son los coeficientes de ajuste relacionados con la dosificación de cenizas volantes y escorias, y están valorados en 0,89 y 0,93 según el código, respectivamente. Q₀ es el calor de hidratación total inicial de los materiales cementosos, para el grado de cemento P·II 42,5, el valor es 325 kJ/kg.

Una vez revisadas todas las condiciones iniciales del material, se puede avanzar en la revisión de las demás determinantes importantes del análisis mecánico del concreto, y las

variaciones que conlleva el estado de los elementos que lo componen, así como las condiciones de las ambientales de las muestras, es por eso que a partir del uso de la ecuación de tensión de restricción externa (σ_w) y la tensión de autor restricción (σ_z) de cada componente se calcularon los esfuerzos, de acuerdo con el estándar de construcción para concreto, con el fin de obtener una aproximación a los riesgos de agrietamiento. Entre estos, σ_w se refiere a la tensión de tracción causada por la restricción externa de los miembros y σ_z a la tensión producida por el gradiente de temperatura en la cara interna.

$$\sigma_w(t) = \frac{\alpha}{1 - \mu} \sum_{i=1}^n \left\{ \Delta T(t) E(t) H(t, \tau) \left(1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{L}{2} \sqrt{\frac{C_x}{HE(t)}}\right)} \right) \right\}$$

$$\sigma_z(t) = \frac{\alpha}{2} E(t) \Delta T_{nb}(t) K_p$$

Ecuación 8. Esfuerzos en la Tensión en la cara externa

Fuente: (Xioda et al., 2023)

Es así como, según (Xioda y Zhipeng, 2023), “teóricamente el riesgo de agrietamiento de los componentes de una infraestructura de concreto masivo, puede ser calculado de manera igualmente aproximada a partir de elementos finitos y cálculos analíticos”, el monitoreo de temperatura in situ y las observaciones de grietas corroboran la teoría de que el calentamiento interno, puede derivar en un alto riesgo de agrietamiento.

4. Métodos para la determinación del gradiente térmico del concreto

Luego de identificar las variables que influyen en la determinación de las fluctuaciones de temperatura de los elementos de concreto masivo, y de acuerdo con los objetivos específicos que buscan establecer los métodos de cálculo disponibles para la predicción de la variación del gradiente térmico en concretos masivos, con miras a proponer un ejercicio metodológico para abordar el problema de la determinación de la variación del gradiente térmico. A partir del análisis de datos y ejercicios de solución del problema abordándolo desde el ejercicio de fácil uso.

Las condiciones de los concretos masivos han determinado la necesidad de indagar de manera más precisa en la forma como se pueden predecir las condiciones principales de su funcionamiento, y con ello revelar las principales circunstancias de colocación y de diseño para optimizar sus funcionamiento, así con el fin de establecer los métodos de cálculo disponibles para el análisis del gradiente térmico en concretos masivos, se evalúan los procesos desarrollados a partir del método de los elementos finitos, que están apoyados en la implementación del uso de software, como complemento a las nuevas disposiciones de las entidades encargadas de controlar las recomendaciones de diseño y construcción de sistemas de concreto.

Hasta hace poco, se suponía que las altas temperaturas no eran un problema en los miembros de la subestructura de los puentes o edificaciones, y que este problema era exclusivo de las presas, los túneles y los elementos de prefabricación en concreto. Sin embargo, en los últimos años, los miembros de la subestructura de los puentes y otras estructuras de dimensiones más comunes en el medio de la construcción se han vuelto

más grandes debido a nuevos métodos de construcción e intereses estéticos. Al mismo tiempo, la finura y el contenido de cemento en la mezcla han aumentado, elevando la temperatura adiabática del concreto, esto se debe a la necesidad de optimizar en todos los campos, desde la mejor utilización del área que se adquiere para el desarrollo de los proyectos, requiriendo edificaciones más exigentes en altura, con elementos con mayor capacidad de carga, que están pensados para soportar esfuerzos más grandes, derivados de que cada vez más usuarios hagan uso de ellos.

Como consecuencia, existe una mayor preocupación por el agrietamiento térmico en los procesos constructivos, con la finalidad de controlar la disminución a largo plazo de la resistencia y la formación retardada de etringita (DEF) (un mecanismo que causa agrietamiento en el concreto cuando la formación de etringita se retrasa por las altas temperaturas).

De acuerdo con la normativa AASHTO, que es equiparable en cualidades a las especificaciones de las normas actuales, se tienen en cuenta las disposiciones de nueve agencias de carreteras (SHA) que tenían especificaciones para concretos masivos y otros ocho estados que tenían disposiciones especiales para concretos de grandes dimensiones o concretos de alto desempeño. Haciendo seguimiento a las especificaciones de estos tipos de concreto, algunas limitan la diferencia máxima de temperatura del concreto a 20°C (35 °F), y otras limitan la temperatura máxima en sitio a 71 °C (160 °F). Sin embargo, ya todas las normas, agencias y comités técnicos, coinciden en el otorgamiento de disposiciones técnicas especiales controlando los límites máximos de diferencia de temperatura del concreto o de los límites máximos de temperatura en sitio.

Los estudios desarrollados en proyectos donde el concreto masivo es predominante han demostrado que la pasta de cemento simple curada a más de 50 °C (122 °F) puede, a largo plazo, tener menor resistencia, poros más grandes y mayor permeabilidad. También se ha demostrado que la formación retardada de etringita (DEF) causa problemas de durabilidad cuando el concreto se cura a temperaturas elevadas (por ejemplo, temperaturas superiores a 70 °C (158 °F)). La tasa de aumento de temperatura, la duración del período de inducción, la temperatura máxima y la tasa de enfriamiento son factores que pueden determinar el alcance del daño causado por el DEF.¹ El tiempo alcanzado y

la magnitud de la temperatura máxima son críticos para determinar la diferencia máxima de temperatura.

4.1 Método PCA

Portland Cement Association (PCA), ofrece una opción rápida para la estimación de la máxima magnitud de temperatura desarrollada en miembros masivos de concreto, referido comúnmente como "Método PCA". Este método calcula el aumento máximo de temperatura por encima de la temperatura de colocación del concreto, como 12 °C (21,6 °F) por cada 100 kg (220,4 lb) de cemento.

El método PCA sólo es apropiado para concreto que contiene entre 300 y 600 kg de cemento por metro cúbico (506 y 1012 lb por yarda cúbica) de concreto y supone que la dimensión mínima del elemento de concreto es al menos 1,8 m (6 pies). Sin embargo, este método no proporciona información sobre el tiempo de temperatura máxima y no permite la cuantificación de las diferencias de temperatura. El método PCA considera todos los cementos ASTM C 150.

El Comité 207 del ACI sugiere que se pueden realizar modificaciones para tener en cuenta los materiales cementantes suplementarios (SCM) suponiendo que liberan aproximadamente la mitad del total de calor generado por el cemento para una masa determinada. La ecuación (9) muestra el cálculo de PCA para la temperatura máxima del concreto.

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

Ecuación 9. Temperatura Máxima Método PCA
Fuente: (Riding et al., 2006) "ACI Material Journal N°103-M40"

En este método el cálculo de la temperatura máxima (T_{max}) se realiza con la intención de revisar como es la modificación de su magnitud teniendo en cuenta la temperatura de colocación inicial y los materiales cementantes suplementarios (SCM).

Donde

T_i es la temperatura de colocación del concreto, en °C;

W_c , es el peso del cemento (Kg);

W_{scm} , es el peso de los materiales suplementarios de la mezcla (Kg).

(Bamforth & Price, 1995) hicieron modificaciones significativas, diseñando tablas para corregir el tamaño de los miembros de menos de 2m (6,6 pies) (dimensión mínima) y poder tenerla en cuenta para contenidos de cenizas volantes y escoria de cemento. Los datos se basan entonces en tablas desarrolladas bajo pruebas de laboratorio y no tienen un seguimiento analítico del proceso más allá del reemplazo de los datos de entrada en el sistema, lo que hace que no sean recomendables en el trópico o en zonas donde el ambiente varíe de manera importante con respecto de las condiciones de laboratorio.

4.2 Método Schmidt.

E. Schmidt desarrolló otro método para estimar la temperatura máxima y las diferencias de temperatura máxima en la década de 1920 y se resume en ACI 207.1R. Conocido como el "Método Schmidt". Fue una contribución importante en la era anterior a las computadoras porque los cálculos eran relativamente sencillos de realizar a mano. como se muestra en la ecuación (10).

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

Ecuación 10. Serie De Fourier para transferencia de calor

Fuente: (Riding et al., 2006) "ACI Material Journal N°103-M40"

Donde:

Q_H : es la tasa de generación de calor

P : densidad de la mezcla

C_p : corresponde al calor específico,

T es la temperatura, en °C.

Esta es una metodología simplificada de los sistemas de evaluación por el método de elementos finitos. Las temperaturas se calculan para nodos discretos en pasos de tiempo discretos. El paso de tiempo se calcula según la ecuación:

$$\Delta t = \frac{(\Delta x)^2}{2\alpha}$$

Ecuación 11. Gradiente por el MEF
Fuente: (Riding et al., 2006) "ACI Material Journal N°103-M40"

Dónde:

α es la conductividad térmica del hormigón, en W/m/°C;

Δt es el paso de tiempo utilizado, en segundos;

Δx es el espacio entre nodos, en m.

ACI 207.1R-21 brinda orientación sobre cómo manejar las condiciones de contorno utilizando el método Schmidt, pero solo para aquellos límites próximos a la superficie inferior del elemento, el aislamiento también se modela utilizando un espesor de concreto equivalente. La temperatura agregada en cada nodo para cada paso de tiempo es el aumento de temperatura adiabática de ese tiempo, menos el aumento de temperatura adiabática del tiempo anterior.

4.3 Método por elementos finitos

Los trabajos de investigación posteriores a la creación de modelos numéricos para la predicción de la distribución de temperatura en hormigón en masa se centraron en el uso de funciones básicas de generación de calor para el cálculo del aumento de temperatura adiabático.

Los intentos de modelar una masa de hormigón hidratante trataron el calor generado por el cemento que reaccionaba como si fuera uniforme en toda la masa de hormigón. Mientras que, en realidad, la generación de calor depende del cambio de la temperatura con respecto al tiempo de secado del concreto en lugares individuales de la masa de concreto (Lawrence, 2009; Radovanovic, 1998).

4.3.1 Modelado térmico por el método de los elementos finitos

La ecuación de transferencia de calor en sólidos, atribuida a Fourier es el modelo matemático fundamental que se puede utilizar para calcular la temperatura de un volumen elemental en un momento particular de tiempo. La ecuación rectora generalizada expresada en el sistema de coordenadas cartesianas se utiliza en el análisis del flujo de calor tridimensional.

$$\rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} = k \left(\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \right) + Q_H$$

Ecuación 12. Ecuación de transferencia de calor de Fourier
Fuente: (Abeka et al., 2017)

Donde:

c_p : Calor específico del material

ρ es la densidad del concreto

t: tiempo

k: Conductividad térmica del material

T es la temperatura

Q_H : Tasa de modificación de la magnitud de calor interno

La modelación de elementos finitos permite entre otras cosas, calibrar de manera cercana las condiciones ambientales de la instalación, o en condiciones más controladas las condiciones de las probetas, lo que permite aproximaciones importantes a las condiciones reales de las probetas, e incluso permitiendo la calibración o la definición de otras características físicas del concreto masivo como:

- Coeficiente de convección
- Temperatura ambiente
- Tasa de generación de calor interno
- Temperatura de colado

Los parámetros de entrada son modelados como deterministas o estocásticos según el tipo de análisis, el tipo de elemento y la temperatura de referencia, la función de generación de calor, etc. Se puede hacer el análisis de variables lineales, como no lineales del análisis térmico transitorio para tener en cuenta las variaciones de límite y condiciones de carga con el tiempo.

De la misma manera, es relevante que se establezcan las características mecánicas que sufren variación en los elementos, es decir, que en la modelación debe estar implícita la caracterización mecánica del material, y haciendo uso de las recomendaciones de manejo de estos que se establezcan las condiciones de variación y hasta donde estos parámetros intervienen en la reacción que se está recreando.

Además, a nivel de elementos, en el análisis de elementos finitos, simula la utilización de elementos sólidos, para proporcionar estimaciones confiables de las cantidades térmicas utilizando un elemento isoparamétrico de veinte nodos que tiene un solo grado de libertad en cada nodo. En la plataforma ANSYS, se eligió el tipo de elemento sólido térmico SOLID-3D 70 de la biblioteca de elementos materiales constitutivos. Los principales parámetros de salida que son de interés son la temperatura máxima in situ y el gradiente térmico. Definiendo de esta manera el gradiente térmico como el cambio de temperatura con respecto al cambio de distancia a través de la sección del concreto. Dado que las propiedades térmicas de un volumen elemental cambian con el tiempo, junto con la convección en la superficie sobre el encofrado, se elige como temperatura de colocación una temperatura límite inicial denominada temperatura de referencia. Este parámetro necesitaba definirse para que el algoritmo de paso de tiempo se inicie en el análisis.

4.4 Evaluación de un caso experimental de medición de las condiciones de temperatura de un bloque de concreto masivo.

Con el fin de caracterizar de manera específica el caso de predicción de las condiciones de temperatura de un elemento cualquiera, se propone la revisión de la caracterización de una pieza de tamaño controlada, y definido experimentalmente desde la construcción de unas piezas de geometría definida y prismáticamente determinada con el cual se pudiera desarrollar el seguimiento de las condiciones reales de la zona, y posteriormente de la misma manera dar base real a las propuestas metodológicas.

Dado lo anterior, se establece la evaluación del ejercicio experimental planteado por (Abeka, et al, 2017), en el documento “Efecto térmico de estructuras de concreto en masa en los trópicos: estudios experimentales, de modelado y parametrización”, del cual sobresalen las condiciones iniciales de representación de un bloque de concreto al cual mediante el seguimiento y la definición de los parámetros iniciales es posible determinarle las magnitudes de las variaciones de la temperatura a lo largo de 144 horas, para posteriormente desarrollar un ejercicio estocástico con software convalidar los datos obtenidos experimente y finalmente definiendo las condiciones de evaluación de los esfuerzos o tensiones que pueden producirse en el concreto debido a los efectos de temperatura.

Sin embargo, debido a que el alcance del presente documento se buscar tomar como base el método y las variables que pueden ser determinantes en el método de determinación de la variación de la temperatura de un bloque con respecto a su estado de instalación y a la temperatura ambiente, se hace la evaluación del caso inicial de la temperatura, y se toman las bases de la evaluación por medio de la modelación del software y los métodos analíticos anteriormente planteados y desarrollados con el fin de evaluar métodos y aproximaciones de los resultados.

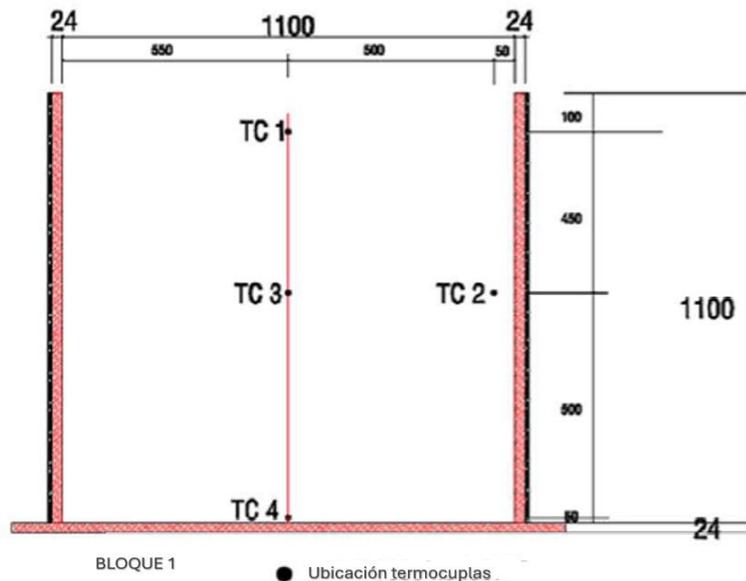


Figura 4.1: Esquema ubicación de elementos de medición de temperatura (termocuplas)

Fuente: Efecto térmico de estructuras de concreto en masa en los trópicos: estudios experimentales, de modelado y parametrización” (Abeka; 2017).

Inicialmente se propuso la construcción de unos bloques de concreto con dimensiones superiores a los 90cm de lado, lo que coincide con la generalidad de las recomendaciones de investigadores y escritores sobre la categorización de piezas que pueden ser consideradas masivas de acuerdo con el siguiente esquema.

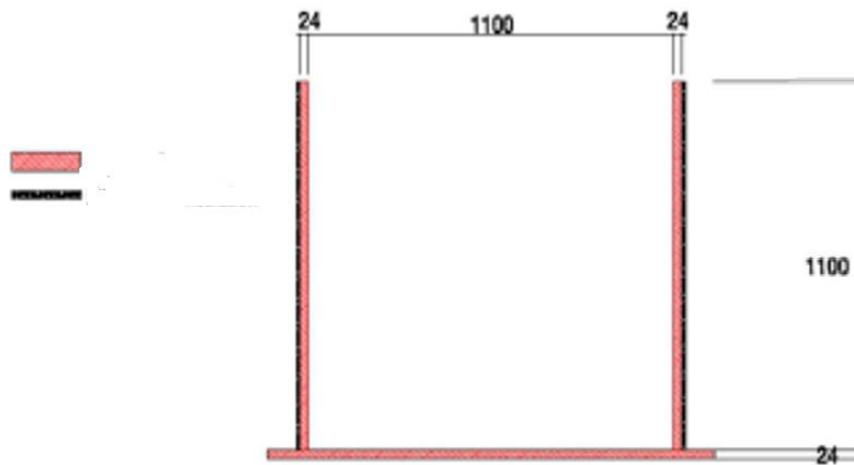


Figura 4.2: Esquema de encofrado y geometría del bloque propuesta.

Fuente: Efecto térmico de estructuras de concreto en masa en los trópicos: estudios experimentales, de modelado y parametrización” (Abeka; 2017).



Figura 4.3: Elementos fundido en concreto.

Fuente: Efecto térmico de estructuras de concreto en masa en los trópicos: estudios experimentales, de modelado y parametrización” (Abeka; 2017).

4.4.1 Relación de Poisson

Según Mehta y Monteiro (2013), el índice de Poisson no tiene relación consistente con la edad de curado del concreto. Por lo que se puede utilizar el valor de referencia de **0,18**, que se encuentra dentro del rango universalmente aceptado de 0,15 y 0,20 para el hormigón.

4.4.2 Conductividad térmica

Un valor característico de la conductividad térmica del hormigón está en el rango de **9** a 10,5 kJ/mh°C según las normas coreanas y en el rango de 7,1 a 10,6 kJ/mh°C según las normas americanas (Comité ACI 207, 2005b). Se adopta un valor de conductividad térmica constante de 9 kJ/mh°C bajo el supuesto de que no variará con la ubicación en una sección y el tiempo durante el análisis.

4.4.3 Calor específico

Un valor típico de capacidad calorífica específica para el hormigón oscila entre 1,13 y 1,3 kJ/kg°C según JCI, y 0,92-1,00 kJ/kg°C según ACI Committee 207 (2005b). Los valores de calor específico que se eligen son 0,9 kJ/kg°C.

4.4.4 Coeficiente de expansión

El coeficiente de expansión térmica para la revisión de este tipo de análisis de estrés térmico es de $2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

4.4.5 Consideración de las condiciones de borde

Las condiciones de borde son restricciones que se imponen en un problema matemático para definir completamente la solución. Estas condiciones se aplican en los límites de una región o dominio y son fundamentales para encontrar una solución única y bien definida, en este caso dependen del tiempo o la temperatura, son importantes para resolver las ecuaciones diferenciales de Fourier. Los cuatro fenómenos físicos que facilitan la transferencia de calor en los límites son: convección, absorción solar, conducción e

irradiación. Cada punto de un elemento de hormigón tiene una función diferente de calor de hidratación debido a los efectos del entorno. Consideramos la transferencia de calor por convección general causada por el movimiento del aire utilizando la ley de Newton.

$$Q = hA(T_s - T_a)$$

De acuerdo con esto y en vista de que la experimentación permite realizar los ajustes de acuerdo con las condiciones ambientales y materiales, se proponen en el proceso experimental el ajuste de la ecuación teórica de generación de calor con el fin de responder a las cualidades del bloque y a las condiciones de generación del tipo de material específico, por lo que al finalizar su ejemplo experimental y una vez calibrados los modelos en software se obtienen resultados ajustados al 98% de aproximación, razón por la cual dicha regresión será utilizada más adelante con el fin de que se definan las condiciones de ajuste a las curvas propuestas por el estudio.

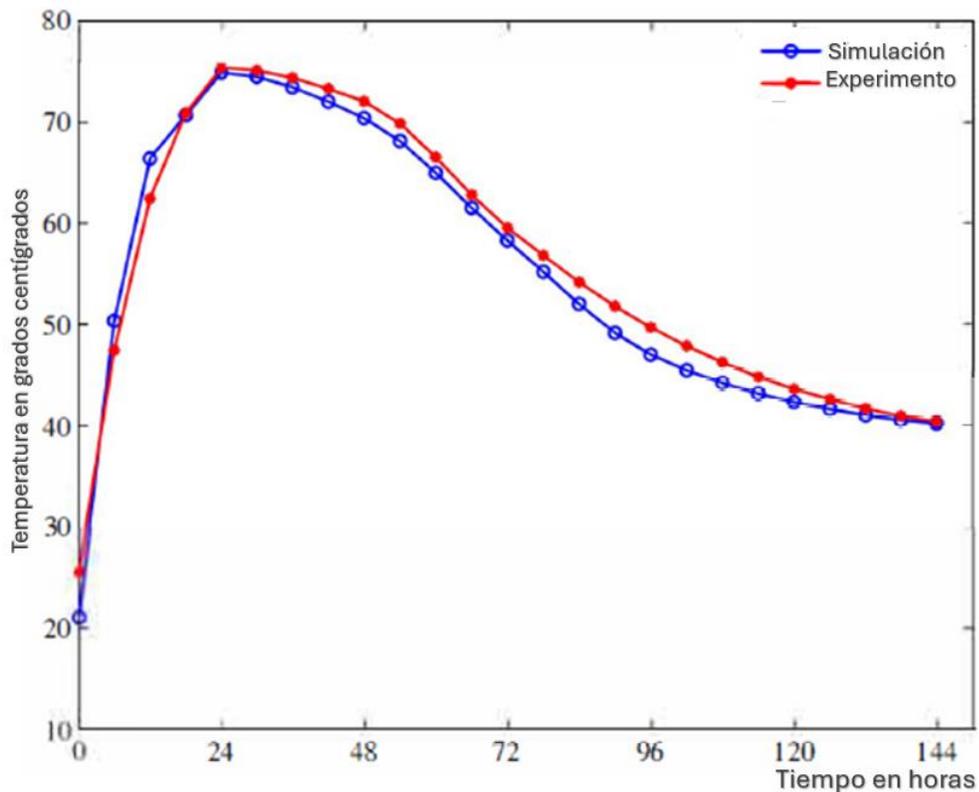


Figura 4.4: Cambio de temperatura en el núcleo con respecto al tiempo.

Fuente: Efecto térmico de estructuras de concreto en masa en los trópicos: estudios experimentales, de modelado y parametrización” (Abeka; 2017).

El resultado analítico de la tasa de variación de la temperatura en el centro del bloque de concreto se expone teniendo en cuenta que una de las características adicionales del desarrollo de las modelaciones del software adopta la interpolación spline para obtener una función continua del desarrollo tiempo-temperatura. Luego se ven comparativamente los resultados de la distribución de temperatura observada y los resultados analíticos simulados en el núcleo del concreto. En el núcleo de la sección de hormigón en masa considerada se observó un aumento de temperatura hasta los 75,4°C a las 24 h, con un descenso gradual hasta 40,36°C a las 144 h después de la colocación del concreto. Un aumento de temperatura de 50°C aproximadamente significa que hubo una Formación de Etringita Retardada (DEF), lo que provoca un agrietamiento masivo de los bloques experimentales (Gajda y Vangeem, 2002). El valor de 75,4°C es comparable al aumento de temperatura dentro de las 24 h posteriores a la colocación del concreto, el valor de 74,32°C obtenido por (Prasanna y Subhashini, 2010), y el rango de 79 a 42°C obtenido por (Bartojay, 2012).

El diferencial de temperatura máxima en el tiempo de evaluación fue de 52,5°C que corresponde como lo muestra la gráfica anterior, de 22,9°C que fue la temperatura inicial, dato que permaneció constante durante todo el período de análisis hasta los 75,4°C (observado en el núcleo y la superficie del bloque de concreto). Esta diferencia se atribuye al hecho de que el concreto hidratado en la superficie pierde calor a un ritmo mayor que el elemento central del hormigón, y define de manera general el gradiente térmico del proceso de hidratación, o gradiente térmico del concreto masivo en este caso, valor que será comparado con los métodos de análisis y evaluación. Todo lo anterior teniendo en cuenta que la mezcla empleada para el concreto tiene un contenido cemento de 485 Kg/m³

Finalmente el documento, toma como base los datos de las temperaturas evaluados en todos los tiempos de reacción de la mezcla, para determinar el potencial de agrietamiento debido al estado de carga, fue necesario un análisis de tensión para evaluar el estado límite de tensión. La condición de estado límite se produjo cuando las tensiones inducidas térmicamente fueron más grandes que su capacidad para soportar tensión en ese periodo de tiempo específico. Las restricciones provocaron el diferencial máximo de temperatura, la expansión desigual y la contracción de los dos extremos de una sección determinada,

produciendo así grietas en las superficies superiores (Khan et al., 1998; Lachemi et al, 1997). El procedimiento para el análisis de tensiones es similar al del modelo térmico. El tipo de análisis y cuantificación de las variaciones en las propiedades mecánicas y condiciones de contorno, pero estas no hacen parte de la evaluación del presente documento.

4.5 Evaluación de la metodología de modelación por el método de los elementos finitos

Como parte de la determinación de posibles métodos de evaluación y cálculo de la variación del gradiente térmico en concretos masivos y así mismo de la propuesta de metodologías para abordar el problema de su determinación abordados desde una propuesta práctica, se realiza la modelación de la situación radica en la reproducción un bloque experimental de 1,1 m x 1,1 m x 1,1 m en el paquete de software ANSYS. La intención del ejercicio es medir el efecto de variación en la generación de calor sobre el desarrollo de la temperatura con el tiempo y la ubicación. El elemento se discretiza cada 50 mm de largo en cada borde del bloque mientras que se establece un criterio de convergencia basado en la temperatura para dar estimaciones confiables de la distribución de temperatura. Se utilizó el tipo de elemento SOLID 70 para representar la definición del elemento y producir elementos pequeños que permitan el transporte de las cargas a lo largo de los nodos de los elementos que se entrelazaron para solucionar el problema.

El elemento SOLID70 en este caso, se utiliza debido a que tiene la capacidad de combinar y relacionar nodalmente los comportamientos de conducción térmica en las tres dimensiones, para eso el elementos está compuesto por un sistema de ocho (8) nudos con un único grado de libertad, lo que permite mantener la temperatura como única condición de magnitud a lo largo de las conexiones del volumen, al cual es aplicable un análisis térmico en unión de las tres dimensiones en estado estable o transitorio, de la misma manera que puede compensar el flujo de calor del transporte de masa desde un punto de velocidad constante.

Entre las características del elemento está el de ser un elemento ortotrópico, correspondiente igualmente a las direcciones de coordenadas de los elementos, en las que el calor específico y la densidad pueden ser ignoradas para tipos de análisis en estado estacionario. De la misma manera, las propiedades no se ingresan por defecto, sino que

hay que ir cargando la información del material de las condiciones de carga que se generan en todas las direcciones a manera de cargas nodales. De manera adicional, efectos como la convección o el flujo de calor y la radiación pueden ser ingresadas como datos estacionarios. Así mismo las tasas de generación de calor pueden ser ingresadas como cargas del cuerpo del elemento aplicada en los nodos de las caras, y dependiendo de las condiciones de borde y de las condiciones iniciales del problema, este índice de tasa de generación de calor puede ser considerado variable o constante.

Con lo cual en la etapa de procesamiento del uso de un método de elementos finitos se puede describir una metodología que implica la formulación del proceso y la evaluación, o procedimiento de solución.

Inicialmente el procesamiento se basa en la constitución geométrica de los elementos a evaluar así como los atributos físicos del material con que se va a interactuar, procedimiento que se desarrolla inicialmente en 5 pasos:

1. Se realiza la elección del tipo de elemento con el que se va a desarrollar la modelación, en este caso el elemento descrito como SOLID70 (ANSYS) un elemento sólido conformado por 8 nodos que tienen en sus características la temperatura como uno de sus grados de libertad.
2. Se declaran paso a paso las propiedades del material en este caso termo-dependiente, variables como la conductividad térmica, el calor específico y la densidad. En cada caso se va determinando las magnitudes de cada propiedad correspondiente con los valores iniciales de temperatura y su variación, basándose en la temperatura ambiente y en las cualidades termodinámicas del sólido.
3. Se construye la modelación geométrica del elemento tridimensional con las condiciones iniciales, en este caso el sólido será un cubo de 1,10m x 1,10m x 1,10m.
4. Se realiza la división del sólido, teniendo en cuenta que el material tiene las mismas características de deformación y resistencia en todas sus direcciones, buscando que los elementos tengan el mismo tamaño en este caso para ir determinando las variaciones de la temperatura interna del elemento con respecto al dato agregado anteriormente de la temperatura ambiente. Es

importante cerciorarse en los primeros ejercicios de solución que el grado de refinamiento de la malla garantice la trazabilidad y la convergencia de los resultados.

5. Se declaran las condiciones de frontera del análisis, comenzando por la pérdida de calor del modelo por convección al medio, a través de todas las caras de exposición del sólido, quienes emitirán e intercambiarán las tasas de calor entre el interior del elemento y la superficie expuesta a la temperatura ambiente, mediante la determinación del coeficiente de convección y la temperatura del medio.

Por otro lado durante el proceso de soluciones será necesaria la determinación de las condiciones del proceso, el software en particular tiene dentro de sus características, por lo menos dos tipos de secuencia de solución de las características del problemas, dentro de las cuales está el análisis directo lineal y no lineal y el sistemas de análisis denominado (transient) o de orden transitorio, que permite que el análisis se desarrolle de manera progresiva, con respecto a la variable tiempo, es decir que se puede de esta manera ir evaluando y analizando el desarrollo de proceso del producción de calor en este caso, en cada uno de los puntos de acuerdo con las variaciones de exposición del sujeto evaluado y de acuerdo también a las cualidades de la información suministrada en la cual los datos de contingencia y de consolidación del procesos de análisis deben tener en cuenta igualmente, las condiciones de cambio de las variables soportadas a lo largo del tiempo.

De acuerdo con la determinación de las variables principales que pueden influir en la generación de calor, en el proceso de curado del concreto en particular, se tienen en cuenta las condiciones de especificidad del concreto que se vaya a utilizar en el mezclado y el vertido del material.

Todos los estudios de materiales suponen indistintamente, que los materiales de construcción se estabilizan térmicamente a partir del efecto de conexión, es decir que a pesar de que en la termodinámica de sólidos existen otros métodos de liberación de energía como la radiación y la conducción, sin embargo materiales como el concreto dependen de la transferencia de temperatura para modificar su estado de acuerdo con las condiciones de inercia térmica propia del material, es por eso que la convección de la

temperatura del medio, es la que regula la modificación de la cantidad de calor y esta tiene condiciones específicas de acuerdo con el modo de uso del material.

En virtud de lo anterior, de acuerdo con (Ayotte et al, 2007), la temperatura ambiente y la evolución del del calor de la hidratación del cemento, juega un papel esencial en el aumento de la temperatura de la masa de concreto, y aunque estas variables tienen magnitudes variables y son aleatorias de acuerdo con la condición ambiental, se puede suponer que la distribución de temperatura en el momento particular de la emanación de calor cumple con las condiciones mínimas de un proceso estocástico. Además, debido a que las propiedades de resistencia del concreto aumentan con el tiempo al mismo tiempo que se presenta una variación del gradiente térmico entre el núcleo y la superficie de la sección de concreto masivo.

De esta manera, (Abeka; 2017) acota el tiempo de análisis si se tiene en cuenta que el efecto del comportamiento térmico del concreto se considerará crítico en edades tempranas, más exactamente dentro de los primeros 6 días después de la colocación del concreto, dando pie para que las condiciones experimentales y de modelación se establezcan dentro de esos plazos, a partir del ya mencionado análisis transitorio con el fin de controlar la distribución de la temperatura con respecto al tiempo en las condiciones ambientales y de material previamente definidas. Adicionalmente, de manera teórica la modelación se puede establecer para considerar la condición de conexión en una de las caras de la masa del concreto si se tiene en cuenta el encofrado del elemento durante su primer proceso de secado y comienzo del proceso de curado, o como en el caso del análisis propuesto, para determinar la variación con respecto al fenómeno de enfriamiento por el mismo método con respecto a todas las caras.

Es en este punto, en el que se hace muy importante la variable de la tasa de generación de calor interno en el concreto, (Heat Generation Rate), una condición que permite determinar en casa caso específica a tasa de generación de calor del material que está siendo evaluado, con lo cual queda dicho que la mencionada tasa de generación de calor interna, va a depender en cada caso de las características específicas del material que se esté evaluando y va a ser indistintamente una de las variables más importantes en la determinación de la condición de generación de calor en el proceso exotérmico de hidratación del concreto en este caso específico.

Así, era necesario el uso de un perfil discreto para la determinación de la temperatura con respecto al tiempo en el núcleo del bloque de concreto masivo, como insumo necesario para predecir teóricamente la tasa de calor de hidratación continua de la pasta en el modelado. Debido a la naturaleza de la curva de calor, varios investigadores han propuesto modelos de hidratación adiabática, procesos numéricos de regresión que generalmente se definen mediante una función de orden exponencial, sin embargo, hay acuerdo en el uso de las variaciones del modelo empírico de hidratación adiabática propuesto por (Suzuki, et al, 1990), el cual es utilizado para relacionar la ruta de evolución del calor interno de los materiales cementantes, y el cual se describe matemáticamente de acuerdo a la expresión a continuación, mediante la cual se calcula la evolución del calor interno a partir de la curva de aumento de la temperatura.

$$T_a(t) = T_{\infty}(1 - e^{-at})$$

Ecuación 13. Ecuación de temperatura de calor interno de los materiales cementantes
Fuente: (Suzuki et al., 1990)

Donde:

T_{∞} : es el aumento máximo de la temperatura.

$T_a(t)$: es el aumento de la temperatura adiabática en t días, después de fundido.

a: es el coeficiente de aumento de la temperatura.

t: es el tiempo en días.

Sin embargo, las condiciones en las que esta expresión deben ser utilizadas divergen de manera que el tiempo de aplicación sea el centro del desarrollo del análisis transitorio, determinando además que de esta manera, se establece la modificación de las condiciones de generación de calor interna con respecto al tiempo, y también las variaciones de la modelación de las condiciones de convección del ambiente representado por las condiciones iniciales en la temperatura ambiental, es por esa razón para determinar la distribución de la temperatura con respecta al cambio del tiempo y de los incrementos y decrecimientos del calor interno del bloque de concreto masivo, se tuvo en cuenta la definición del aumento adiabático de la temperatura. Luego esos valores de temperatura se normalizaron restando la temperatura de colocación inicial. Es así como de acuerdo con (Abeka, Agyeman y Asamaah, 2017), se hizo la adopción de la propuesta de Suzuki expuesta anteriormente, para con ella realizar un análisis de regresión no lineal, con

respecto a la variable del tiempo con el fin de definir en cada uno de los casos las temperaturas de generación.

La propuesta de regresión a partir de la expresión de calcula la evolución del calor interno a partir de la curva de aumento de la temperatura propuesta por Suzuki, permite comparar el modelo predicho con los resultados determinado experimentalmente en un intervalo de confianza del 95%. Por lo tanto el modelo adoptado cuantificó el análisis térmico con respecto al volumétrico y su variación con respecto al tiempo de acuerdo con la siguiente expresión.

$$q(t) = 20,000 \times e^{-0.9398 - \frac{1}{24}}$$

Ecuación 14. Generación de calor interna
Fuente: (Suzuki et al., 1990)

Donde:

$q(t)$: Es el valor de la generación de calor por unidad de volumen en t días.

t: tiempo en días.

Dado lo anterior se realiza el cálculo de Generación de calor interna de acuerdo con la expresión anterior, siendo este el dato más relevante en el aumento de las condiciones de temperatura del concreto dado que, es un calor significativo, determinado por la reacción de hidratación de la pasta cementante, y que puede variar en cualquier caso teniendo en cuenta que depende de las características de la pasta cementante, es decir de la composición del cemento, y de las características asociadas a su relación de agua y cemento, también anotando que resulta importante para la calidad de la hidratación la determinación de la tasa de enfriamiento, ya que en la medida en la que el concreto se enfría más rápido, debido a la convención y cualidades de la reacción, más rápido se detiene el proceso químico de hidratación de la pasta que conforma el concreto.

TASA DE GENERACIÓN DE CALOR DE HIDRATACIÓN			
<i>t (horas)</i>	<i>q(t)</i>	<i>Valor Medio</i>	<i>Área Media</i>
0	0		
2	1302	651	1302
12	7814	4558	45580
18	6085	6949,5	41697
24	4380	5232,5	31395
48	1743	3061,5	73476
72	641	1192	28608
96	235	438	10512
120	87	161	3864
144	32	59,5	1428
		Σ	237862
		Σ	1651,82 KJ/sm³

Tabla 4.1. Tasa de generación de calor de hidratación
Fuente: Producción propia

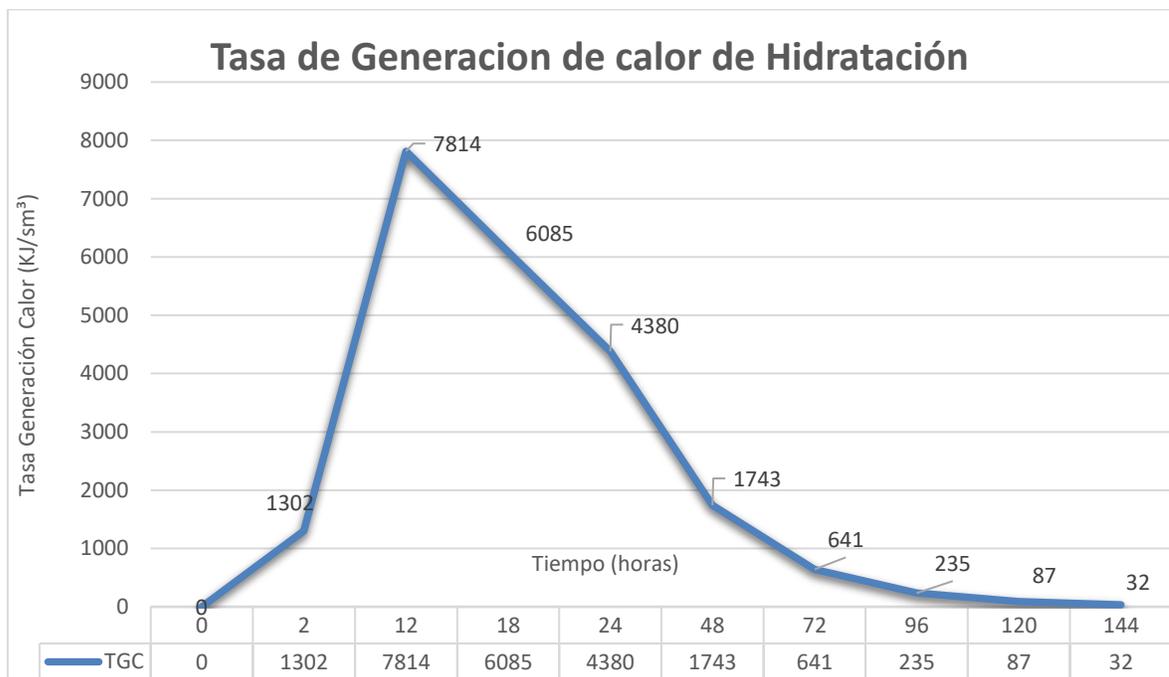


Figura 4.5: Gráfica de la ecuación de regresión de la ecuación de generación de calor propuesta por Suzuki y calibrada con el ensayo de Abeka.
Fuente: Producción propia

Esta tabla, determina las cualidades térmicas del material en este caso del concreto que se plantea en el ejercicio de revisión, y es en términos prácticos el criterio determinante de la generación de calor del material, si bien la masividad de la pieza es importante en la medida en la que mayores volúmenes o cantidades de pasta cementante repercuten directamente en la cantidad de calor producida por la reacción, esta será la cualidad más importante para poder predecir la forma como se genera el gradiente o diferencial de temperatura desde el núcleo hasta la cara expuesta más próxima, cuando como en este caso la evaluación se hace sin considerar variaciones por las características del encofrado.

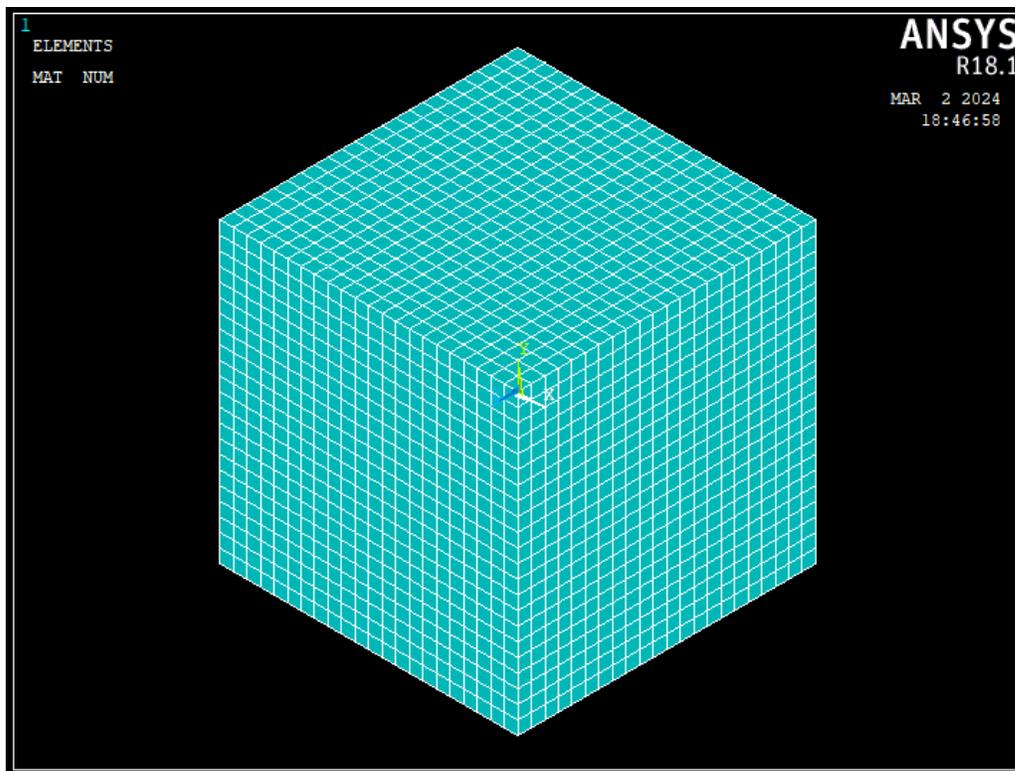


Figura 4.6: Bloque de concreto modelado

Fuente: Producción propia

Adicionalmente se revisa en las características del modelo, las cualidades de la programación del proceso de análisis, para la determinación del proceso transitorio en el que se desarrolla la evaluación de los datos de la temperatura teniendo en cuenta que si bien el análisis es no lineal, el avance del tiempo a lo largo de la ejecución del tipo de secuencia si es lineal.

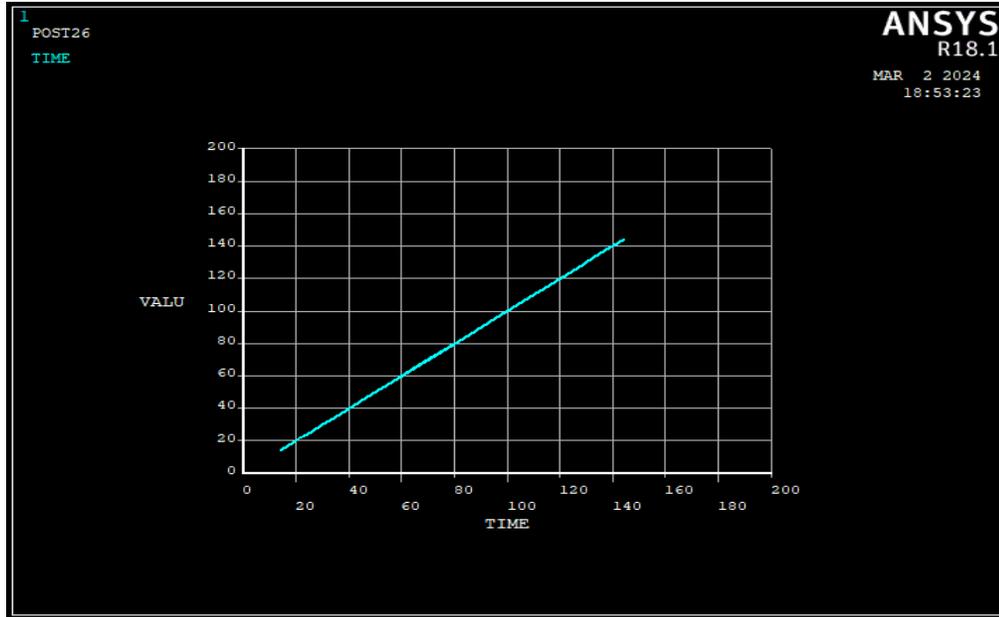


Figura 4.7: Trazabilidad lineal de la variación progresiva del tiempo y la evaluación de la temperatura en cada punto.

Fuente: Producción propia

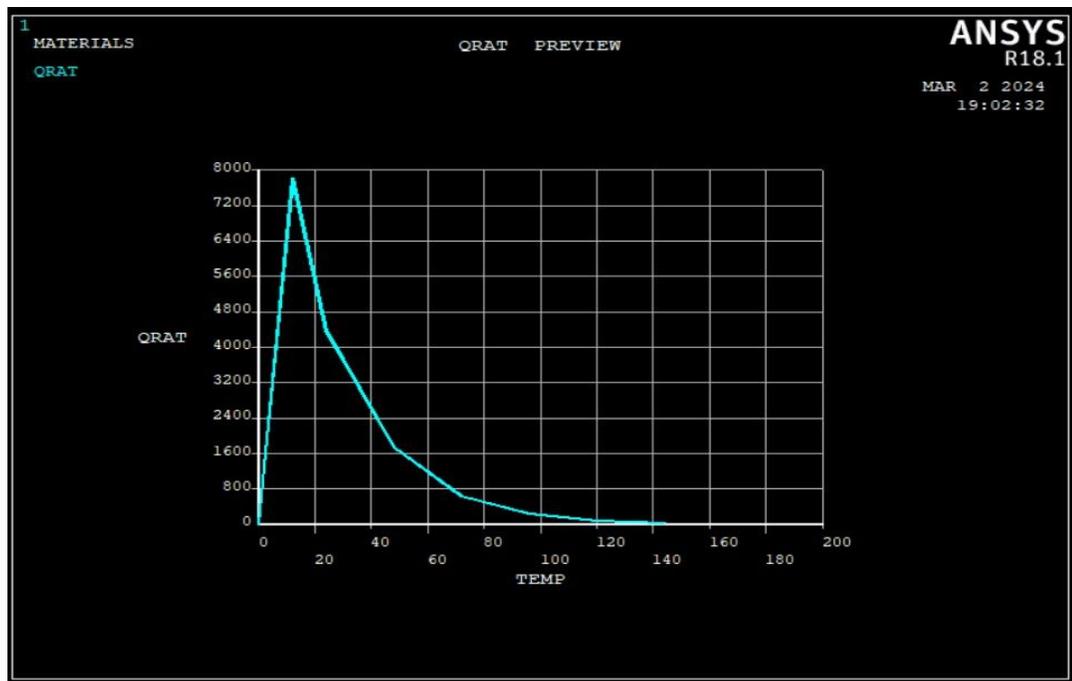


Figura 4.8: Trazabilidad no lineal de la variación progresiva de la temperatura con respecto al tiempo

Fuente: Producción propia

Finalmente tras la revisión de la modelación se obtienen los resultados del modelo en el que se establecen las siguientes magnitudes del gradiente térmico:

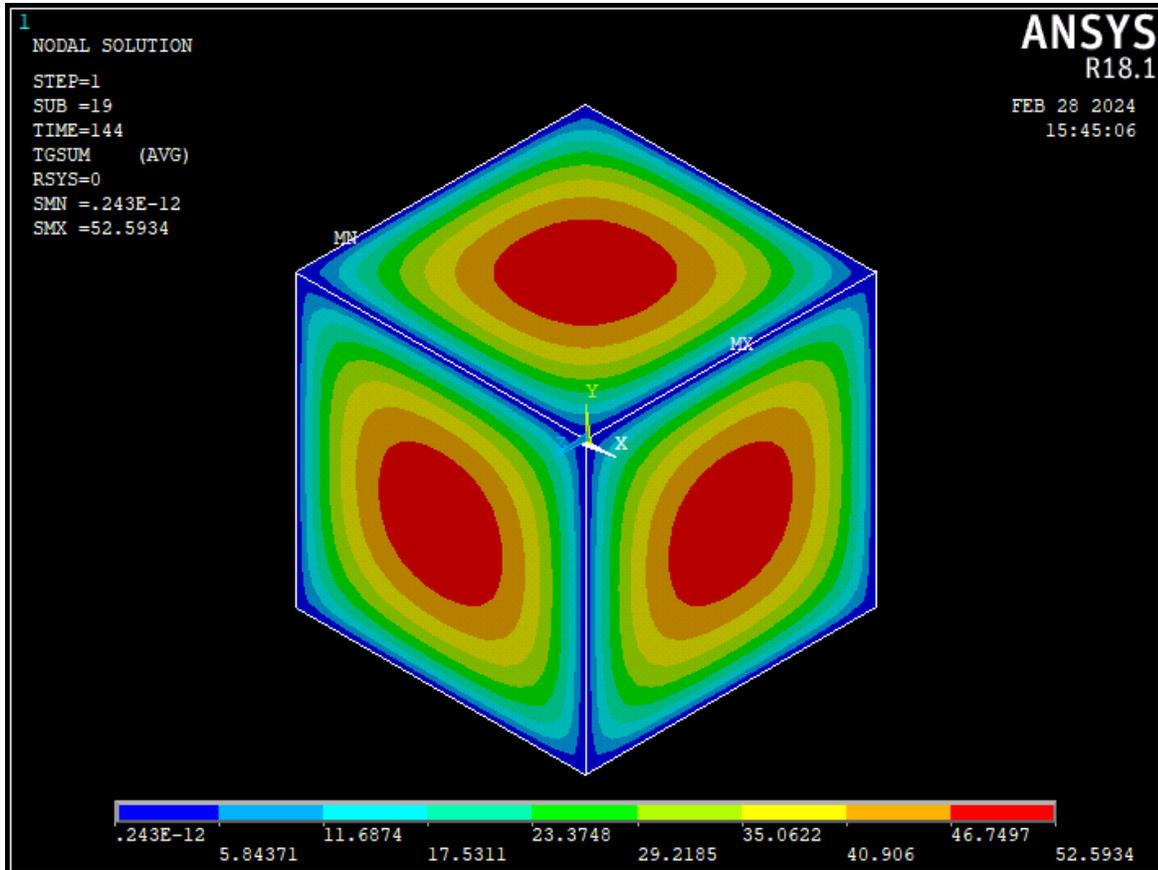


Figura 4.9: Bloque de concreto modelado con efecto de temperatura

Fuente: Producción propia

En la figura anterior, se observa el resultado de la modelación del bloque de concreto en el cual se evidencia que al finalizar la revisión de las 144 horas se obtienen valores máximos de diferencia en la temperatura de $52,59^{\circ}\text{C}$. siendo este el valor final, y condición del gradiente térmico, medido desde el borde donde se encuentran las condiciones iniciales de la temperatura ambiental, y del fraguado de la colocación del bloque de concreto masivo medido hasta el núcleo desde cualquiera de las dirección del sistema.

Lo anterior coincide aproximadamente con las condiciones iniciales de la experimentación y del tipo de modelación planteada en el ejemplo inicial donde el valor del gradiente térmico encontrado por la instrumentalización fue de $52,50^{\circ}\text{C}$ aproximadamente.

Dentro de las afectaciones más importantes está el tema del uso de las condiciones de borde, la temperatura de arranque y el coeficiente de disipación térmico, que tendrá directa repercusión en la manera como se establecen los datos de modificación de la temperatura con respecto al tiempo de análisis, en función del tamaño del elemento y de las áreas de exposición al medio.

4.6 Evaluación de la metodología de análisis del modelo gráfico de ACI 207.2R-22

De manera similar y basados en las definiciones concluidas en los métodos anteriores, otra posibilidad para la determinación de posibles métodos de evaluación y cálculo de la variación del gradiente térmico en concretos masivos y así mismo de la propuesta de metodologías para abordar el problema de su determinación abordados desde una propuesta práctica, se puede apoyar la propuesta en las recomendaciones de la Sección 2 del documento ACI 207.2R-22, el cual contiene recomendaciones para la determinación de las magnitudes del cambio de la temperatura a partir de cuadros y ecuaciones basados en datos empíricos y a partir de la determinación de algunas condiciones iniciales y materiales del concreto, ubicando la temperatura máxima del concreto en masa, en lo sucesivo denominado “Método gráfico de ACI 207.2R-22”, a partir del resumen de la expresión de la evaluación de calor de sólidos para procesos adiabáticos, descrito como un proceso reversible o isoentrópico.

$$T_r = T_I \cdot \frac{T_f}{T_{1800}}$$

Ecuación 12. Gradiente de temperatura adiabática

Donde:

T_r : es el aumento de temperatura adiabática °C.

T_I : incremento de la temperatura adiabática del cemento Tipo I según ACI 207.2R-22,

T_f : es la generación de calor en porcentaje de la generación de calor en 28 días para la finura del cemento medida de ACI 207.2R-22.

T_{1800} : es la generación de calor en a los 28 días para cemento de 1800 cm²/g (6,15 pulg²/lb) de ACI 207.2R-22.

Desde luego es importante anotar que si bien el principio del proceso se considera como un proceso adiabático, es decir un proceso en el cual los volúmenes normalmente tienen impedimento para realizar la transferencia de calor, toda vez que puede encontrarse aislada, como en el caso de los elementos de concreto encofrados, sin embargo, la condición anterior no implica que los procesos desarrollados o evaluados dentro de este concepto no presenten efectos de calentamiento o enfriamiento toda vez que el calor puede ser elevado o disipado por las condiciones de interacción del cuerpo con el ambiente como en el caso de la relación de la producción interna de calor del concreto masivo en este caso y las condiciones convectivas del aire circundante y su vinculación a través de cualquiera de las caras.

Así, con base en las características materiales y ambientales, las iteraciones y las regresiones desarrolladas en procesos de análisis de laboratorio de piezas con diferentes cualidades dimensionales y materiales, recomienda procedimientos para la evaluación del funcionamiento de los concretos y de esta manera, a partir de dichas recomendaciones, se puede optar por proponer la siguiente metodología para a partir de la información y las consideraciones experimentales determinar de manera analítica el gradiente térmico en las reacciones de hidratación de concretos masivos.

En los siguientes enunciados, se condensan los pasos mínimos necesarios para el cálculo del gradiente térmico en el concreto masivo a partir de las recomendaciones e investigaciones adelantadas por el comité ACI 207-2R-22, en los cuales se hacen las determinaciones de las variables geométricas iniciales, así como las condiciones de temperatura a lo largo de la reacción con el fin de ir siguiendo la metodología propuesta, y definiendo los valores a partir de los ábacos recomendados para la definición de los valores de la elevación de la temperatura y la posterior magnitud del gradiente térmico del elemento, en los siguientes 5 pasos.

1. Determinar la relación que existe entre el volumen del elemento fundido, con el área expuesta sobre la cual se produce el intercambio térmico entre la pieza y el medio.
2. A partir de las condiciones iniciales de la mezcla, las características iniciales de la misma, y la determinación de como las variables siempre presentes en cada

ensayo, correspondiente a las temperaturas de vaciado y la temperatura de fundida, con el fin de determinar a partir de los ábacos propuestos por ACI 207-2R-22, cuál sería el tiempo máximo de desarrollo del aumento de la temperatura en el concreto masivo.

3. Determinación de la temperatura mínima en la cara expuesta, dado que esta determina las cualidades del intercambio térmico y consolida de esta forma la tasa de generación de calor que se está previendo para el análisis del sistema.
4. Determinación de la elevación de la temperatura de acuerdo con las condiciones del concreto y el medio mediante el uso del ábaco recomendado por ACI 207-2R-22.
5. Finalmente se realiza el ajuste de la elevación de la generación de calor de manera lineal a partir de una regla de tres, teniendo como base a la determinación del contenido de cemento referenciado en los ábacos de ACI 207-2R-22, con la verdadera cantidad de cemento utilizada en la mezcla, que en este caso se encuentra dentro de los datos de entrada del modelo experimental que se encuentra bajo validación para finalmente obtener el valor aproximado del gradiente de temperatura de acuerdo con las condiciones iniciales y las variables definidas en el proceso.

De esta manera se establecieron cada uno de los parámetros para la ir definiendo las condiciones de la mezcla, empezando por la caracterización geométrica del elemento, dado que en cuanto a su forma, resulta importante para la evaluación de las temperaturas, determinar cuáles son las distancias entre los núcleos de las diferentes figuras posibles con su cara o sus caras expuestas, ya que esto determina la velocidad del intercambio calórico y así, la magnitud de generación de calor interno que puede tener el elemento antes de ser capaz de reducir sus cualidades físicas y químicas propias de la hidratación y del cambio de estado entre un elemento fluido y un elemento mayormente sólido. Así la relación entre el volumen colocado y el área expuesta estará dada por la expresión:

$$S_v = \frac{\text{Área expuesta disipación}}{\text{Volumen}}$$

Así, teniendo en cuenta que el cubo de concreto masivo, es un elemento prismático, cúbico de 1.1m de lado:

$$V = 1,10 * (1,10 * 1,10) = 1,33m^3 \text{ (por metro lineal)}$$

$$A = (1,10 + 1,10) = 1,21m^2 \text{ (por metro lineal)}$$

$$S_v = \frac{A}{V} = \frac{1,21}{1,33} = 0,91m = [0,27ft]$$

Luego de la determinación de la relación del área con el volumen, teniendo como base los datos suministrados en el experimento en validación, se obtiene el tiempo máximo de desarrollo del aumento de la temperatura en el concreto masivo, además de forma coincidente, la revisión se desarrolla para un concreto elaborado con cemento Portland tipo I, que en nuestro país corresponde con el cemento tipo UG de la Norma Técnica Colombiana NTC 121.

De acuerdo con la tabla 4.4 de ACI 207 2R-22 con:

*Temperatura de vaciado = 68 °F
20 °C*

*Sv= 0,91 m
0,27 ft*

*Temperatura máxima (Peak) se obtiene a los
0,5 días*

*Temperatura colocación 89,24 °F
31,8 °C*

*Elevación de la temperatura. 44,60 °F
7,00 °C*

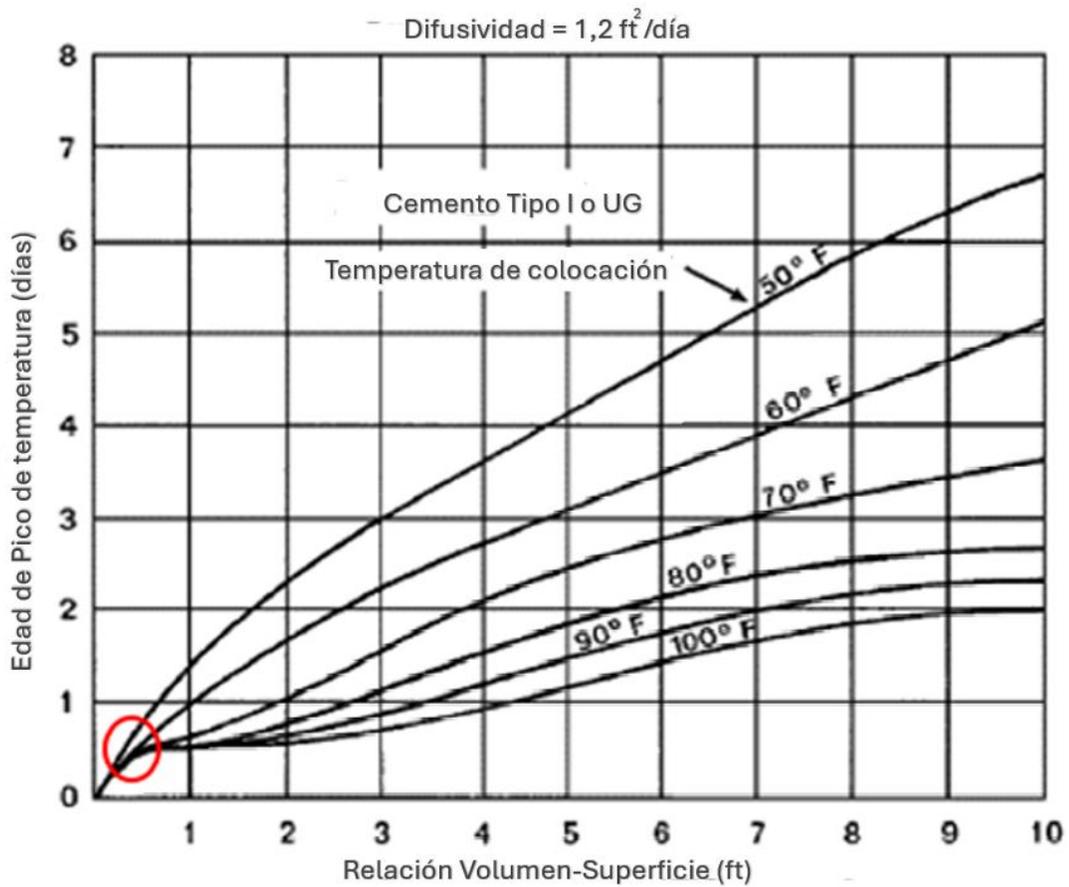


Figura 4.10: Gráfica 4.4 ACI 207 2R-22, edad del concreto en la que se presenta el pico de temperatura, con respecto al tiempo en días

Fuente: ACI 207 2R-22

Una vez obtenido los datos correspondientes al tiempo en el que el tipo de elemento alcanza la máxima temperatura en edades tempranas, se procede a evaluar de la misma manera la velocidad de disipación, que controla el proceso de hidratación y en consecuencia limita la reacción con la subsecuente producción de calor interno. Para entrar en la tabla se requiere Sv en ft

Determinación Sv

eq. pies

Arista= 3,62 ft

Volumen = 47,38 ft³

$$\begin{aligned} \text{Area} \\ \text{expuesta} &= 13,09 \text{ ft}^2 \\ \boxed{\text{Sv}} &= \boxed{0,27} \text{ ft} \end{aligned}$$

De acuerdo con la tabla 4.6 de ACI 207 2R-22

Porcentaje disipado 93 %

se calcula la temperatura efectiva de colocación

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

$$T_{PL} = 89,20 + 0,93 (68 - 89)$$

$$T_{PL} = 70,30 \quad ^\circ\text{F}$$

$$T_{PL} = 21,29 \quad ^\circ\text{C}$$



Figura 4.11: Gráfica 4.6 ACI 207 2R, porcentaje absorbido o disipado entre la diferencia de temperatura ambiental y de colocación

Fuente ACI207-2R

En adición a lo anterior, se avanza en la determinación de la temperatura mínima de la cara expuesta, en la cual intervienen la relación del área expuesta sobre el volumen, esta vez ya teniendo en cuenta que el elemento está desencofrado y que se exponen por lo

menos 5 caras a partir de la ecuación 4-4 del ACI 207 2R-22

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

$$At = \begin{array}{ll} 6,05 & m^2 \\ 65,45 & ft^2 \end{array}$$

$$V/At = 65.45/47.37 \text{ ft}$$

$$V/At = 1,38 \text{ ft}$$

Estableciendo que la temperatura media mensual es del orden de 18°C

	°C	°F
$T_M =$	18	64,4
$T_A =$	20	68

$$T_{min} = 68 + \frac{2(64.4 - 68)}{3} \sqrt{\frac{1.38}{96}} = 7.85^\circ C$$

$$T_{min} = 67,7^\circ F$$

$$\underline{T_{min} = 19,8^\circ C}$$

Luego, tras la determinación de la temperatura mínima, a partir del uso de la siguiente figura que corresponde con la gráfica 4.3 de ACI 207-2R se procede a encontrar el valor del incremento de la temperatura adiabática en el concreto que tiene como base la temperatura de colocación medida, y la relación de las dimensiones geométricas del elemento para predecir la elevación de dicha temperatura en el proceso de hidratación.

Temperatura de colocación	89,2 °F
TPL=	21,3 °C
Sv=	0,276

Elevación de la temperatura	43 °F
	<u>23,9 °C</u>

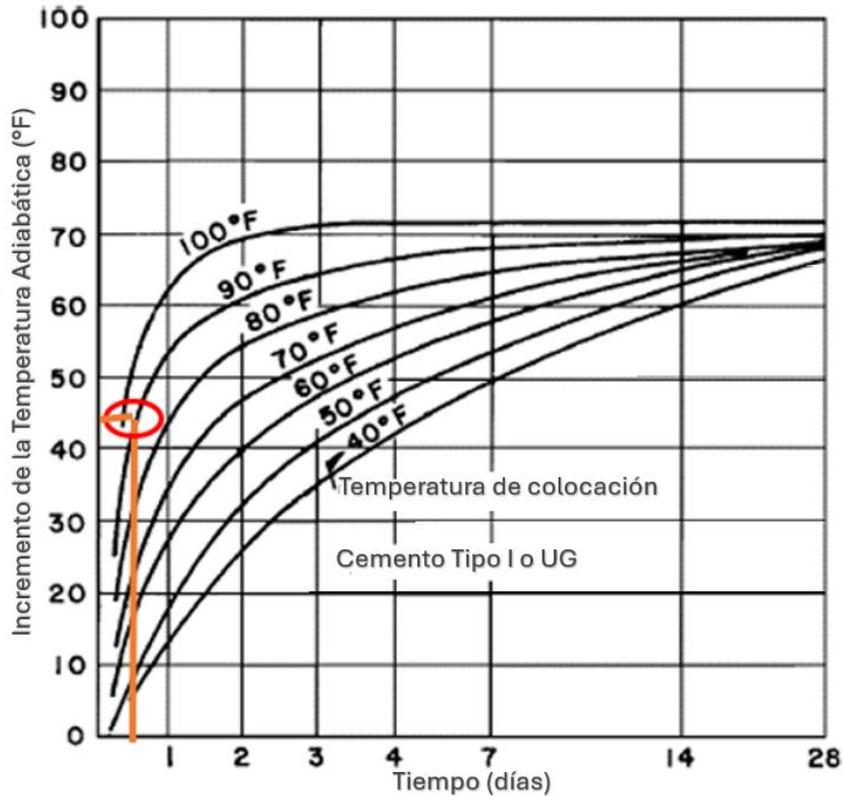


Figura 4.12: Gráfica 4.3 ACI 207 2R-22, incremento de la temperatura adiabática con respecto al tiempo
Fuente ACI207 2R-22

Los valores anteriores teniendo en cuenta que la temperatura de colocación medida está cercana a los 90°F y que el tiempo de mayor desarrollo de la temperatura se da en 0.5 días, es decir a aproximadamente a las 12 horas de colocación.

Finalmente, es necesaria la realización de un ajuste de acuerdo con el cual, es indispensable que se ajuste el valor final de la temperatura, teniendo en cuenta que todas las tablas y gráficos que provee el ACI 207 2R-22, se encuentran calibradas para un concreto cuyo contenido de cemento es de 223 Kg/m³ (367 Lb/yarda³), mientras que las muestras de validación del modelo experimental, tienen como datos suministrado, el de una mezcla de concreto con contenido de 485 Kg/m³, con lo cual se realiza en este caso una calibración final de manera lineal sobre el análisis analógico que nos determina la siguiente temperatura, como el valor final de incremento de la temperatura, y así mismo el valor final del análisis de la magnitud del gradiente térmico.

$$T_{CF} = 43 \left(\frac{485}{223} \right) = 93.5 \text{ } ^\circ F$$
$$T_{CF} = 51,96 \text{ } ^\circ C$$

4.7 Propuesta de metodología de análisis para la determinación del gradiente térmico del concreto masivo

A partir de la determinación de las magnitudes del gradiente térmico con base en la interpretación de las metodologías de analizadas, desde la revisión del proceso de experimentación con la toma de las magnitudes de la temperatura en los bloques de concreto realizado por (Abeka; 2017), y los análisis realizados por medio de los métodos de modelación por el método de los elementos finitos y por el método gráfico propuesto por el comité (ACI 207 2R-22), se plantea a continuación una metodología que tenga en cuenta los dos métodos de cálculo del gradiente térmico en concretos masivos, con el fin de determinar su magnitud a través de una serie de pasos de fácil uso, con herramientas que se encuentran en la literatura y se complementen entre sí para dar fiabilidad a los valores obtenidos.

Tras la caracterización del material, la revisión de las condiciones y las circunstancias que afectan en la generación de calor interno del concreto durante el proceso de curado, y especialmente las afectaciones que tienen en su edad temprana, se ha podido identificar que el control de la temperatura se debe realizar especialmente durante el proceso de hidratación, haciendo enfoque en la manera como esta es capaz de disiparse ante la exposición al medio, para que su aumento no implique la aparición de tensiones o esfuerzos que limiten su capacidad. De igual forma, la limitación del incremento de la temperatura interna, producida por la reacción química del proceso de hidratación cemento incide directamente en la reducción cambio volumétricos que producen agrietamientos y consecuentemente pérdidas inminentes de resistencia.

Adicionalmente, las condiciones termodinámicas de los elementos fundidos que no escapan a las características del calor de los sólidos, la reacción de generación de calor de un elementos que cambia su estado a sólido, las condiciones de intercambio calórico, por convección en este caso, que permite la dinámica de intercambio térmico con el medio,

e incluso la influencia de características mecánicas del mismo material con su inercia térmica, que describe la capacidad que tiene el material de aumentar o perder temperatura de acuerdo con la variadas posibilidades de exposición a fuentes de energía calórica.

En vista de la importancia que representa el control de las condiciones de temperatura y basados en la revisión de la metodologías y procesos de análisis realizados, no se han encontrado grandes diferencias en las magnitudes finales de los gradientes térmicos, aun cuando de acuerdo con las cualidades de cada modelo, lo métodos y las escalas de aproximación son diferentes, en cualquier caso, para la evaluación y validación del modelo de base que se ha escogido, obteniendo en cada caso, valores de variación de la temperatura de 52,5°C en el ejercicio experimental, llegando a una excelente aproximación al gradiente térmico mediante el método planteado por elementos finitas, cuya magnitud fue de 52,59°C, y el valor aproximado por el método analítico planteado y basado en las recomendaciones del ACI 207 2R-22 fue de 51,96°C, aproximación que está dentro del alcance de los otros métodos con un 98.90%, aun cuando se utiliza en este último un ajuste lineal de la cantidad de cemento usado en la mezcla, dado que los ábaco de evaluación son para un tipo de concreto específico.

Dadas las relaciones establecidas y las aproximaciones obtenidas se propone que la metodología propuesta para la determinación analítica del gradiente térmico sea utilizada en la determinación del gradiente térmico de manera rápida, en recepciones de materiales para obras o para el ajuste de diseños de mezcla en condiciones ambientales extremas, teniendo en cuenta que la aproximación del 98% es una buena garantía del funcionamiento general de los elementos de concreto masivo.

Adicionalmente con el fin de comprobar la veracidad del proceso, y con el fin de aproximarse un poco más los valores experimentales de cualquier tipo de elemento, teniendo en cuenta las cualidades del análisis nodal por elementos finitos, se pueden realizar ajustes de mezclas o incluso hacer uso de valores iniciales sin necesidad de realizar ajustes de tipo lineal. A partir del análisis con valores iniciales claros determinar las condiciones de modelación un mayor número de variables y de condiciones cercanas a las reales para evaluar la generación de temperatura en sólidos, como único grado de libertad a partir de la siguiente metodología que consta de 10 pasos.

1. Determinar la relación que existe entre el volumen del elemento fundido, con el área expuesta sobre la cual se produce el intercambio térmico entre la pieza y el medio.
2. Determinar el tiempo máximo de desarrollo del aumento de la temperatura en el concreto masivo, a partir de las condiciones iniciales de la mezcla, como la temperatura de vaciado y la temperatura de fundida, mediante el uso de la gráfica 4.4 ACI 207 2R-22,
3. Determinación de la temperatura mínima en la cara expuesta, teniendo como base la disipación de la temperatura, con el uso de la gráfica 4.6 ACI 207 2R-22.
4. Determinación del valor del incremento de la temperatura adiabática a partir del uso de la gráfica 4.3 de ACI 207 2R-22.
5. Realizar el ajuste de la elevación de la generación de calor de manera lineal a partir de una regla de tres, teniendo como base el contenido de cemento referenciado en los ábacos de ACI 207 2R-22.
6. Se realiza la elección del tipo de elemento con el que se va a desarrollar la modelación, se recomienda el uso de un elemento sólido conformado por 8 nodos que tenga en sus características la temperatura como uno de sus grados de libertad.
7. Declarar las propiedades del material en este caso termo-dependiente, variables como la conductividad térmica, el calor específico y la densidad, obtenidos de la información del material.
8. Se construye la modelación geométrica del elemento tridimensional con las condiciones iniciales y se realiza la división del elemento.
9. Se declaran las condiciones de frontera del análisis, comenzando por la pérdida de calor del modelo por convección al medio, a través de las caras de exposición del sólido, quienes emitirán e intercambiarán las tasas de calor entre el interior del elemento y la superficie expuesta a la temperatura ambiente suministrada.
10. Comparar los resultados de las magnitudes finales del gradiente térmico, con los datos de cierre del proceso analítico y los resultados que el proceso de modelación por el método de los elementos finitos, con el fin de determinar su cercanía con el fin de dar comprobación a los procesos de cálculo y utilizar para efectos del diseño el mayor valor entre los dos.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Luego del desarrollo de la toma de datos, la revisión de las condiciones de las pruebas propuestas por el modelo experimental de (Abeka, 2017) y de los métodos de cálculo de la magnitud del gradiente térmico en concretos masivos, como el método de modelación por elementos finitos, y la metodología del método gráfico ofrecido por el comité (ACI 207 2R-22.), se observa que de manera experimental o analítica, presentan concordancia con los tipos de muestreo o de prueba que se plantean, y de igual manera se obtienen magnitudes que se aproximan entre sí, dado que el valor final medido experimentalmente concluye que bajo las condiciones supuestas, la variación de la temperatura fue de 52,50°C, mientras que las magnitudes de la variación de la temperatura en los métodos de modelación y de cálculo por el método gráfico fueron de 52,59°C, y 51,96°C respectivamente, lo que arroja una aproximación de. 99,82% en el caso de la modelación y del 98,97% en el caso del cálculo analítico por el método gráfico. En resumen el seguimiento de las características del incremento de la temperatura del concreto masivo es consistente en las suposiciones y los métodos de análisis.

La evaluación del proceso de análisis por medio de elementos finitos se aproxima a los resultados del ejercicio experimental analizado, con un porcentaje del 99,82%, lo que le otorga credibilidad al proceso de análisis, sin embargo desde el punto de vista investigativo, no es un proceso de fácil acceso, y que en cualquier caso debe tener en su contraparte muestreos que permitan la calibración de los análisis para determinar la fiabilidad de su implementación, obteniendo datos muy similares a los que se obtienen de manera analítica con una menor inversión de tiempo y recurso.

Adicionalmente, el análisis por el método de los elementos finitos requiere del análisis inicial del tipo de modelo seleccionado, y un dispendioso proceso de cálculo si no se utilizan herramientas de software, que a su vez requieren del conocimiento del programa utilizado, y debe supeditarse a las cualidades de ingreso de los datos, propuesta por el tipo de programación que utilice, lo que puede generar reprocesos en las unidades o en la nomenclatura utilizada comúnmente en la literatura.

El análisis numérico desarrollado a partir del método gráfico propuesto por comité (ACI 207 2R-22), tuvo un porcentaje de aproximación del 98,97% con respecto a la medición del proceso experimental desarrollado por (Abeka, 2017), y del 98,80% con respecto al análisis desarrollado por el método de modelación por elementos finitos, lo que indica un buen nivel de fiabilidad en los datos, presenta un error un poco mayor en la medida en que por ser un método gráfico, tienden a generarse mayores tolerancias en la obtención de los datos de las gráficas en las que toca acercarse lo más posible a los datos de entrada y salida de las mismas, y adicionalmente, la calibración de las ecuaciones y de las mismas gráficas se encuentran se encuentran calibradas para un concreto cuyo contenido de cemento es de 223 Kg/m^3 (367 Lb/yarda^3), en cuyo caso si el contenido de cemento de la mezcla que se pretende analizar, no corresponde con ese contenido específico, es necesario realizar un ajuste lineal en proporción del contenido de cemento, que aumenta la incertidumbre de los datos finales del análisis.

El método propuesto por el ACI 207, funciona como un método preventivo y de rápido uso, que determina la necesidad de definir las condiciones del diseño de mezcla o incluso para la toma de decisiones sobre el tipo de materiales a emplear, el tratamiento previo de los mismos e incluso sobre la propuesta del procedimiento constructivo, toda vez que se presenta en 5 pasos sencillos, basándose en investigaciones de los materiales que han permitido hacer la calibración del comportamiento de acuerdo con las proporciones de los materiales, y variables iniciales de fácil obtención.

Por otro lado, la metodología propuesta por el presente trabajo se basa en la ejecución de 10 pasos en los que se condensan las metodologías gráfica y de modelación con el fin, de tener la posibilidad de corroborar la obtención de resultados cercanos a los que se presenten de manera práctica, complementándose entre sí, y permitiendo que el desarrollo

de la metodología rápida alimente los datos de la modelación, la cual con el uso de la herramienta específica utilizada podría desarrollarse también en pocos pasos.

Adicionalmente, la aplicación de la metodología propuesta permite hacer el seguimiento de factores que actúan en el concreto una vez comienza su reacción de hidratación, sin necesidad de tener como base el componente experimental, toda vez que tanto el análisis numérico, como la modelación deben ir arrojando valores cercanos que se van corrigiendo a lo largo del proceso, y que entre ellos también tienen valores de diferencia que están dentro de tolerancias aceptables para su implementación. Solamente vale la pena resaltar que en cualquiera de los casos, para el desarrollo de mediciones eminentemente analíticas, sería recomendable utilizar aquel que otorgue mayor aumento de la temperatura adiabática, cubriendo así cualquier error derivado de las incertidumbres de la metodología.

El uso de tecnologías avanzadas que apliquen aditivos químicos y minerales, combinados con materias primas convencionales, cemento portland y áridos, permite producir concretos adaptables a las condiciones ambientales a la vez que se mejoran sus características de rendimiento. La evolución de estos compuestos evidentemente depende de las condiciones de los mismos proyectos la evolución del procesamiento de la materia prima y de los alcances requeridos por el proyecto, abriendo camino al mejoramiento de las cualidades de los concretos con grandes dimensiones.

Por otra parte, los procesos de evaluación de los gradientes térmicos, así como de la evaluación de los esfuerzos derivados de ella, sobre la capacidad a tracción de los concretos, pueden ser casos de estudio que deberían ser evaluados en todos los procesos de instalación de concretos masivos, debido a que son muchas las variables actuantes y a que pueden ser de ayuda para el desarrollo de procesos estandarizados de diseño o de construcción.

Se puede cuantificar el efecto de las prácticas de campo sobre el desempeño de los concretos, especialmente cuando la cuestión es la durabilidad. Las herramientas de modelado actuales se pueden utilizar para estimar el efecto de un curado y un espesor de recubrimiento de hormigón deficientes en la vida útil y, si se utilizan correctamente, pueden proporcionar la justificación para hacer cumplir y monitorear las “buenas prácticas”. La

cuantificación en términos de los efectos de las malas prácticas de campo en la vida útil puede proporcionar una base para el costo/efectividad de tales prácticas y el cálculo de la compensación si faltan.

Para minimizar el riesgo de agrietamiento durante la construcción, se deben tomar medidas para reducir las tensiones de tracción debido a los efectos térmicos y de contracción. Estas medidas también reducirán las tensiones de tracción residuales y, por tanto, reducirán el riesgo de agrietamiento en elementos estructurales debido a las cargas aplicadas en servicio.

5.2 Recomendaciones

El desarrollo de las actividades de modelación deberá ser acompañado en todos los casos de pruebas físicas que permitan la parametrización de las variables con respecto a un ejercicio de corroboración, los procesos de modelación de situaciones particulares son muy susceptibles a la calidad de los datos de ingreso y su comportamiento también dependerá de las condiciones específicas del momento y de la ubicación del elemento. Luego, si bien los procesos analíticos permiten recrear el comportamiento general de los elementos de acuerdo con un tipo específico de condiciones, estas deben cumplir con todos los requisitos necesarios para que sean adaptables a los tablas y ábacos existentes, puesto que la modificación de las condiciones ambientales, geométricas o materiales de los elementos, conllevara necesariamente a la modificación de los resultados finales, que si bien no tienden a tener datos extremos particular, si pueden generar interpretaciones equivocadas de la respuesta del material, y reducir o su capacidad de funcionamiento, o la disponibilidad de su correcta utilización.

Finalmente se recomienda en estudios posteriores, tomar como base la evaluación de la temperatura adiabática y la liberación de energía al medio como base para la determinación del gradiente térmico teórico, avanzando a partir de allí, es estudios complementarios como la determinación de los esfuerzos generados teniendo como base su funcionamiento térmico y la geometría del elemento en las que también intervienen las velocidades de disipación y acumulaciones de energía en el material.

A. Anexo: Resultados proceso de Modelación por elementos finitos

PRINT ITERATION SUMMARY

**** POST1 ITERATION SUMMARY ****

LOAD STEP 1 SUBSTEP 19 CUMULATIVE ITERATION 19
 TIME = 144.000 TIME INCREMENT = 8.76896
 NUMBER OF EQUILIBRIUM ITERATIONS = 1
 CONVERGENCE INDICATOR = 0
 MAXIMUM DEGREE OF FREEDOM VALUE = 32.5172
 RESPONSE EIGENVALUE FOR 1ST ORDER SYSTEMS = 0.00000
 DESCENT PARAMETER = 0.00000
 HEAT FLOW CONVERGENCE VALUE = 0.00000
 TEMPERATURE CONVERGENCE VALUE = 0.00000

NUMBER OF WARNING MESSAGES ENCOUNTERED= 9
 NUMBER OF ERROR MESSAGES ENCOUNTERED= 0

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	14.400	1	1	1
2	19.200	1	2	2
3	21.000	1	3	3
4	22.800	1	4	4
5	25.881	1	5	5
6	29.850	1	6	6
7	34.415	1	7	7
8	39.239	1	8	8
9	44.149	1	9	9
10	49.084	1	10	10
11	54.027	1	11	11
12	58.972	1	12	12
13	68.862	1	13	13
14	83.262	1	14	14
15	97.662	1	15	15
16	112.06	1	16	16
17	126.46	1	17	17
18	135.23	1	18	18
19	144.00	1	19	19

PRINT TF SUM DIRECTIONS PER NODE

***** POST1 NODAL THERMAL FLUX SUM DIRECTIONS *****

LOAD STEP 1 SUBSTEP= 19
 TIME= 144.00 LOAD CASE= 0

NODE	TFSUM	DIRECTION VECTOR (X,Y,Z)		
1	0.2506E-10	-0.55694	0.57254	-0.60167
2	0.2459E-10	-0.55499	-0.58677	-0.58966
3	0.1064E-10	0.22137	0.93037	0.29223
4	0.5478E-11	-0.19521	0.97197	-0.13100
5	0.4223E-11	-0.63089	0.65838	-0.41050
6	0.3049E-11	-0.46382	0.69077	-0.55472
7	0.3885E-11	-0.70594	0.29333	-0.64467
8	0.4582E-11	-0.72260	0.27139	-0.63576
9	0.4392E-11	-0.72309	0.27012	-0.63574
10	0.4361E-11	-0.59627	0.18155	-0.78199
11	0.4478E-11	-0.76006	0.25760	-0.59662
12	0.4066E-11	-0.80727	0.16072	-0.56788
13	0.3767E-11	-0.72045	0.11066	-0.68462
14	0.4925E-11	-0.64196	0.09944	-0.76026
15	0.3169E-11	-0.60979	-0.04341	-0.79138
16	0.4472E-11	-0.60216	-0.06172	-0.79599
17	0.5243E-11	-0.67354	-0.18525	-0.71556
18	0.3668E-11	-0.65476	-0.31574	-0.68673
19	0.3672E-11	-0.77687	-0.26372	-0.57177
20	0.4644E-11	-0.43376	-0.60987	-0.66326
21	0.3924E-11	-0.57041	-0.69298	-0.44093
22	0.5558E-11	-0.04539	-0.91391	-0.40336
23	0.1087E-10	0.30008	-0.93030	0.21095
24	0.2378E-10	0.61698	0.61765	-0.48770
25	0.1046E-10	0.91199	-0.26746	0.31103
26	0.5273E-11	0.96459	0.03975	-0.26075
27	0.3025E-11	0.74727	0.46040	-0.47919
28	0.3991E-11	0.64570	0.70952	-0.28221
29	0.4100E-11	0.29930	0.66201	-0.68714
30	0.4514E-11	0.35488	0.75708	-0.54853
31	0.3614E-11	0.15279	0.66252	-0.73329
32	0.4459E-11	0.11671	0.68043	-0.72346
33	0.3279E-11	0.02139	0.81690	-0.57638
34	0.3595E-11	-0.11239	0.70951	-0.69568
35	0.4694E-11	0.15850	0.62672	-0.76296
36	0.4976E-11	-0.09287	0.49983	-0.86113
37	0.4152E-11	-0.10545	0.77518	-0.62288
38	0.3971E-11	-0.05724	0.86967	-0.49031
39	0.3596E-11	-0.29803	0.60661	-0.73702
40	0.5010E-11	-0.12800	0.65027	-0.74884
41	0.2714E-11	-0.52312	0.53797	-0.66101
42	0.4348E-11	-0.42003	0.49848	-0.75835
43	0.3352E-11	-0.77769	0.29253	-0.55644
44	0.4577E-11	-0.99931	0.03493	-0.01242
45	0.1092E-10	-0.95830	-0.20751	0.19645
46	0.2475E-10	0.54431	-0.56656	-0.61866
47	0.1057E-10	-0.27699	-0.90787	0.31472
48	0.4662E-11	0.31933	-0.94737	-0.02286

49 0.2943E-11 0.45752 -0.78240 -0.42251
 50 0.3351E-11 0.54811 -0.64524 -0.53220

***** POST1 NODAL THERMAL FLUX SUM DIRECTIONS *****

LOAD STEP 1 SUBSTEP= 19
 TIME= 144.00 LOAD CASE= 0

NODE	TFSUM	DIRECTION VECTOR (X,Y,Z)		
51	0.4477E-11	0.49592	-0.25793	-0.82918
52	0.4016E-11	0.69261	-0.27681	-0.66608
53	0.4125E-11	0.78713	0.01422	-0.61662
54	0.3829E-11	0.90193	-0.19370	-0.38601
55	0.6194E-11	0.61831	-0.04497	-0.78465
56	0.4483E-11	0.70687	-0.10862	-0.69895
57	0.4255E-11	0.69628	-0.10780	-0.70963
58	0.3398E-11	0.86362	-0.12137	-0.48931
59	0.4085E-11	0.77401	-0.00870	-0.63312
60	0.4316E-11	0.62060	-0.05864	-0.78193
61	0.3968E-11	0.66079	0.20626	-0.72168
62	0.3883E-11	0.78134	0.10717	-0.61483
63	0.3974E-11	0.64820	0.27546	-0.70990
64	0.3425E-11	0.67952	0.53198	-0.50523
65	0.3234E-11	0.53388	0.84538	0.01758
66	0.4811E-11	0.29685	0.89848	-0.32343
67	0.1030E-10	-0.32830	0.91877	0.21927
68	0.1067E-10	-0.95025	0.23832	0.20054
69	0.4690E-11	-0.97989	-0.19545	0.04015
70	0.3120E-11	-0.68043	-0.62848	-0.37686
71	0.4241E-11	-0.45889	-0.62910	-0.62742
72	0.3637E-11	-0.47416	-0.67885	-0.56066
73	0.4687E-11	-0.26790	-0.71018	-0.65106
74	0.4325E-11	-0.16528	-0.69491	-0.69984
75	0.4575E-11	-0.09821	-0.87436	-0.47523
76	0.4744E-11	-0.02075	-0.81779	-0.57515
77	0.4357E-11	-0.08082	-0.61486	-0.78448
78	0.4194E-11	0.01822	-0.83008	-0.55734
79	0.4302E-11	0.04851	-0.65233	-0.75638
80	0.4055E-11	0.12681	-0.65529	-0.74465
81	0.3581E-11	0.10279	-0.78174	-0.61507
82	0.4249E-11	0.23512	-0.62536	-0.74407
83	0.4213E-11	0.26488	-0.58610	-0.76572
84	0.3838E-11	0.45856	-0.71917	-0.52202
85	0.3824E-11	0.53534	-0.41806	-0.73392
86	0.4518E-11	0.65941	-0.56063	-0.50087
87	0.5120E-11	0.97788	-0.09298	-0.18735
88	0.1118E-10	0.92040	0.22238	0.32157
89	63.47	0.00000	0.00000	-1.00000
90	89.56	-0.00000	-0.00000	-1.00000
91	105.1	-0.00000	-0.00000	-1.00000

92	115.5	-0.00000	-0.00000	-1.00000
93	122.7	-0.00000	-0.00000	-1.00000
94	127.9	-0.00000	-0.00000	-1.00000
95	131.7	-0.00000	-0.00000	-1.00000
96	134.3	-0.00000	-0.00000	-1.00000
97	136.1	-0.00000	-0.00000	-1.00000
98	137.1	-0.00000	-0.00000	-1.00000
99	137.5	-0.00000	-0.00000	-1.00000
100	137.1	-0.00000	-0.00000	-1.00000

PRINT HEAT REACTION SOLUTIONS PER NODE

***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 19
TIME= 144.00 LOAD CASE= 0

NODE	HEAT
1	-0.39019E-001
2	-0.39019E-001
3	-0.96695E-001
4	-0.12403
5	-0.13811
6	-0.14717
7	-0.15342
8	-0.15788
9	-0.16109
10	-0.16335
11	-0.16486
12	-0.16572
13	-0.16600
14	-0.16572
15	-0.16486
16	-0.16335
17	-0.16109
18	-0.15788
19	-0.15342
20	-0.14717
21	-0.13811
22	-0.12403
23	-0.96695E-001
24	-0.39019E-001
25	-0.96695E-001
26	-0.12403
27	-0.13811
28	-0.14717
29	-0.15342

30 -0.15788
31 -0.16109
32 -0.16335
33 -0.16486
34 -0.16572
35 -0.16600
36 -0.16572
37 -0.16486
38 -0.16335
39 -0.16109

***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 19
TIME= 144.00 LOAD CASE= 0

NODE	HEAT
40	-0.15788
41	-0.15342
42	-0.14717
43	-0.13811
44	-0.12403
45	-0.96695E-001
46	-0.39019E-001
47	-0.96695E-001
48	-0.12403
49	-0.13811
50	-0.14717
51	-0.15342
52	-0.15788
53	-0.16109
54	-0.16335
55	-0.16486
56	-0.16572
57	-0.16600
58	-0.16572
59	-0.16486
60	-0.16335
61	-0.16109
62	-0.15788
63	-0.15342
64	-0.14717
65	-0.13811
66	-0.12403
67	-0.96695E-001
68	-0.96695E-001
69	-0.12403
70	-0.13811
71	-0.14717
72	-0.15342

73 -0.15788
74 -0.16109
75 -0.16335
76 -0.16486
77 -0.16572
78 -0.16600

***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 19
TIME= 144.00 LOAD CASE= 0

NODE	HEAT
79	-0.16572
80	-0.16486
81	-0.16335
82	-0.16109
83	-0.15788
84	-0.15342
85	-0.14717
86	-0.13811
87	-0.12403
88	-0.96695E-001
89	-0.20627
90	-0.28352
91	-0.32474
92	-0.35147
93	-0.37001
94	-0.38327
95	-0.39282
96	-0.39957
97	-0.40406
98	-0.40664
99	-0.40748
100	-0.40664
101	-0.40406
102	-0.39957
103	-0.39282
104	-0.38327
105	-0.37001
106	-0.35147
107	-0.32474
108	-0.28352
109	-0.20627
110	-0.28352
111	-0.41575
112	-0.49264
113	-0.54371
114	-0.57958

115 -0.60543
116 -0.62412
117 -0.63735

***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 19
TIME= 144.00 LOAD CASE= 0

NODE	HEAT
118	-0.64619
119	-0.65126
120	-0.65291
121	-0.65126
122	-0.64619
123	-0.63735
124	-0.62412
125	-0.60543
126	-0.57958
127	-0.54371
128	-0.49264
129	-0.41575
130	-0.28352
131	-0.32474
132	-0.49264
133	-0.59713
134	-0.66871
135	-0.71985
136	-0.75706
137	-0.78413
138	-0.80338
139	-0.81626
140	-0.82366
141	-0.82608
142	-0.82366
143	-0.81626
144	-0.80338
145	-0.78413
146	-0.75706
147	-0.71985
148	-0.66871
149	-0.59713
150	-0.49264
151	-0.32474
152	-0.35147
153	-0.54371
154	-0.66871
155	-0.75673
156	-0.82069

***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 19
TIME= 144.00 LOAD CASE= 0

NODE	HEAT
157	-0.86774
158	-0.90221
159	-0.92683
160	-0.94336
161	-0.95287
162	-0.95598
163	-0.95287
164	-0.94336
165	-0.92683
166	-0.90221
167	-0.86774
168	-0.82069
169	-0.75673
170	-0.66871
171	-0.54371
172	-0.35147
173	-0.37001
174	-0.57958
175	-0.71985
176	-0.82069
177	-0.89505
178	-0.95031
179	-0.99108
180	-1.0203
181	-1.0400
182	-1.0514
183	-1.0551
184	-1.0514
185	-1.0400
186	-1.0203
187	-0.99108
188	-0.95031
189	-0.89505
190	-0.82069
191	-0.71985
192	-0.57958
193	-0.37001
194	-0.38327
195	-0.60543

***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 19

TIME= 144.00 LOAD CASE= 0

NODE	HEAT
196	-0.75706
197	-0.86774
198	-0.95031
199	-1.0122
200	-1.0582
201	-1.0913
202	-1.1137
203	-1.1266
204	-1.1308
205	-1.1266
206	-1.1137
207	-1.0913
208	-1.0582
209	-1.0122
210	-0.95031
211	-0.86774
212	-0.75706
213	-0.60543
214	-0.38327
215	-0.39282
216	-0.62412
217	-0.78413
218	-0.90221
219	-0.99108
220	-1.0582
221	-1.1082
222	-1.1445
223	-1.1690
224	-1.1832
225	-1.1878
226	-1.1832
227	-1.1690
228	-1.1445
229	-1.1082
230	-1.0582
231	-0.99108
232	-0.90221
233	-0.78413
234	-0.62412

***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 19
TIME= 144.00 LOAD CASE= 0

NODE	HEAT
235	-0.39282

236	-0.39957
237	-0.63735
238	-0.80338
239	-0.92683
240	-1.0203
241	-1.0913
242	-1.1445
243	-1.1830
244	-1.2092
245	-1.2244
246	-1.2294
247	-1.2244
248	-1.2092
249	-1.1830
250	-1.1445
251	-1.0913
252	-1.0203
253	-0.92683
254	-0.80338
255	-0.63735
256	-0.39957
257	-0.40406
258	-0.64619
259	-0.81626
260	-0.94336
261	-1.0400
262	-1.1137
263	-1.1690
264	-1.2092
265	-1.2366
266	-1.2524
267	-1.2576
268	-1.2524
269	-1.2366
270	-1.2092
271	-1.1690
272	-1.1137
273	-1.0400

***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 19
TIME= 144.00 LOAD CASE= 0

NODE	HEAT
274	-0.94336
275	-0.81626
276	-0.64619
277	-0.40406

278 -0.40664
279 -0.65126
280 -0.82366
281 -0.95287
282 -1.0514
283 -1.1266
284 -1.1832
285 -1.2244
286 -1.2524
287 -1.2687
288 -1.2741
289 -1.2687
290 -1.2524
291 -1.2244
292 -1.1832
293 -1.1266
294 -1.0514
295 -0.95287
296 -0.82366
297 -0.65126
298 -0.40664
299 -0.40748
300 -0.65291
301 -0.82608
302 -0.95598
303 -1.0551
304 -1.1308
305 -1.1878
306 -1.2294
307 -1.2576
308 -1.2741
309 -1.2794
310 -1.2741
311 -1.2576
312 -1.2294

***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 19
TIME= 144.00 LOAD CASE= 0

NODE	HEAT
313	-1.1878
314	-1.1308
315	-1.0551
316	-0.95598
317	-0.82608
318	-0.65291
319	-0.40748
320	-0.40664

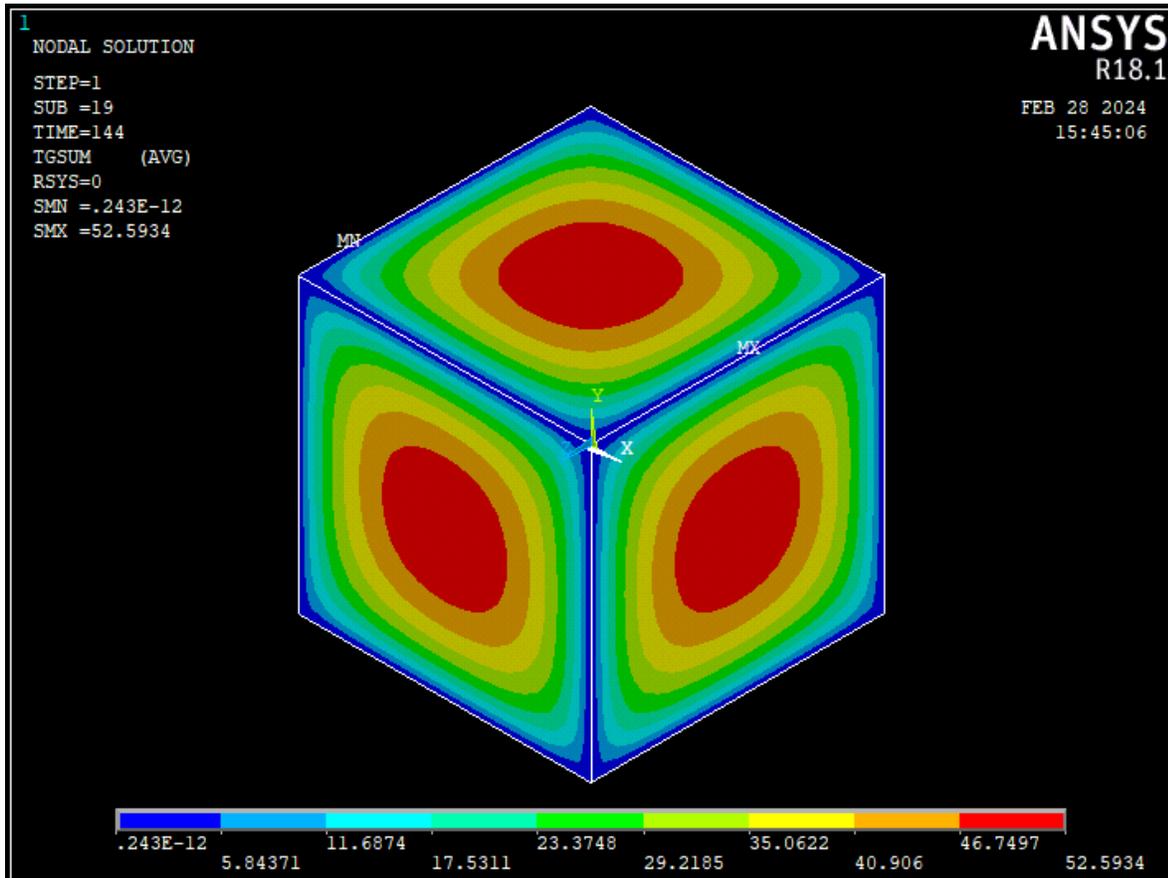
321 -0.65126
322 -0.82366
323 -0.95287
324 -1.0514
325 -1.1266
326 -1.1832
327 -1.2244
328 -1.2524
329 -1.2687
330 -1.2741
331 -1.2687
332 -1.2524
333 -1.2244
334 -1.1832
335 -1.1266
336 -1.0514
337 -0.95287
338 -0.82366
339 -0.65126
340 -0.40664
341 -0.40406
342 -0.64619
343 -0.81626
344 -0.94336
345 -1.0400
346 -1.1137
347 -1.1690
348 -1.2092
349 -1.2366
350 -1.2524
351 -1.2576

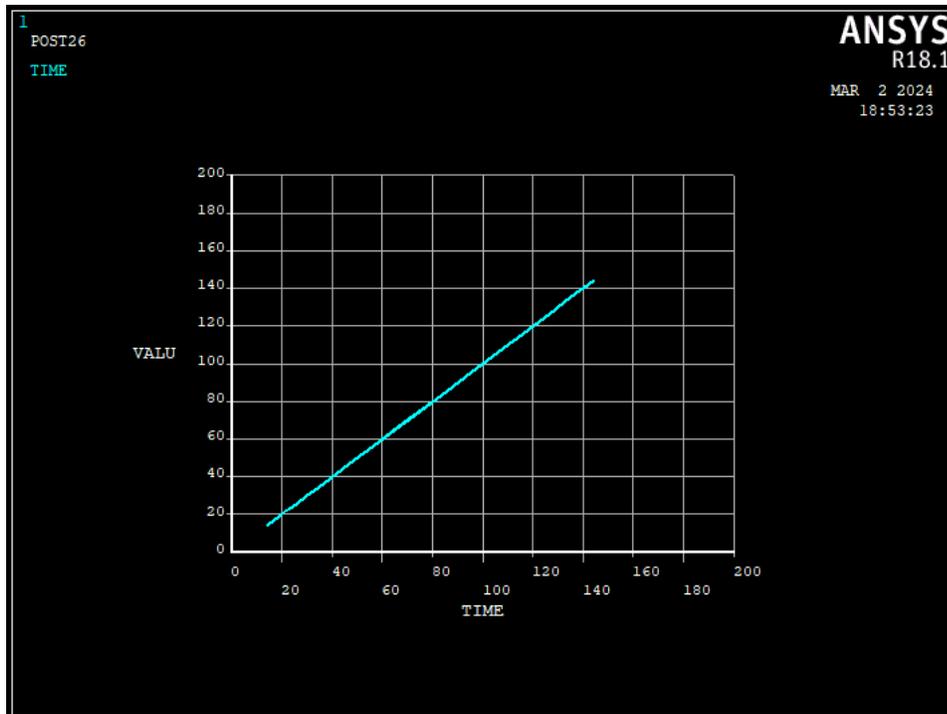
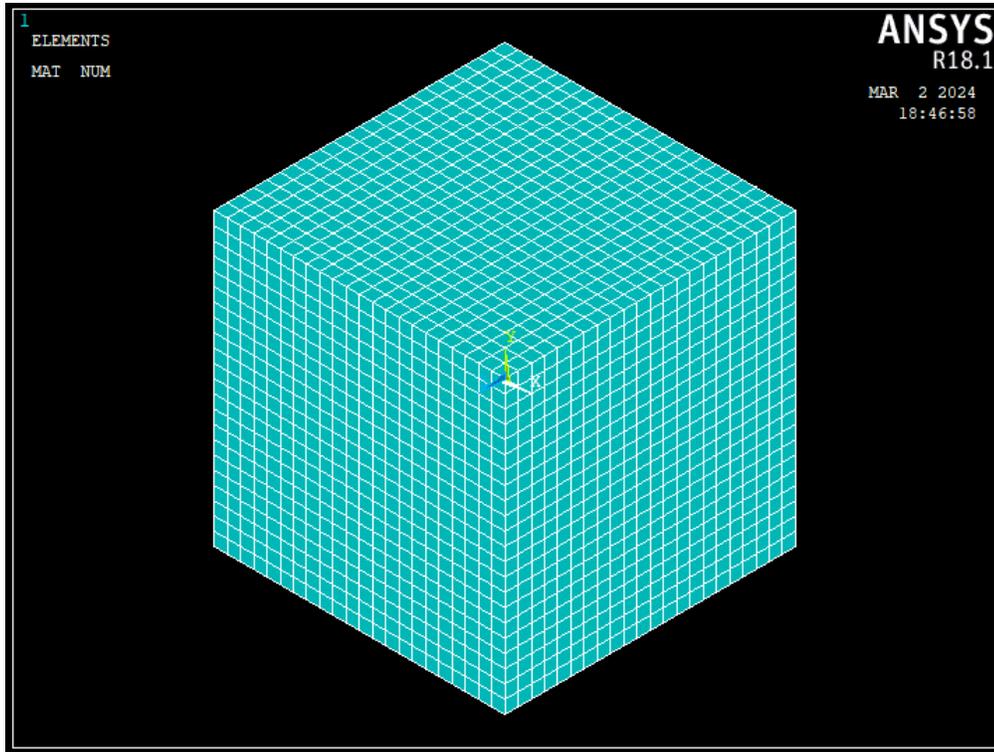
***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 19
TIME= 144.00 LOAD CASE= 0

NODE	HEAT
352	-1.2524
353	-1.2366
354	-1.2092
355	-1.1690
356	-1.1137
357	-1.0400
358	-0.94336
359	-0.81626
360	-0.64619
361	-0.40406
362	-0.39957

363 -0.63735
364 -0.80338
365 -0.92683
366 -1.0203
367 -1.0913
368 -1.1445
369 -1.1830
370 -1.2092
371 -1.2244
372 -1.2294
373 -1.2244
374 -1.2092
375 -1.1830
376 -1.1445
377 -1.0913
378 -1.0203
379 -0.92683
380 -0.80338
381 -0.63735
382 -0.39957
383 -0.39282
384 -0.62412
385 -0.78413
386 -0.90221
387 -0.99108
388 -1.0582
389 -1.1082
390 -1.1445





Glosario

1. **Concreto hidráulico:** Tipo de concreto que se elabora con cemento hidráulico, agua, agregados utilizado en diversas aplicaciones de infraestructura civil.
2. **Resistencia:** Capacidad que tiene un material para soportar la aplicación de cargas sin fallar o romperse.
3. **Manejabilidad:** Facilidad con la que se puede trabajar el concreto en estado fresco, incluyendo su mezcla, su colocación, compactación y acabado.
4. **Permeabilidad:** Capacidad mecánica de los materiales para permitir el paso de líquidos o gases a través de él.
5. **Durabilidad:** Capacidad mecánica de los materiales para resistir el deterioro a lo largo del tiempo y bajo los efectos de las condiciones ambientales y de uso a las que sea sometido.
6. **Concreto masivo:** volumen de concreto colocado en obra con dimensiones considerables que requieren de la toma de medidas especiales para controlar la generación de calor producida por la hidratación del cemento y los cambios volumétricos en los elementos fundidos.
7. **Agregados:** Es el conjunto de materiales reactivamente inertes, como gravas, piedra trituradas y arenas, que se mezclan con cemento y agua para formar concretos.
8. **Cemento Portland:** tipo de cemento hidráulico que ese el principal componente del concreto y se utiliza como característica de producción e insumo para la construcción.
9. **Calor de Hidratación:** Corresponde con el aumento de la temperatura o calor liberado durante la reacción química entre elemento y el agua de la mezcla, en magnitudes que puede afectar la condición del concreto durante su proceso de curado.
10. **Fraguado:** Proceso por el cual en concreto pasa de su estado fresco, a sólido y durante el cual adquiere sus principales características de funcionamiento como la resistencia y la durabilidad.
11. **Aditivos:** Son los compuestos orgánicos e inorgánicos que se agregan a la mezcla de concreto con el fin de modificar sus propiedades mecánicas, de manejabilidad y durabilidad.
12. **Cenizas Volantes:** Corresponden con las partículas de desecho, producidas durante el proceso de combustión del carbón, que sin embargo puede ser usado como adición al cemento con el fin de modificar sus propiedades mecánicas y reactivas.

13. **Puzolanas:** Materiales cerámicos que reaccionan al entrar en contacto con el calcio presente en el cemento, para la conformación de materiales cementantes, mejorando la durabilidad y la resistencia del concreto.
14. **Incorporadores de aire:** Son aditivos de origen químico que introducen burbujas de aire en la mezcla de concreto con el fin de mejorar su resistencia entre otras al ciclo de congelamiento, así como a su trabajabilidad.
15. **Cambios volumétricos:** Son las alteraciones que se presentan en el volumen de los elementos de concreto durante el proceso de fraguado, debidos principalmente a alteraciones en la temperatura y humedad de la mezcla.
16. **Gradiente térmico:** Diferencia en la magnitud de la temperatura entre el centro del elemento de concreto masivo y la superficie expuesta al ambiente, que puede generar esfuerzos internos e incluso producir agrietamientos.
17. **Reacción exotérmica:** Proceso químico en el cual dos compuestos interactúan generando tasas de calor que se liberan.
18. **Fisuras:** fracturas de magnitudes pequeñas que aparecen en el concreto debido a tensiones internas o externas.
19. **Endurecimiento:** Proceso mediante el cual materiales como el concreto aumentan sus niveles de resistencia durante el cambio de estado físico.
20. **Ettringita:** Es un compuesto químico que puede generarse durante el proceso de hidratación del concreto afectando la resistencia y durabilidad del material.
21. **Convección:** Es la transferencia de calor debido al movimiento molecular del un fluido (gas o líquido), se puede presentar convección natural o convección forzada, o combinación de ambas.
22. **Radiación:** Es un fenómeno electromagnético de emisión de energía de los cuerpos por encima de una temperatura de cero absoluto. En ausencia de un medio, existe la transferencia neta de calor entre dos superficies a diferentes temperaturas, debido a que todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas.
23. **Conducción:** Es la transferencia de calor que se produce a través del contacto entre dos cuerpos en cualquier estado físico, cuando existe un diferencial de temperatura. Se desplaza en virtud del movimiento de las partículas de los cuerpos transmitiéndose del mas caliente al más frío.

Bibliografía

1. Abeka, H., Agyeman, S., & Adom-Asamoah, M. (2017). Thermal effect of mass concrete structures in the tropics: Experimental, modelling, and parametric studies. *Cogent Engineering*, 4(1), 1278297.
2. American Concrete Institute. (2017). Guide to mass concrete (ACI 207.1R-17).
3. American Concrete Institute. (2017). Report on thermal and volume change effects cracking of mass concrete (ACI 207.2R-17).
4. American Concrete Institute. (2016). Temperature. Specifications for structural concrete (ACI 301M-16).
5. American Concrete Institute. (2016). Guía para la colocación del concreto en clima frío (ACI 306R-16).
6. American Concrete Institute. (2022). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete (ACI 211.1R-22).
7. American Concrete Institute. (2008). Guía para seleccionar proporciones para concreto de alta resistencia con cemento Portland (ACI 211.4R-08).
8. American Concrete Institute. (2000). Concrete and cement terminology (ACI 116R).
9. ASTM International. (2020). Método prueba estándar de resistencia a la compresión (ASTM C39 – 20). ASTM International.
10. ASTM International. (2022). Standard Specification for Portland Cement (ASTM C150/C150M – 22). ASTM International.
11. ASTM International. (2012). Standard test method for temperature of freshly mixed hydraulic-cement concrete (ASTM C1064/C1064M-12). ASTM International.
12. Ayotte, É., Massicote, B., Houde, J., & Gocevski, V. (1997). Modelling the thermal stresses at early ages in a concrete monolith. *ACI Materials Journal*, 94(4), 363–372.
13. Bamforth, P. B., & Price, W. F. (1995). *Concreting deep lifts and large volume pours*. London: Construction Industry Research and Information Association.

14. Bartojay, K. (2012). Thermal properties of reinforced structural mass concrete. Dam Safety Technology Development Program, Bureau of Reclamation, OMB No. 0704-0188. Denver, CO: U.S. Department of the Interior.
15. Gajda, J. (2007). Mass concrete for buildings and bridges. Portland Cement Association.
16. Gajda, J., & Vangeem, M. (2002). Controlling temperatures in mass concrete. *Concrete International*, 24(8), 51–56.
17. Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2003). Design and control of concrete mixtures (No. CD100).
18. Leng, L., Liang, W., Caihong, Z., Zhang, P., & Wei, T. (2023). Influence of temperature rising inhibitor on temperature and stress field of mass concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01888. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01888>
19. Prasanna, W. G., & Subhashini, P. A. (2010). Cracking due to temperature gradient in concrete. En *International Conference on Sustainable Built Environment*.
20. Siddique, Z. Q., Hossain, M., & Meggers, D. (2005, August). Temperature and curling measurements on concrete pavement. In *Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium*.
21. Suzuki, Y., Tsuji, Y., Maekawa, K., & Okamura, H. (1990). Quantification of hydration heat generation process of cement in concrete. Japan Society of Civil Engineers.
22. Xioda, L., Zhipeng, Y., Kexin, C., Chunlin, D., & Fang, Y. (2023). Investigation of temperature development and cracking control strategies of mass concrete: A field monitoring case study. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02144. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02144>
23. Zeña, M. (2015). 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 de maestría, Universidad de Lima].
24. Zhu, B. (2021). Thermal stresses and temperature control of mass concrete. Springer.