

Recomendaciones técnicas para vaciados de concreto masivo

PhD. Pablo Peña Torres
ppenat@uni.pe



Comité organizador:

Sector Público



Sector Privado



Cooperación internacional y académica



Objetivo

- Identificar a los elementos considerados como vaciados de concreto masivo.
- Explicar la problemática que involucra un vaciado masivo.
- Dar recomendaciones para las etapas de diseño y construcción a fin de obtener una estructura que cumpla los requerimientos mínimos de calidad.
- Explicar los métodos de calculo para determinar la T_{\max} y $\Delta T_{\text{admisible}}$ del concreto.

Temario

- Introducción
 - Definición
 - Comportamiento térmico
 - Experiencias de vaciado masivo
- Problemática del control térmico en concretos masivos
 - Temperatura máxima del concreto (T_{\max})
 - Diferencial térmico interno ($\Delta T_{\text{admisible}}$)
- Recomendaciones constructivas
- Métodos de calculo
 - Temperatura máxima del concreto (T_{\max})
 - Diferencial térmico interno ($\Delta T_{\text{admisible}}$)
 - Ejemplo de calculo
- Conclusiones

Vaciado de concreto masivo

Vaciado masivo de 1293 m³ - Proyecto Reserva del Parque (Colombia)



- Área : 16m x 52m
- Espesor : 1,5m – 2,0m
- 166 viajes (50 mixer)
- 4 autobombas
- f'c = 4000 psi (28 MPa)
- Uso de cementantes (bajo calor de hidratación)
- 6,5 horas de vaciado

Introducción

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



Definición de concreto masivo

ACI 116: “cualquier elemento de grandes dimensiones que genere que se tomen medidas preventivas para contrarrestar la generación de calor interior debido a la hidratación de cemento **causando cambios volumétricos y con esto, fisuras o grietas**”

ACI 207.1-05: “(...) la característica que distingue al concreto masivo del resto de concretos convencionales es su **comportamiento térmico**”

ACI 211.1R-91: “muchos elementos estructurales de grandes dimensiones pueden ser lo suficientemente masivos como para que se tome en cuenta la generación de calor, particularmente cuando las dimensiones mínimas de la sección transversal de un elemento estructural se aproximan o exceden de 0,6 a 0,9m o cuando se utilizan contenidos de cemento por encima de **356 kg/m³**”

ACI 301-16: “Volumen de concreto estructural en el que la combinación de las dimensiones del elemento a vaciar, las condiciones de contorno, las características del concreto y las condiciones ambientales pueden provocar esfuerzo térmicos indeseables, agrietamiento, reacciones químicas nocivas o reducción de resistencia a largo plazo como resultado de la elevada temperatura del concreto debido al calor de hidratación”

Identificación de un vaciado con riesgo térmico

- Productos prefabricados de concreto sometidos a tratamiento térmico.

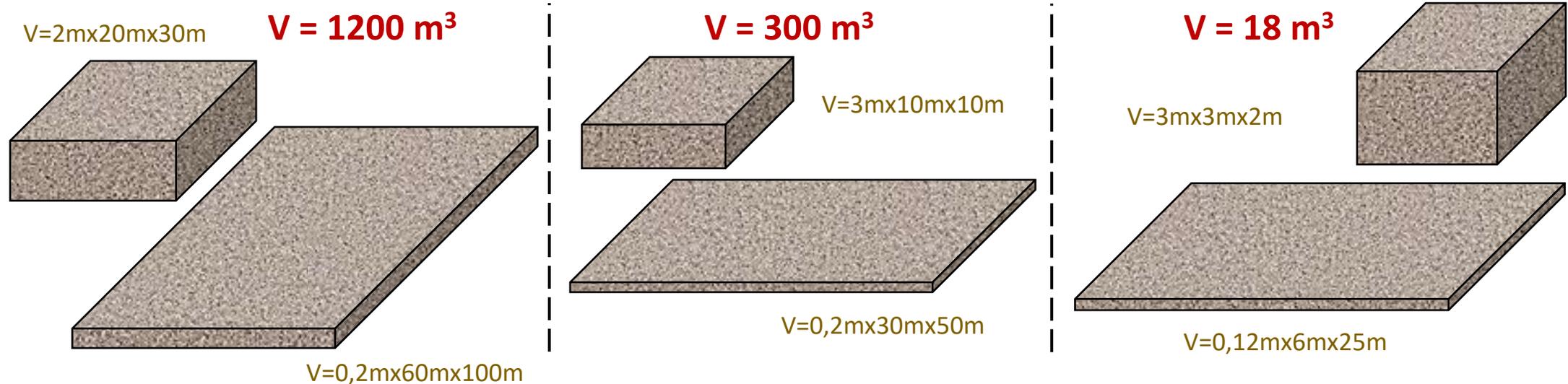


Alta temperatura inicial de curado



Identificación de un vaciado con riesgo térmico

- Productos prefabricados de concreto sometidos a tratamiento térmico.
- Secciones de las obras definidas como partes críticas.
 - El concepto de un **volumen masivo** es irrelevante



Identificación de un vaciado con riesgo térmico

- Productos prefabricados de concreto sometidos a tratamiento térmico.
- Secciones de las obras definidas como partes críticas.
 - El concepto de un **volumen masivo** es irrelevante
 - El concepto de una **sección masiva** es irrelevante



Zapata (EP=1,5m):

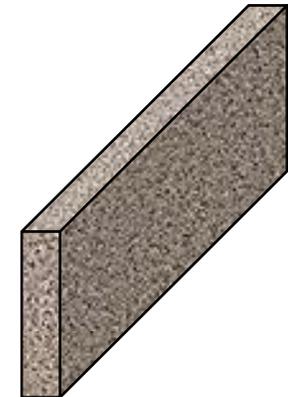
- $f'_c = 21\text{MPa}$
- **Cemento V : 320 kg/m^3**



$T_{\max} = 58\text{ }^\circ\text{C}$

Muro (EP=0,6m):

- $f'_c = 35\text{MPa}$
- **Cemento I : 460 kg/m^3**

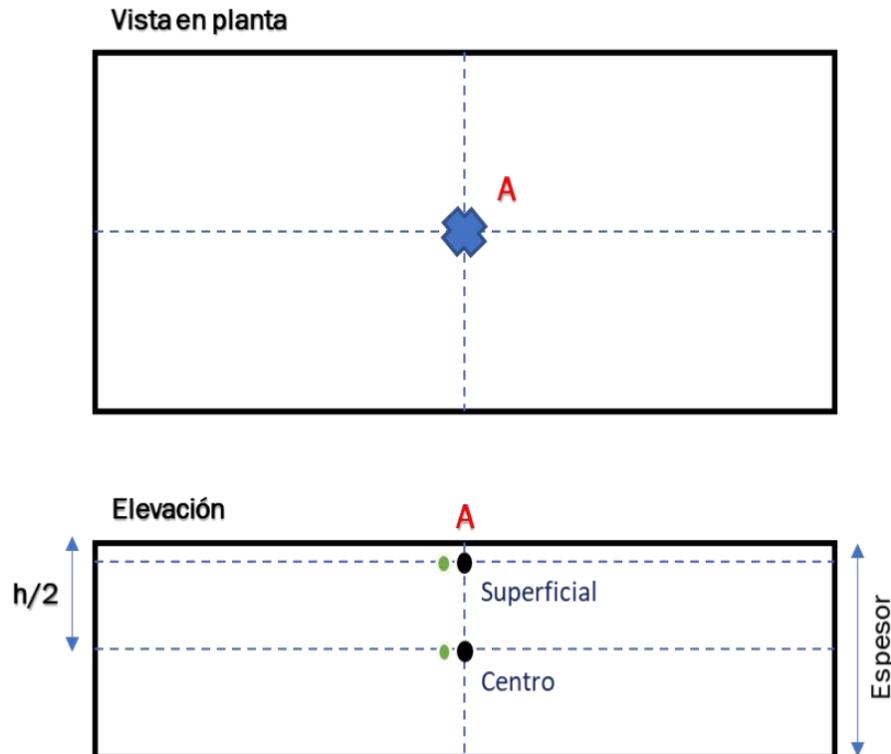


$T_{\max} = 71\text{ }^\circ\text{C}$

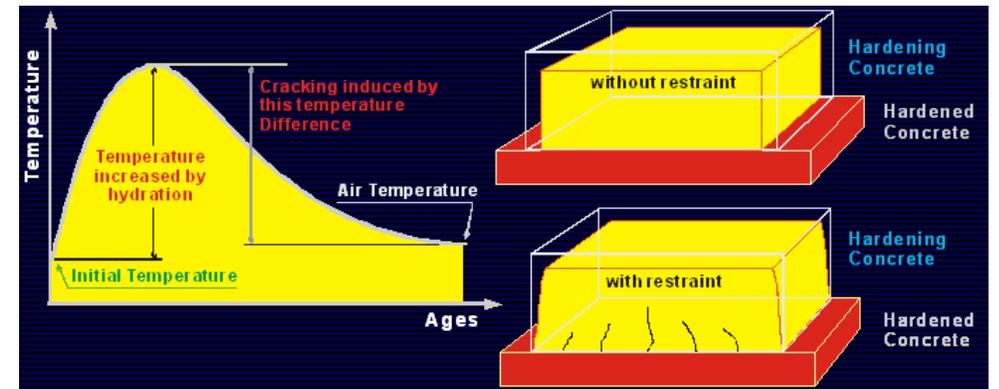
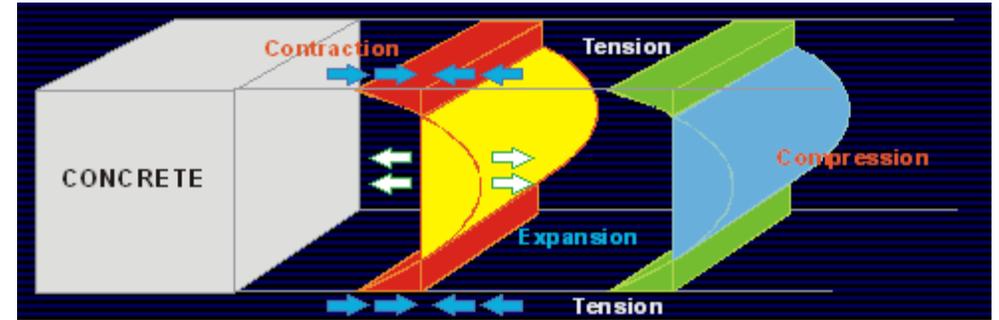
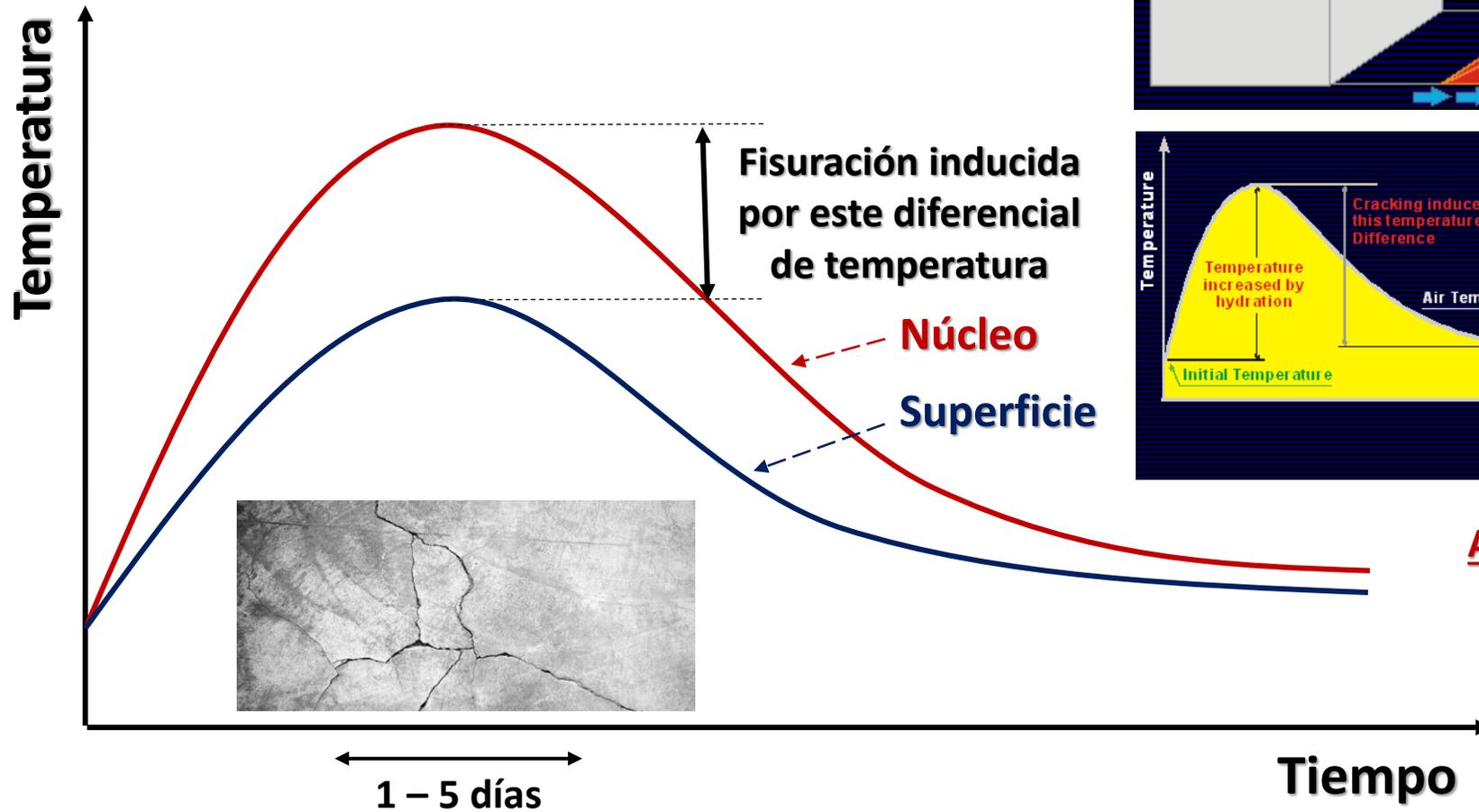
Lectura de temperaturas

Instrumentación

- Según el ACI 301-16, se coloca un sensor de temperatura en el centro de la sección más grande y un sensor de temperatura a una profundidad de 2" desde el centro de la superficie exterior más cercana. Coloque un sensor de respaldo en cada ubicación del sensor. Además, proporcione un sensor de temperatura en un lugar sombreado para monitorear la temperatura ambiente en el sitio.

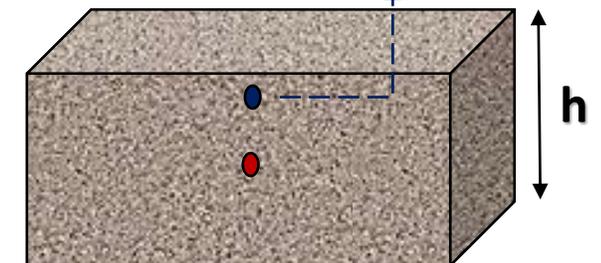


Comportamiento térmico

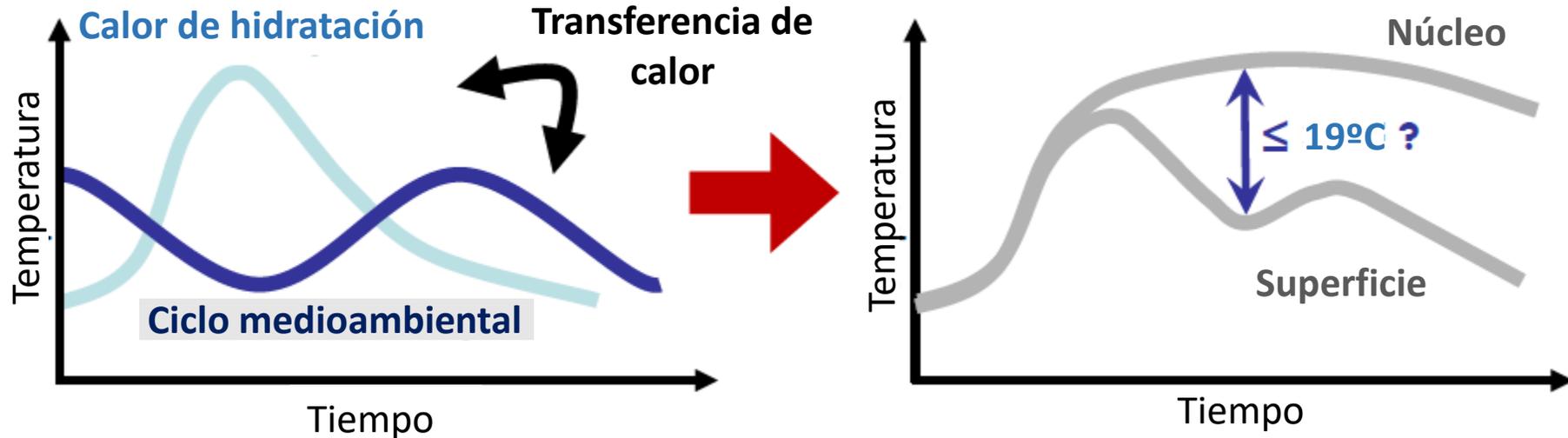


ACI 301-16

Profundidad 2"



Comportamiento térmico



Calor de Hidratación

- Composición de cemento
- Fineza del cemento
- Cantidad del cemento
- Efecto químico de los aditivos
- Relación a/c
- Temperatura de la mezcla

Ciclo medioambiental

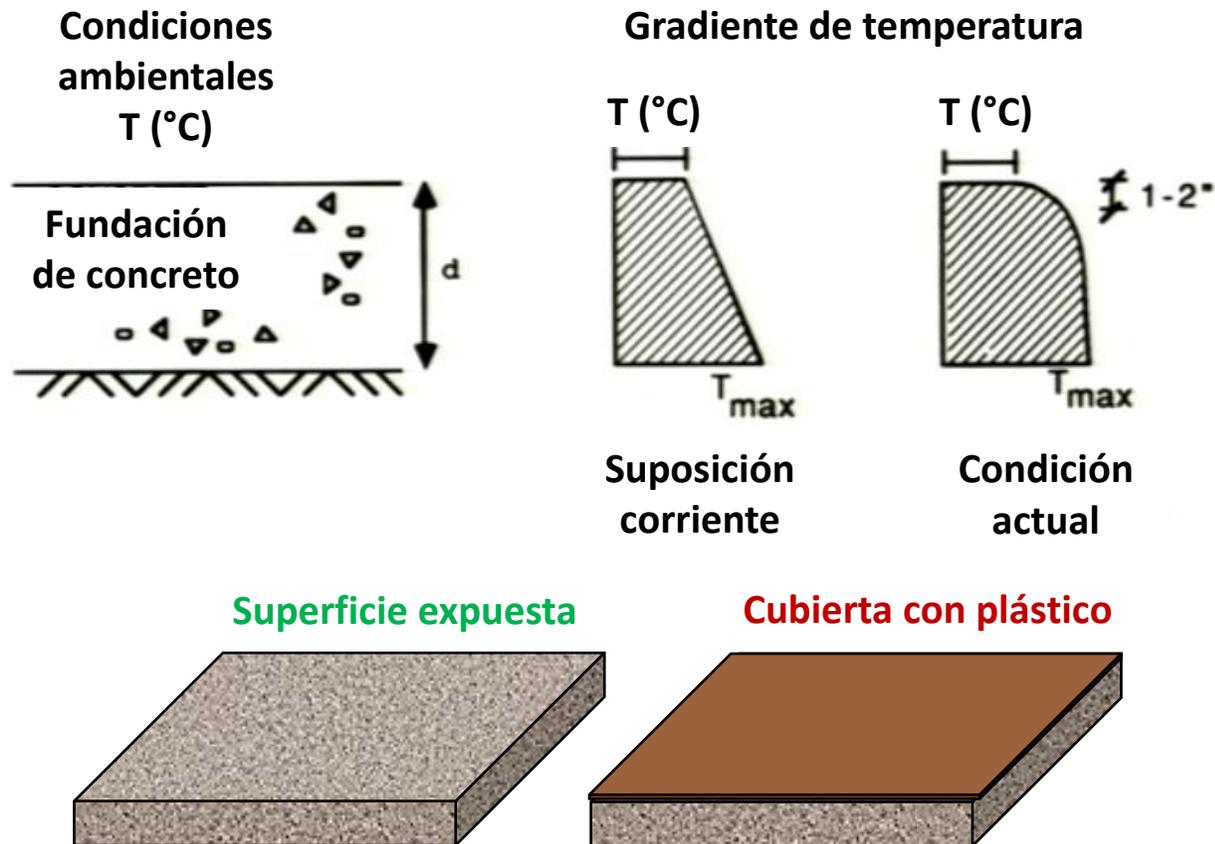
- Temperatura del aire
- Velocidad del viento
- Humedad relativa
- Nubosidad
- Radiación solar

Transferencia de calor

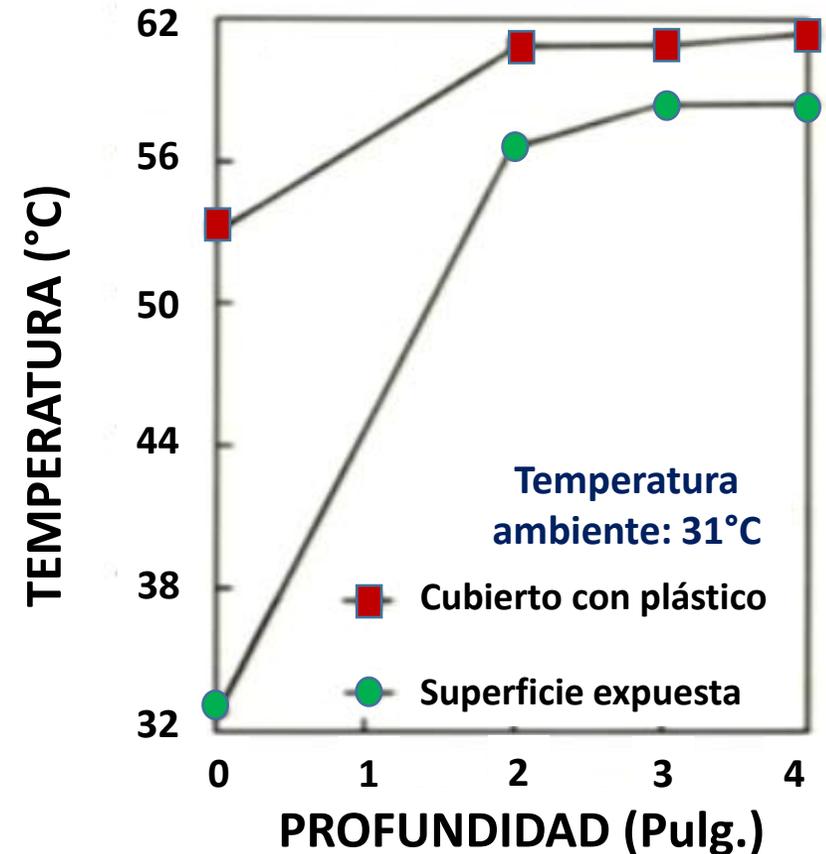
- Elemento geométrico
- Tamaño del elemento
- Método de curado
- Tipo de agregado

Comportamiento térmico

Gradiente Térmico



GRADIENTE VERTICAL DE TEMPERATURA



Experiencias de vaciados masivos

Proyecto Nueva Sede del Banco de la Nación (Perú, 2014)

- Tiempo de vaciado = 36 horas
- **Volumen = 5600 m³**
- Espesor = 2,5 m



Proyecto Antapacay (Perú, 2011)

- Dimensiones = 20m x 20m x **3.2 m**
- Tiempo de vaciado = 20 horas
- Volumen = 1280 m³



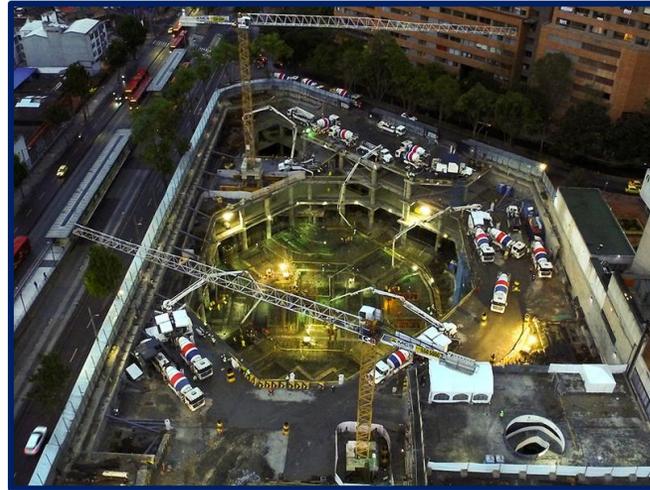
Proyecto Planta Concentradora Quellaveco (Perú, 2018)

- Tiempo de vaciado = 18 horas
- Volumen = 1720 m³
- Espesor = 3,0 m

Experiencias de vaciados masivos

Torres ATRIO (Colombia, 2016)

- Dimensiones = $2451\text{m}^2 \times 3\text{m}$
- Volumen = 7382 m^3
- Tiempo de vaciado = 38 horas



Refinería de Cartagena (Colombia, 2011)

- Dimensiones = $24\text{m} \times 57\text{m} \times 2.4\text{m}$
- Volumen = 3300 m^3
- Tiempo de vaciado = 22.5 horas

New Wilshire Grand (USA, 2014)

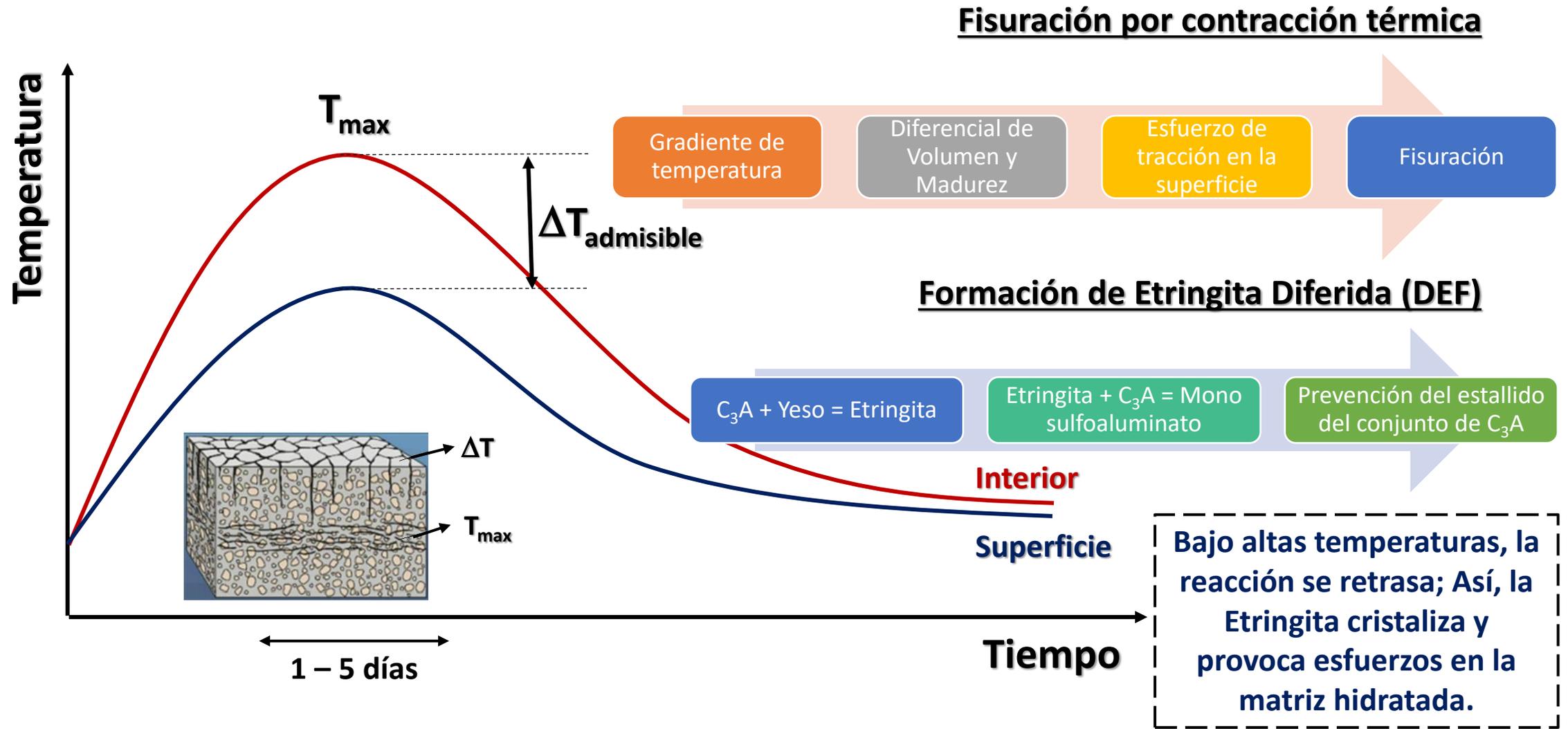
- **Record Guinness de vaciado masivo**
- Tiempo de vaciado = 24 horas
- Volumen = 16200 m^3



Temario

- Introducción
 - Definición
 - Comportamiento térmico
 - Experiencias de vaciado masivo
- Problemática del control térmico en concretos masivos
 - Temperatura máxima del concreto (T_{\max})
 - Diferencial térmico interno ($\Delta T_{\text{admisible}}$)
- Recomendaciones constructivas
- Métodos de calculo
 - Temperatura máxima del concreto (T_{\max})
 - Diferencial térmico interno ($\Delta T_{\text{admisible}}$)
 - Ejemplo de calculo
- Conclusiones

Problemática del concreto masivo



Temperatura máxima del concreto (T_{max})

$$T_{max} / \Delta T$$

Tipos de Etringita

Etringita de formación primaria: No provoca expansión. Se forma a partir de la hidratación de los cementos, que se forma entre el regulador de la hidratación (Yeso) y los aluminatos de calcio (C_3A). Estos cristales no provocan expansión puesto que cristalizan antes del endurecimiento del concreto. Estos cristales tienen un carácter benéfico, puesto que contribuyen a la cohesión de la pasta de cemento a edades tempranas.

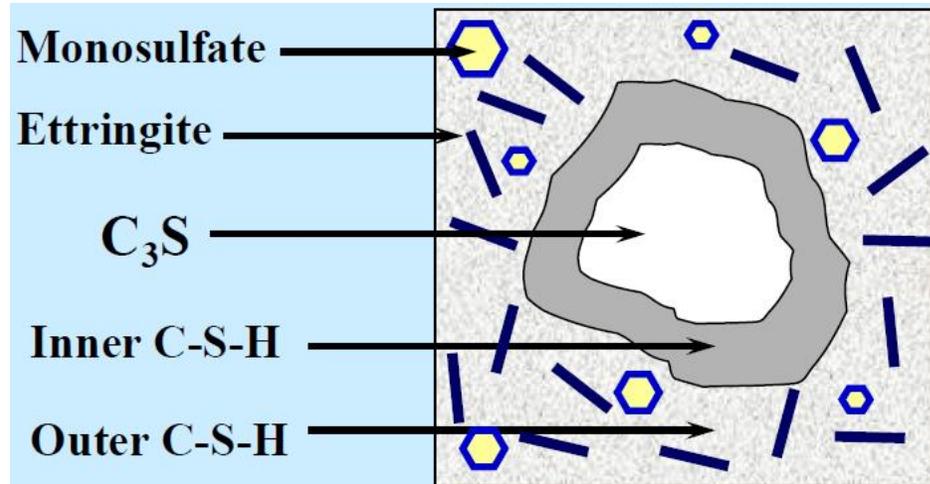
Etringita de formación diferida (DEF): Consecuencia de una elevada temperatura ($>70^\circ C$) a edad temprana que puede provocar una expansión interna dentro del concreto. Luego en presencia de humedad, dentro del concreto se pueden producir presiones internas provocando fenómenos de expansión.



Mecanismo de la DEF

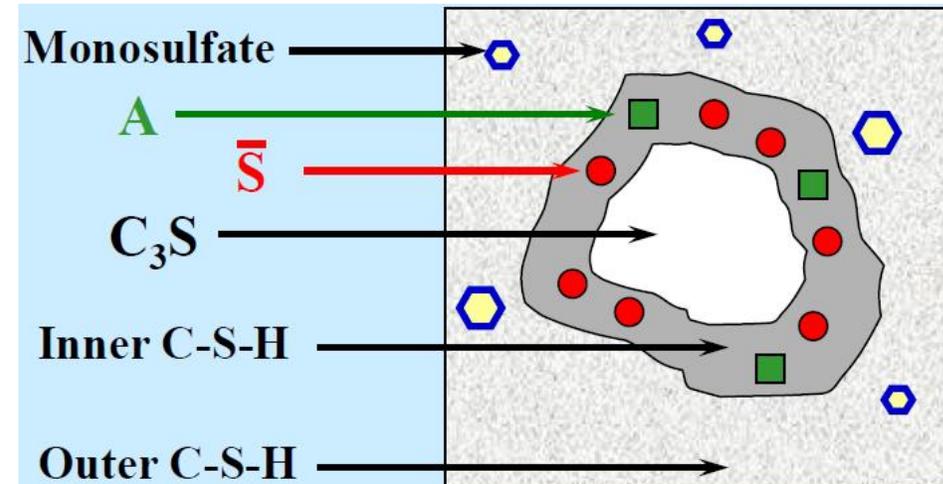
$T_{max} / \Delta T$

Concreto con $T_{max} = 23^{\circ}\text{C}$



La hidratación es "normal". La ettringita y el monosulfato se forman como parte de los productos de hidratación externos.

Concreto con $T_{max} > 70^{\circ}\text{C}$



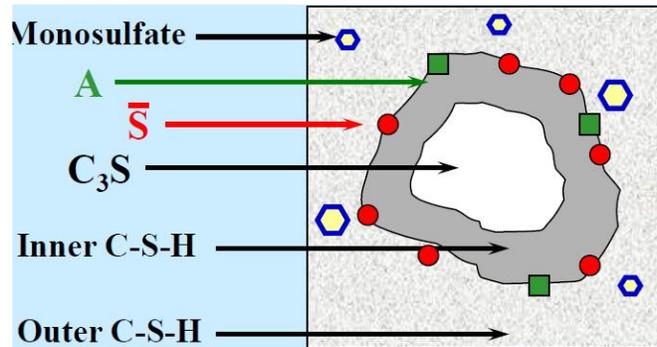
La disolución incongruente de etringita da como resultado que tanto el sulfato como el alúminato se encapsulan en la C-S-H interno de rápida formación.

C-S-H : Silicato Calcico Hidratado

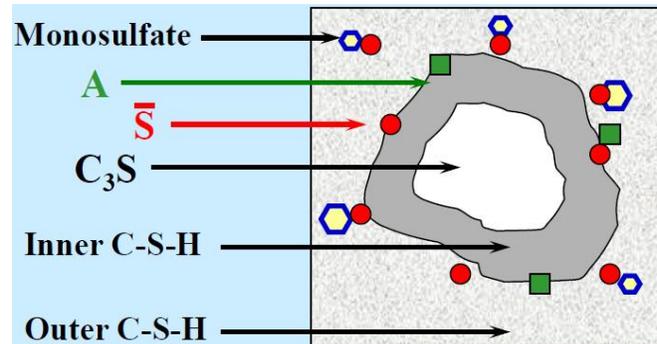
Mecanismo de la DEF

$T_{max} / \Delta T$

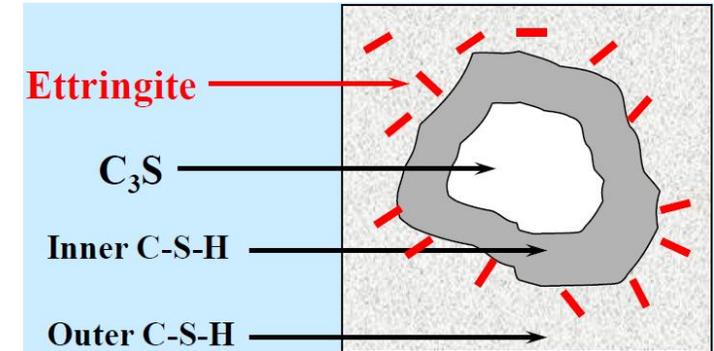
Secuencia de concreto curado en agua a 23°C



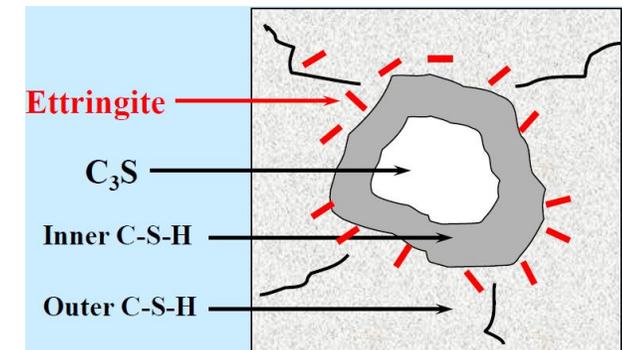
El sulfato y el aluminato se liberan lentamente desde el interior C-S-H



Etringita formada en los poros finos del exterior C-S-H



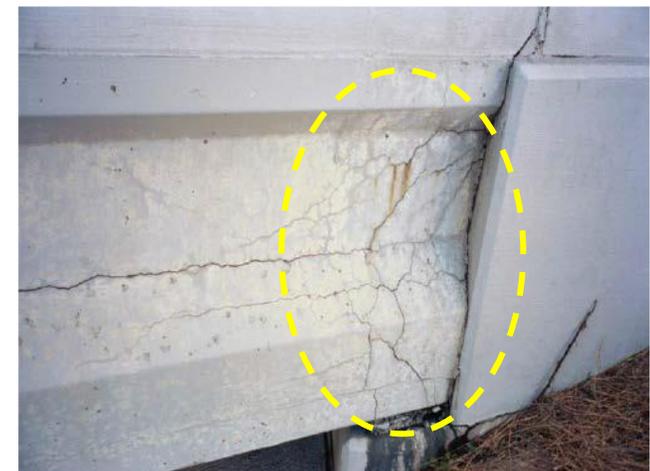
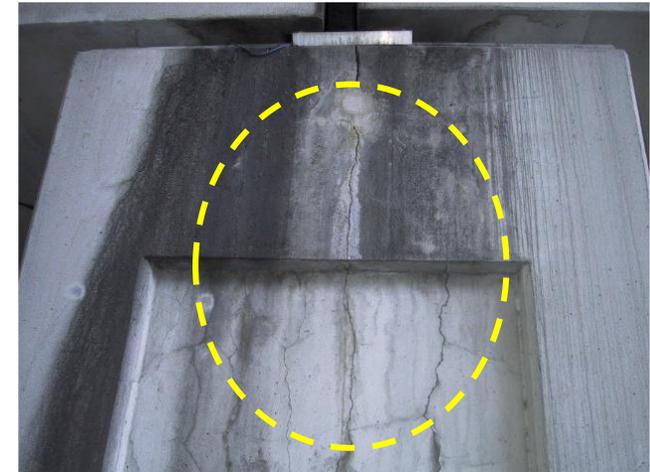
Bajo ciertas condiciones, esto conduce a la expansión de la pasta de cemento. El daño potencial es una función de los materiales, diseños de mezcla, régimen de curado y microestructura.



C-S-H : Silicato Calcico Hidratado

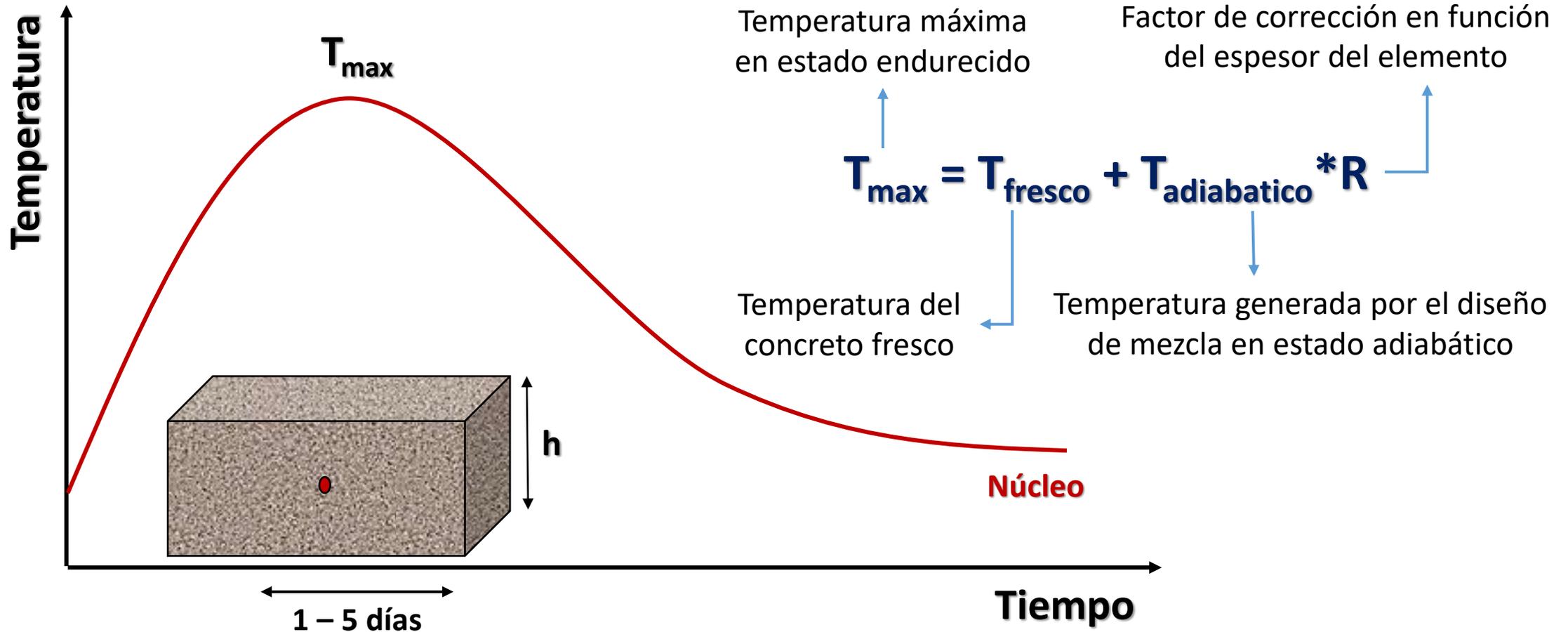
Consecuencias del DEF

$$T_{\max} / \Delta T$$



Temperatura máxima del concreto (T_{max})

$$T_{max} / \Delta T$$



Como se previene el DEF

$$T_{max} / \Delta T$$

ACI 201.2R 2016 (Guide to Durable Concrete)

Table 6.2.2.2—Recommended measures for reducing potential for DEF in concrete exposed to elevated temperatures at early ages*

Maximum concrete temperature T	Prevention required
$T \leq 158^{\circ}\text{F}$ (70°C)	No prevention required
$158^{\circ}\text{F} < T \leq 185^{\circ}\text{F}$ ($70^{\circ}\text{C} < T \leq 85^{\circ}\text{C}$)	Use one of the following approaches to minimize the risk of expansion: 1. Portland cement meeting requirements of ASTM C150/C150M moderate or high sulfate-resisting and low-alkali cement with a fineness value less than or equal to 430 m ² /kg 2. Portland cement with a 1-day mortar strength (ASTM C109/C109M) less than or equal to 2850 psi (20 MPa) 3. Any ASTM C150/C150M portland cement in combination with the following proportions of pozzolan or slag cement: a) Greater than or equal to 25 percent fly ash meeting the requirements of ASTM C618 for Class F fly ash b) Greater than or equal to 35 percent fly ash meeting the requirements of ASTM C618 for Class C fly ash c) Greater than or equal to 35 percent slag cement meeting the requirements of ASTM C989/C989M d) Greater than or equal to 5 percent silica fume (meeting ASTM C1240) in combination with at least 25 percent slag cement e) Greater than or equal to 5 percent silica fume (meeting ASTM C1240) in combination with at least 20 percent Class F fly ash f) Greater than or equal to 10 percent metakaolin meeting ASTM C618 4. An ASTM C595/C595M or ASTM C1157/C1157M blended hydraulic cement with the same pozzolan or slag cement content as listed in Item 3
$T > 185^{\circ}\text{F}$ (85°C)	The internal concrete temperature should not exceed 185°F (85°C) under any circumstances.

No requiere previsiones

Es necesario cumplir alguna de estas previsiones para disminuir el riesgo de formación de etringita diferida

Formación de etringita diferida



*Assembled from Ghorab et al. (1980), Ramlochan et al. (2003), Thomas (2001), Thomas et al. (2008b).

Como se previene el DEF

$$T_{\max} / \Delta T$$

Tabla 01

IFSTTAR 2017 (Guía técnica)

Tabla 02

Categoría de obra	Nivel de consecuencia de aparición de DEF	Ejemplos de obras o de partes de la obra
I	Poco importantes o aceptables	<ul style="list-style-type: none"> Obra de concreto de resistencia inferior a $f'c < 17\text{MPa}$. Elementos no portantes en edificios. Elementos fácilmente reemplazables. Obras provisionales. La mayoría de productos prefabricados no estructurales.
II	Poco tolerables	<ul style="list-style-type: none"> Elementos portantes de la mayoría de edificios y obras de Ingeniería Civil (puentes convencionales). La mayoría de productos prefabricados estructurales (Incluyendo las tuberías de baja presión).
III	Inaceptables o cuasi inaceptables	<ul style="list-style-type: none"> Presas, túneles. Puentes y viaductos de gran importancia. Edificios patrimoniales. Traviesas de ferrocarril.

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

Como se previene el DEF

$$T_{\max} / \Delta T$$

IFSTTAR 2017 (Guía técnica)

Tabla 03

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

Ejemplo:

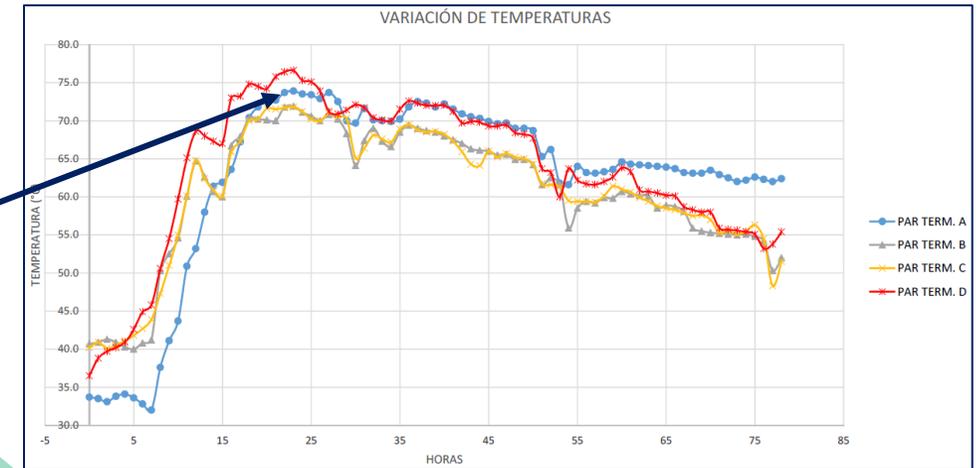
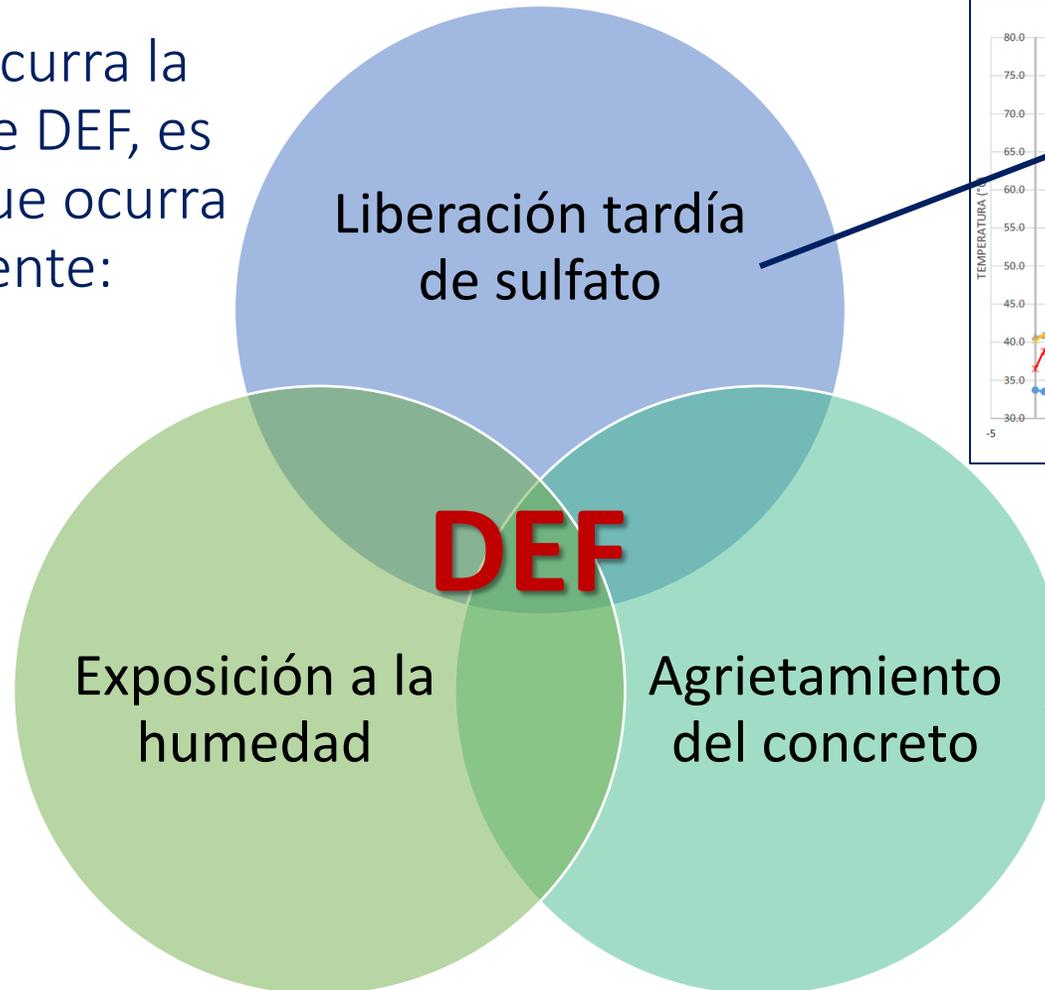
Para la cimentación de un pilar de un puente en medio del cauce de un río, el límite de la temperatura máxima en el núcleo, se obtiene según el análisis siguiente:

- De la Tabla 01, **la categoría de la obra sería III** por ser una estructura considerada como de inaceptable ocurrencia de aparición de DEF.
- De la Tabla 02, **la clase de exposición es C** por ser una estructura en constante contacto con el agua.
- De la Tabla 03, se obtiene el requerimiento de la temperatura máxima admisible en función a los valores obtenidos anteriormente (categoría III y exposición C), la cual es **75 °C (T_{LIMITE})**.
- Conociendo el límite de temperatura de 75 °C, se utiliza la tabla del ACI 201.2R, para definir los requerimientos del cemento en función a la temperatura máxima alcanzada en el núcleo (T_{MAX}).
- En caso $T_{\text{MAX}} \leq 70^{\circ}\text{C}$, no es necesario tomar precauciones referidas a las características del cemento.

Como se previene el DEF

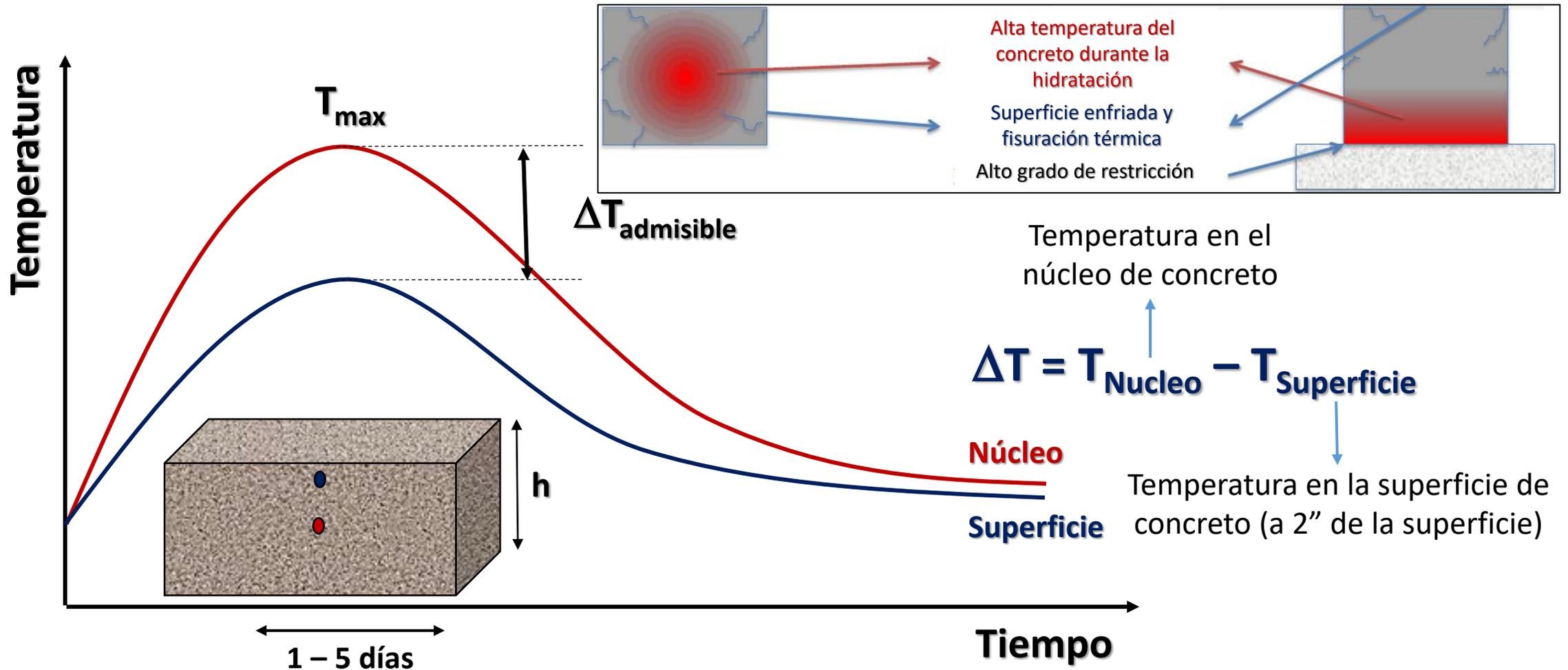
$$T_{\max} / \Delta T$$

Para que ocurra la aparición de DEF, es necesario que ocurra lo siguiente:



Diferencial térmico interno (ΔT)

$T_{max} / \Delta T$



Diferencial térmico interno (ΔT)

ACI 301S-10

**Especificaciones para
Concreto Estructural**
(Versión en español y en sistema métrico)
Es un Estándar del ACI

Producido por el Comité ACI 301



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

El ACI 301-16, limita el delta térmico en 19 °C para los vaciados masivos.

ACI 207.1R-05
(Reapproved 2012)

Guide to Mass Concrete
Reported by ACI Committee 207

Stephen B. Tatro
Chair

Jeffrey C. Allen Terrence E. Arnold Randall P. Bass J. Floyd Best Anthony A. Bombich	Robert W. Cannon Teck L. Chua Eric J. Ditchey Timothy F. Dolan Barry D. Fehl	John R. Hess Rodney E. Holderbaum Allen J. Hulsizer David E. Kiefer Gary R. Mass	Tiber J. Pataky Steven A. Ragan Ernest K. Schrader Gary P. Wilson
--	--	--	--

Mass concrete is any volume of concrete with dimensions large enough to require that measures be taken to cope with the generation of heat from hydration of the cement and attendant volume change to minimize cracking. The design of mass concrete structures is generally based on durability, economy, and thermal action, with strength often being a secondary concern. This document contains a history of the development of mass concrete practice and discussion of materials and concrete mixture proportioning, properties, construction methods, and equipment. It covers traditionally placed and consolidated mass concrete and does not cover roller-compacted concrete.

Keywords: admixture; aggregate; air entrainment; batch; cement; compressive strength; cracking; creep; curing; durability; fly ash; formwork; grading; heat of hydration; mass concrete; mixing; mixture proportion; modulus of elasticity; placing; Poisson's ratio; pozzolan; shrinkage; strain; stress; temperature rise; thermal expansion; vibration; volume change.

CONTENTS

Chapter 1—Introduction and historical developments, p. 2

- 1.1—Scope
- 1.2—History
- 1.3—Temperature control
- 1.4—Long-term strength design

Chapter 2—Materials and mixture proportioning, p. 5

- 2.1—General

- 2.2—Cements
- 2.3—Pozzolans and ground slag
- 2.4—Chemical admixtures
- 2.5—Aggregates
- 2.6—Water
- 2.7—Selection of proportions
- 2.8—Temperature control

Chapter 3—Properties, p. 12

- 3.1—General
- 3.2—Strength
- 3.3—Elastic properties
- 3.4—Creep
- 3.5—Volume change
- 3.6—Permeability
- 3.7—Thermal properties
- 3.8—Shear properties
- 3.9—Durability

Chapter 4—Construction, p. 19

- 4.1—Batching
- 4.2—Mixing
- 4.3—Placing
- 4.4—Curing
- 4.5—Forms
- 4.6—Height of lifts and time intervals between lifts
- 4.7—Cooling and temperature control
- 4.8—Instrumentation
- 4.9—Grouting contraction joints

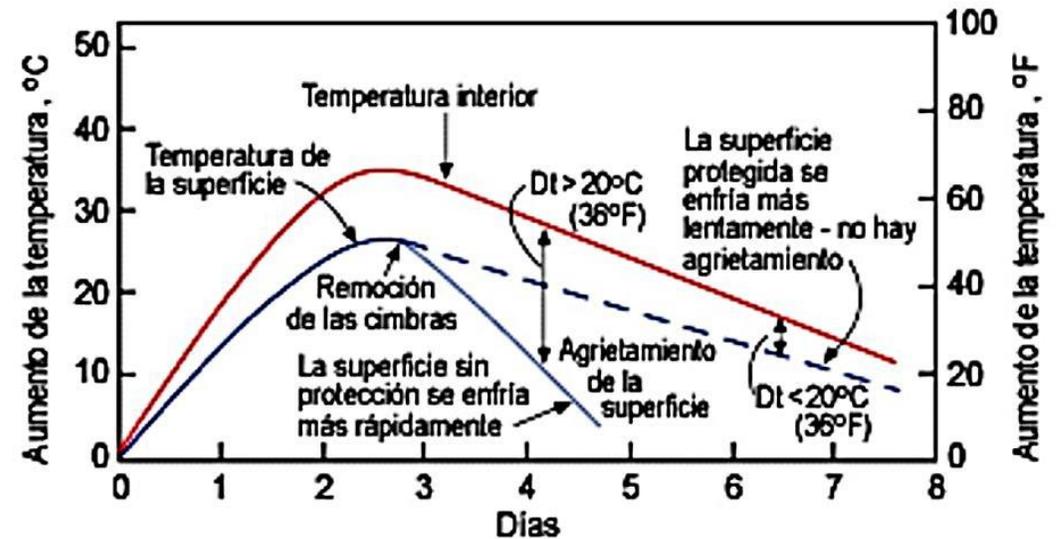
ACI 207.1R-05 supersedes ACI 207.1R-96 and became effective December 1, 2005. Copyright © 2006, American Concrete Institute. All rights reserved including rights of reproduction and use in any form or by any means, including the making of copies by any photo process, or by electronic or mechanical device, printed, written, or oral, or recording for sound or visual reproduction or for use in any knowledge or retrieval system or device, unless permission in writing is obtained from the copyright proprietors.

Copyright American Concrete Institute. Provided by IHS under license with ACI. No reproduction or retransmission permitted without license from IHS. License: CMC, License No: 5558170006, User: GUYA, Rating: Not for Resale, 06/20/2012 12:52:47 EDT

Diferencial térmico interno (ΔT)

$$\Delta T_{\text{admissible}} = 19^{\circ}\text{C}$$

Normalmente mantener un diferencial térmico de concreto en estos rangos es una labor difícil durante la construcción tomando en cuenta que el concreto que se utiliza en elementos estructurales contiene más de 300 kg/m^3 de cemento.



Además, las tendencias recientes muestran secciones de mayor espesor y altos contenidos de cemento o bajas relaciones a/c, esto hace que el control de temperatura sea aún más difícil.

Diferencial térmico interno (ΔT)

$$T_{\max} / \Delta T$$



Agrietamiento térmico severo en la superficie superior de una cimentación (Fuente: J. Gajda et E. Alsamsam, « Engineering Mass Concrete Structures », EEUU, p. 8, nov. 2006).

Diamantina de concreto extraído de la base de una cimentación muestra el grado de fisuración térmica (Fuente: J. Gajda et E. Alsamsam, « Engineering Mass Concrete Structures », EEUU, p. 8, nov. 2006).



Diferencial térmico interno (ΔT)

$$T_{\max} / \Delta T$$



Fisura por contracción térmica en losa de piso (Fuente: Moreno, A, « Qué es la retracción o contracción del concreto, como solucionarla y evitarla », Colombia, 2020).

Fisuración por diferencial térmico interno (ΔT)

El ACI 224R-01 define al tipo de fisura provocada en el concreto por esfuerzos de contracción térmica, como un agrietamiento producido por efectos del material (fisuración no estructural), esta fisuración superficial puede aparecer en forma de fisuras irregulares y ser el resultado de la disminución de volumen. Esta fisuración aleatoria que aparece como consecuencia de los materiales puede atravesar un elemento de concreto con espesores de fisuras variables.

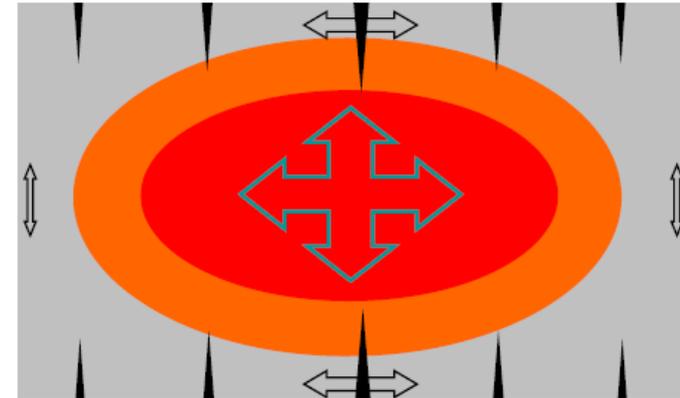


Tabla 4.1 – Guía para anchos de fisura razonables*, hormigón armado bajo cargas de servicio

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

Temario

- Introducción
 - Definición
 - Comportamiento térmico
 - Experiencias de vaciado masivo
- Problemática del control térmico en concretos masivos
 - Temperatura máxima del concreto (T_{\max})
 - Diferencial térmico interno ($\Delta T_{\text{admisible}}$)
- **Recomendaciones constructivas**
- Métodos de calculo
 - Temperatura máxima del concreto (T_{\max})
 - Diferencial térmico interno ($\Delta T_{\text{admisible}}$)
 - Ejemplo de calculo
- Conclusiones

Control de la temperatura máxima

Controlar el contenido de cemento

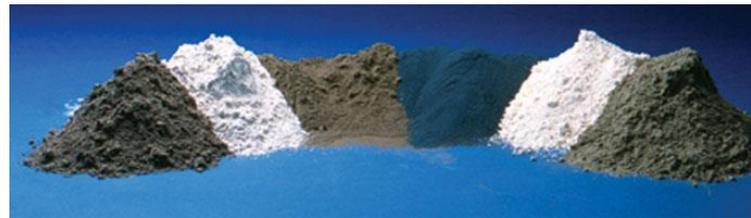
Bajo calor de hidratación en la mezcla de concreto

Máximo reemplazo de cemento

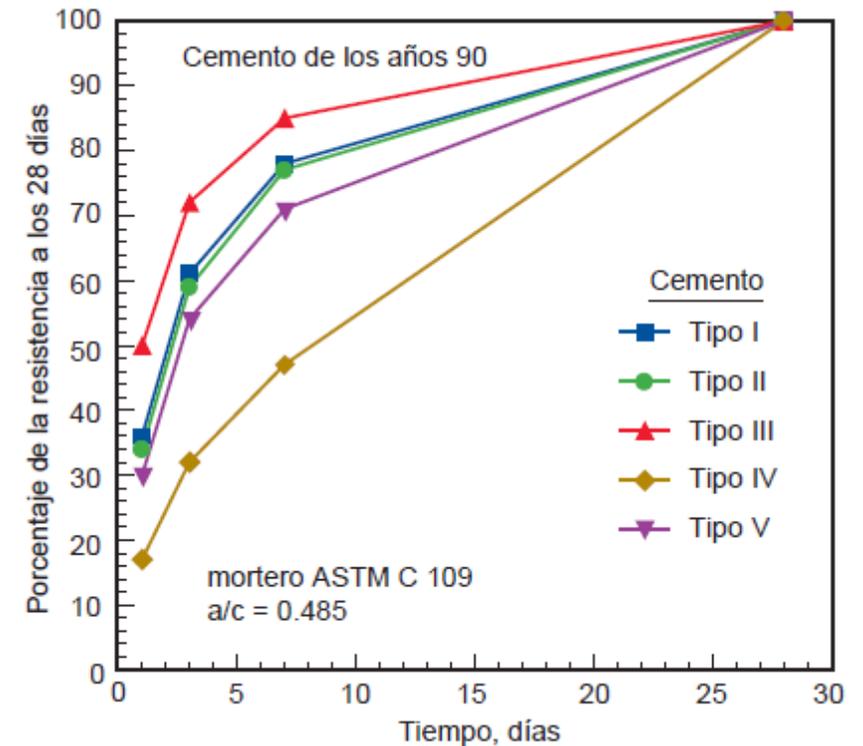
Mínimo contenido de material cementicio

Cementantes:

- Puzolanas
- Escoria de alto horno
- Cenizas volantes, etc.



$$T_{\max} = T_{\text{fresco}} + T_{\text{adiabatico}} * R$$



Fuente: PCA

Control de la temperatura máxima

Controlar el contenido de cemento

Método de pre enfriamiento

$$T_{\max} = T_{\text{fresco}} + T_{\text{adiabatico}} * R$$



$$T_{\text{fresco}}(^{\circ}\text{C}) = \frac{0.22(T_a M_a + T_c M_c) + T_w M_w - 80 M_i}{0.22(M_a + M_c) + M_w + M_i}$$

(ACI 306R-10)

Donde:

- T_o : temperatura del concreto fresco ($^{\circ}\text{C}$)
- T_c : temperatura del cemento ($^{\circ}\text{C}$)
- T_w : temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$)
- T_a : temperatura de los agregados totales ($^{\circ}\text{C}$)
- M_c : peso del cemento (kg)
- M_w : peso del agua (kg)
- M_i : peso de hielo (kg)
- M_a : peso de los agregados totales (kg)

Control de la temperatura máxima

$$T_{\max} = T_{\text{fresco}} + T_{\text{adiabatico}} * R$$

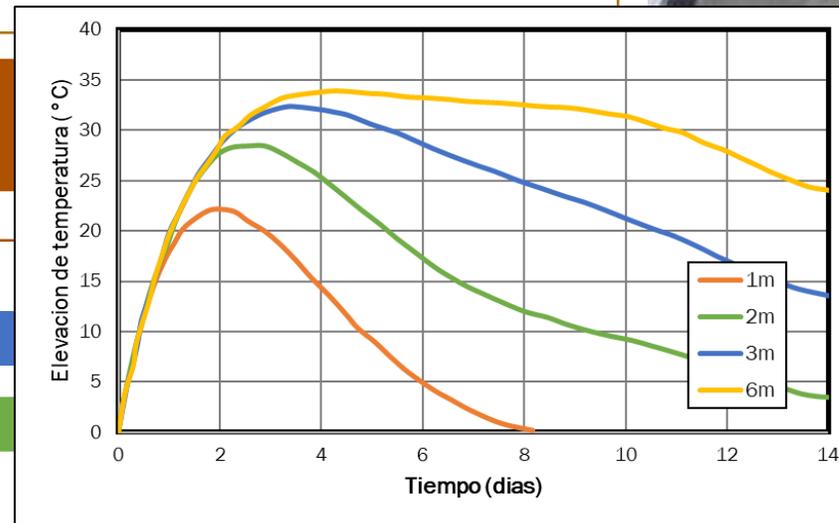
Controlar el contenido de cemento

Método de pre enfriamiento

Secciones mas delgadas

Temperatura máxima mas baja

Enfriamiento mas rápido



Secciones de vaciado

Control de la temperatura máxima

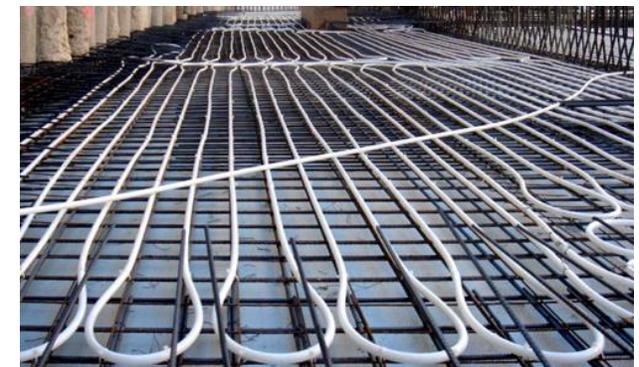
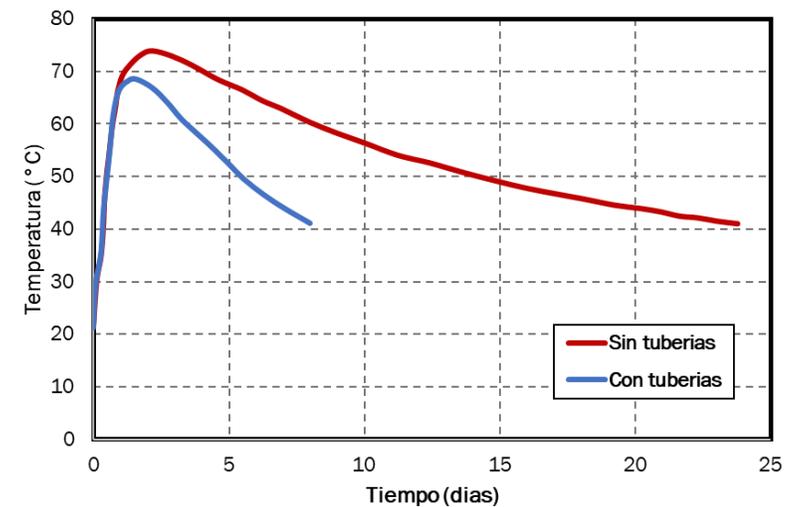
Controlar el contenido de cemento

Método de pre enfriamiento

Secciones mas delgadas

Método de post enfriamiento

$$T_{\max} = T_{\text{fresco}} + T_{\text{adiabatico}} * R$$



Control del diferencial térmico

Uso de microclima

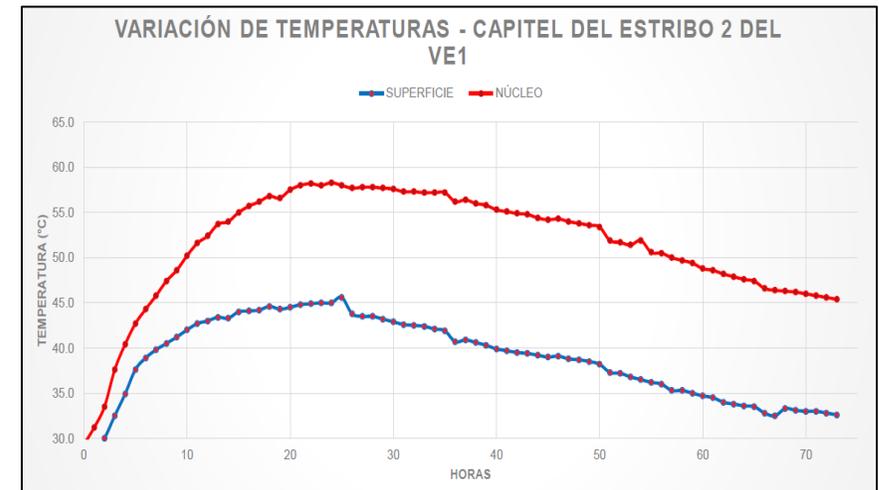
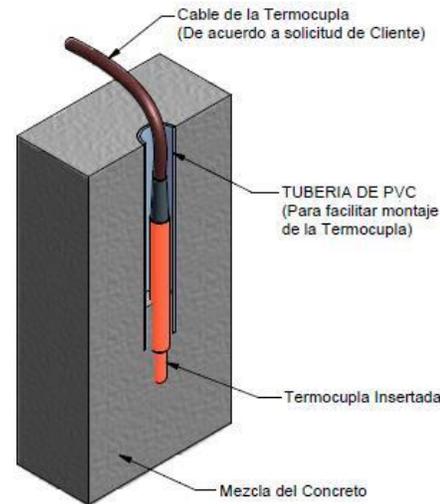
Se considerará el uso de ambientes cerrados como el medio más efectivo de protección para los climas fríos y lograr concretos de alta calidad. Los ambientes cerrados podrán construirse con materiales flexibles o con materiales rígidos (Mitigar cargas de viento, nieve, ser impermeables al aire).



Control del diferencial térmico

Uso de microclima

Monitoreo de temperaturas



Temario

- Introducción
 - Definición
 - Comportamiento térmico
 - Experiencias de vaciado masivo
- Problemática del control térmico en concretos masivos
 - Temperatura máxima del concreto (T_{\max})
 - Diferencial térmico interno ($\Delta T_{\text{admisible}}$)
- Recomendaciones constructivas
- **Métodos de calculo**
 - Temperatura máxima del concreto (T_{\max})
 - Diferencial térmico interno ($\Delta T_{\text{admisible}}$)
 - Ejemplo de calculo
- Conclusiones

Método de calculo para determinar T_{\max}

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

$$T_{\max} = T_{\text{fresco}} + \Delta T_{\text{seccion}}$$

$$T_{\max} = T_{\text{fresco}} + T_{\text{adiabatico}} * R$$

- **C:** Cantidad de cemento en el concreto (kg/m³)
- **ρ_c :** Densidad del concreto (kg/m³)
- **a/c:** Relación agua - cemento
- **$Q_{7\text{días}}$:** Calor de hidratación del cemento a los 7 días (cal/g)
- **$Q_{28\text{días}}$:** Calor de hidratación del cemento a los 28 días (cal/g)
- **EP:** Espesor del elemento (m)

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

Etapas de calculo:

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

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

Método de calculo para determinar T_{max}

1) Estimación de la liberación de calor al infinito del cemento.

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

- Si se dispone de $Q_{28\text{días}}$

$$Q_m = \beta \cdot Q_{28\text{días}}$$

- $\beta=1,01$: Para cementos de comportamiento de calor de hidratación normal.
- $\beta=1,03$: Para cementos de comportamiento de calor de hidratación moderado.

- Si solo se dispone de $Q_{7\text{días}}$

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

Donde: $Q_{41h} = \lambda \cdot Q_{7\text{días}}$

- $\lambda=0,95$: Para cementos de comportamiento de calor de hidratación normal.
- $\lambda=0,93$: Para cementos de comportamiento de calor de hidratación moderado.

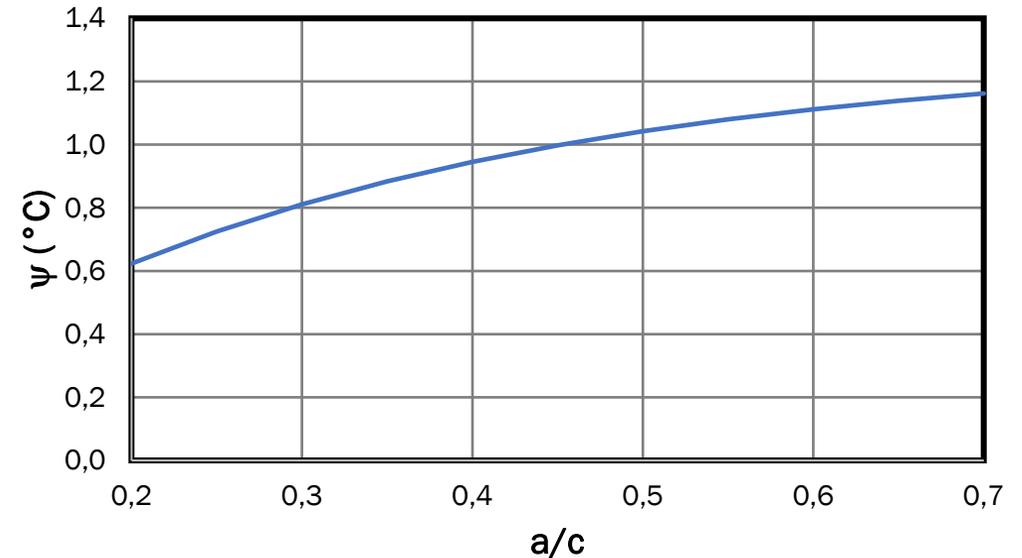
CERTIFICADO DE CALIDAD		YURA	
CEMENTO PORTLAND TIPO IP			
Referencia: Proyecto Quellaveco			
REQUERIMIENTOS QUIMICOS:		YURA	ASTM C 595 NTP 334.090
Óxido de Magnesio, MgO, %	2.29	6.00	Máximo
Trisulfato de Azufre, SO ₃ , %	2.03	4.00	Máximo
Pérdida por Ignición, %	1.86	5.00	Máximo
Cloruros, Cl-, %	0.03		No Especificación
REQUERIMIENTOS FISICOS:			
Peso Específico, g/cm ³	2.87		No Especificación
Expansión en Autoclave, %	0.07		0.80 Máximo
Tiempo de Fragado, Ensayo de Vicat, minutos			
Tiempo de Fragado (Inicio)	172		45 Mínimo
Tiempo de Fragado (Fin)	236		420 Máximo
Contenido de Aire del mortero, %	4.61		12.00 Máximo
Superficie Específica Blaine, cm ² /gr	4960		No Especificación
Finura Malla NF 325, (%)	1.75		No especificación
Resistencia a la Compresión, MPa, (Kgf/cm ²)		Mínimo:	
01 día	12.75 (130)		No Especificación
03 días	24.10 (246)	13.0 (133)	
07 días	29.94 (306)	20.0 (204)	
28 días		25.0 (255)	
Calor de Hidratación, (cal/g)		Pendiente	
7 días	66		No Especificación
28 días	74		No Especificación
Este Documento muestra las Características Típicas del Promedio Mensual de la Producción del mes de Abril 2019 confirmando que este cemento cumple las especificaciones de las normas ASTM C- 595 y NTP 334.090			
Fecha de Emisión Arequipa, 09 de Mayo 2019			
		 Gonzalo Álvarez Cárdenas Jefe de Control de Calidad Yura S.A.	
		Planta: Cementera Yura Km. 28 - Arequipa Oficina central: Av. General Diaz 527 - Arequipa Tel: (51 54) 495000 / 225000 www.yura.com.pe	

Método de calculo para determinar T_{\max}

2) Consideración de la influencia de la relación a/c.

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

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



3) Estimación del incremento de temperatura en estado adiabático.

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

$$T_{\text{adiabatico}} = \left(\frac{Q_m \cdot C}{C_p \cdot \rho_c} \right) \cdot \psi$$

C_p es la conductividad térmica del concreto colocado
(para fines de cálculo se considera $0,24 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$)

Método de calculo para determinar T_{max}

4) Consideración de los desperdicios térmicos.

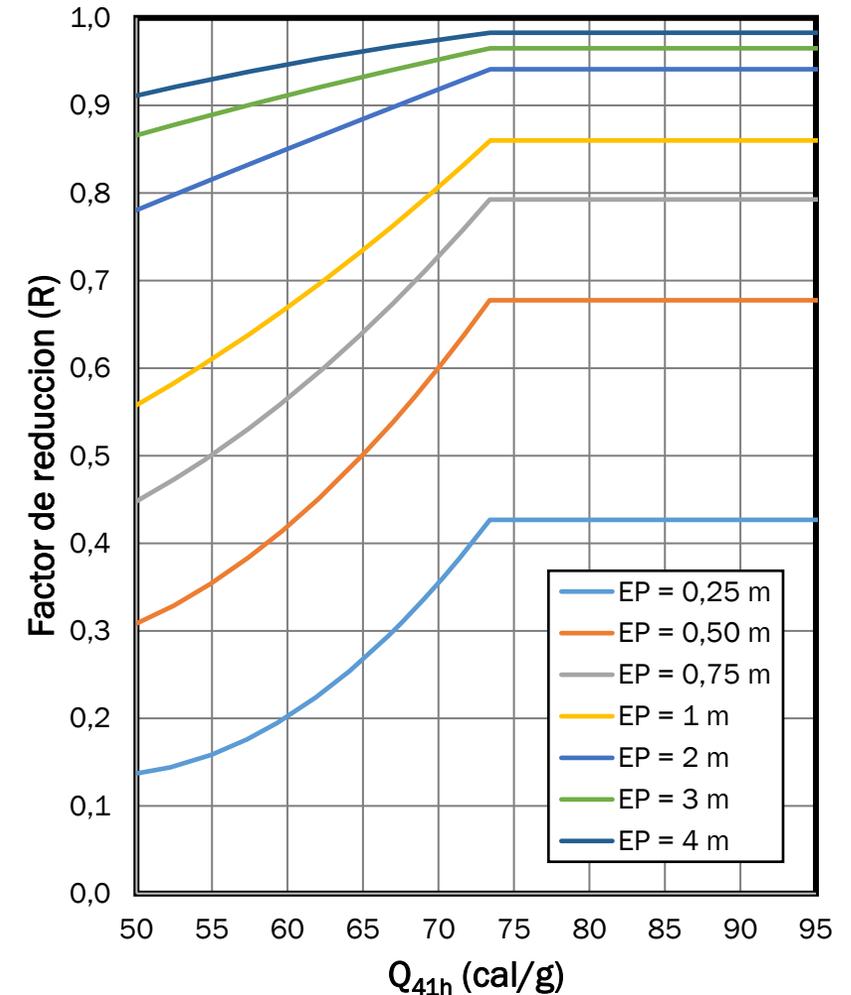
La liberación térmica depende en particular del calor generado por el cemento y del espesor del elemento. Se obtiene el coeficiente de reducción R (entre 0 y 1) que permite tomar en cuenta esta liberación, el calor generado por el cemento es expresado a través de Q_{41} .

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

$$\Delta T_{seccion} = R \cdot T_{adiabatico}$$

5) Estimación de la temperatura máxima en el núcleo de concreto.

$$T_{MAX} = T_o + \Delta T_{seccion}$$



Diferencial térmico interno (ΔT)

 $T_{\max} / \Delta T$

“La máxima diferencia de temperatura permitida está en función de las propiedades mecánicas del concreto, como la expansión térmica, la resistencia a la tracción y el módulo elástico, así como el tamaño y las restricciones del elemento de concreto”
(J. Gajda y M. Vangeem, USA 2002).

Para evaluar el esfuerzo que se genera por efectos térmicos, se utilizara lo indicado en el **ACI 207.2R-07 “Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete”**, donde se incluye un factor de restricción en función del largo y la altura del elemento.

$$f_t = K_R \cdot K_f \cdot E_c \cdot \Delta_c$$

Donde:

f_t : Resistencia a tracción del concreto (MPa)

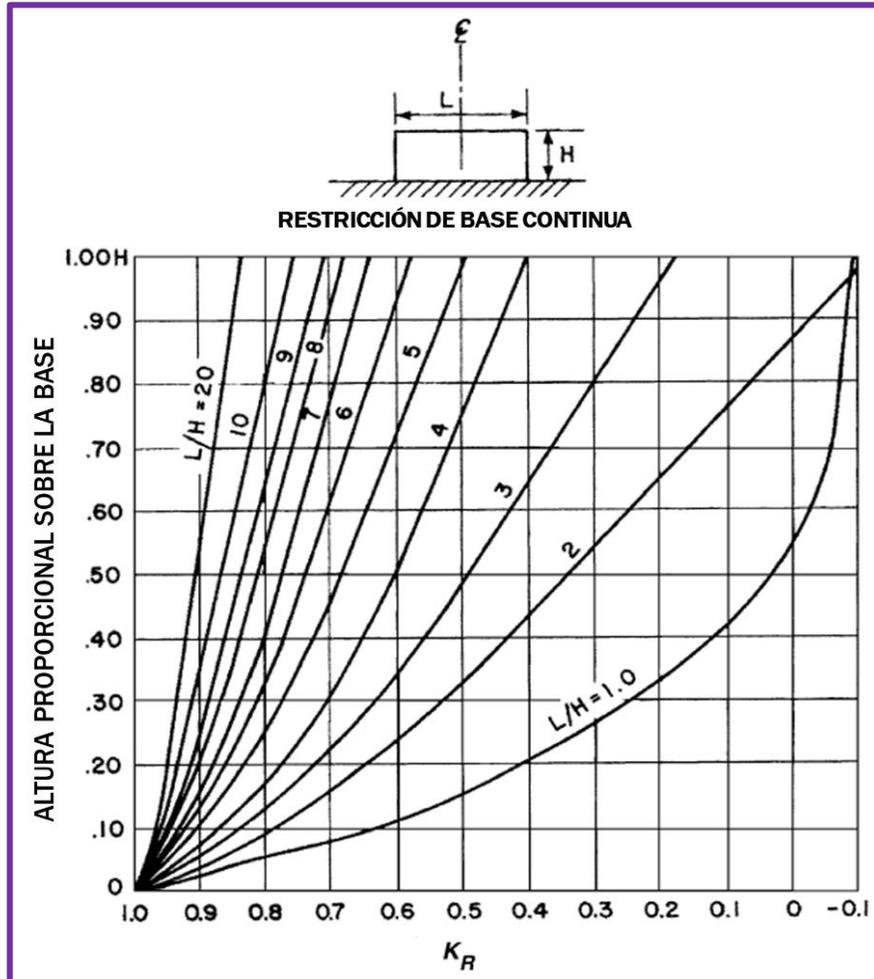
K_f : Factor de restricción por la fundación

K_R : Factor de restricción por la geometría

E_c : Modulo de elasticidad del concreto (MPa)

Δ_c : Contracción lineal del concreto si no hubiera restricción.

Diferencial térmico interno (ΔT)



$$f_t = K_R \cdot K_f \cdot E_c \cdot \Delta_c$$

$$K_f = \frac{1}{1 + \frac{A_g \cdot E_c}{A_F \cdot E_F}}$$

$$E_c = \rho_c^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f'c}$$

$$\Delta_c = \frac{\Delta L}{L} = \alpha \cdot \Delta T$$

Donde:

E_c : Modulo de elasticidad del concreto (MPa)

E_F : Modulo de elasticidad de la base (MPa)

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

A_F : Área de cimentación u otro elemento que restringe el acortamiento del elemento, generalmente tomado como una superficie plana en contacto (m²)

α : Coeficiente de expansión térmica (1/°C) (A menudo $\alpha=10 \cdot 10^{-6}$ 1/°C)

ΔT : Diferencial térmico (°C)

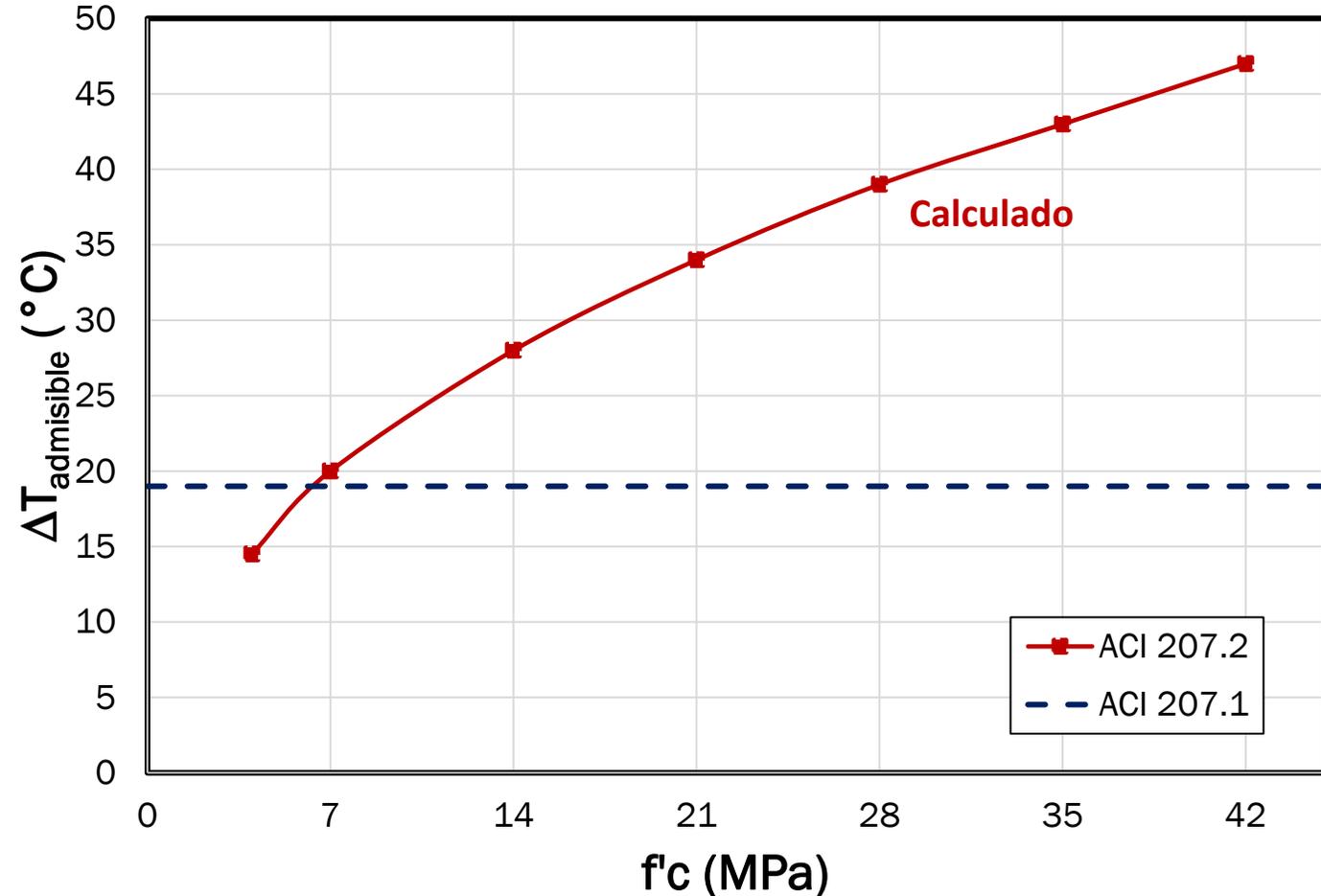
Diferencial térmico interno (ΔT)

$$f_t = K_R \cdot K_f \cdot E_c \cdot \Delta_c$$

$$f_t = 0,56 \sqrt{f'_c}$$

$$\Delta_c = \frac{\Delta L}{L} = \alpha \cdot \Delta T$$

$$\Delta T_{admissible} = \frac{0,56 \sqrt{f'_c}}{K_R \cdot K_f \cdot E_c \cdot \alpha}$$

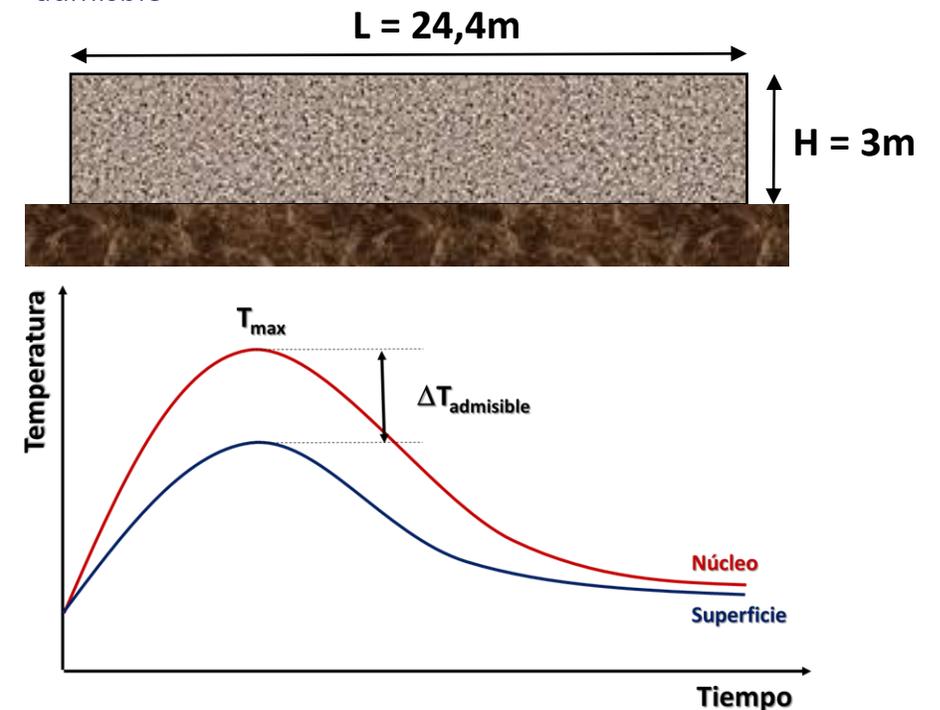


Ejemplo de calculo

Para un vaciado de concreto masivo cuyas dimensiones son 23.5m x 24.4m x 3m; se requiere realizar los cálculos de:

- Temperatura máxima en el núcleo (T_{max}) (**Método IFSTTAR**)
- Diferencial térmico admisible antes de la fisuración ($\Delta T_{admisible}$) (**Método ACI 207.2R-07**)

Datos de la mezcla de concreto	
Resistencia a la compresión ($f'c$):	35 Mpa
Contenido de cemento:	490 kg
Tipo de cemento:	IP
Densidad del concreto:	2204 kg/m ³
Agua:	180 lt/m ³
Relacion de resistencia a la compresion R_{c2}/R_{c28} :	0,42
Calor de hidratacion del cemento a 7 dias:	66 cal/g
Calor de hidratacion del cemento a 28 dias:	74 cal/g
Espesor de la estructura:	3m



Calculo de T_{\max}

- Paso 1: $Q_m = \beta \cdot Q_{28\text{días}}$

$\beta=1,03$: Para cemento IP.

$$Q_m = \beta \cdot Q_{28\text{días}} = 1,03 \cdot (74 \text{ cal/g}) = 76.22 \text{ cal/g}$$

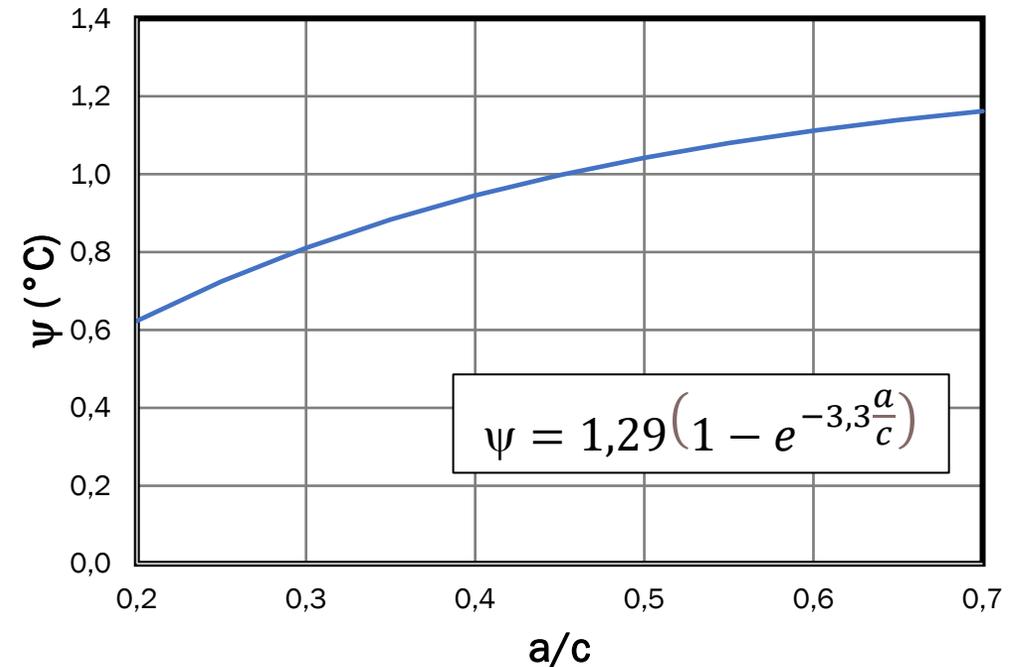
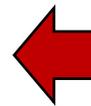
- Paso 2: Para: $a/c = 180/490 = 0.37$

Se tiene $\psi = 0,91$ (termino de corrección)

- Paso 3: $T_{\text{adiabatico}} = \left(\frac{Q_m \cdot C}{C_p \cdot \rho_C} \right) \cdot \psi$

Donde: $C_p = 0,24 \text{ cal/(g} \cdot \text{°C)}$ es la conductividad térmica del concreto

$$\Delta T_{\text{adiabatico}} = \frac{(76,22) \cdot (490)}{(0,24) \cdot (2204)} * 0.91 = 64,3 \text{ °C}$$



Calculo de T_{max}

- Paso 4: $\Delta T_{H=3m} = R \cdot \Delta T_{adiabatico}$

$\lambda = 0,93$: Para cemento IP.

$$Q_{41h} = \lambda \cdot Q_{7dias} = 0,93 \cdot 66 \text{ cal/g} = 61,38 \text{ cal/g}$$

Para un EP=3m (espesor) y un $Q_{41} = 61,38 \text{ cal/g}$, se tiene un $R = 0.92$

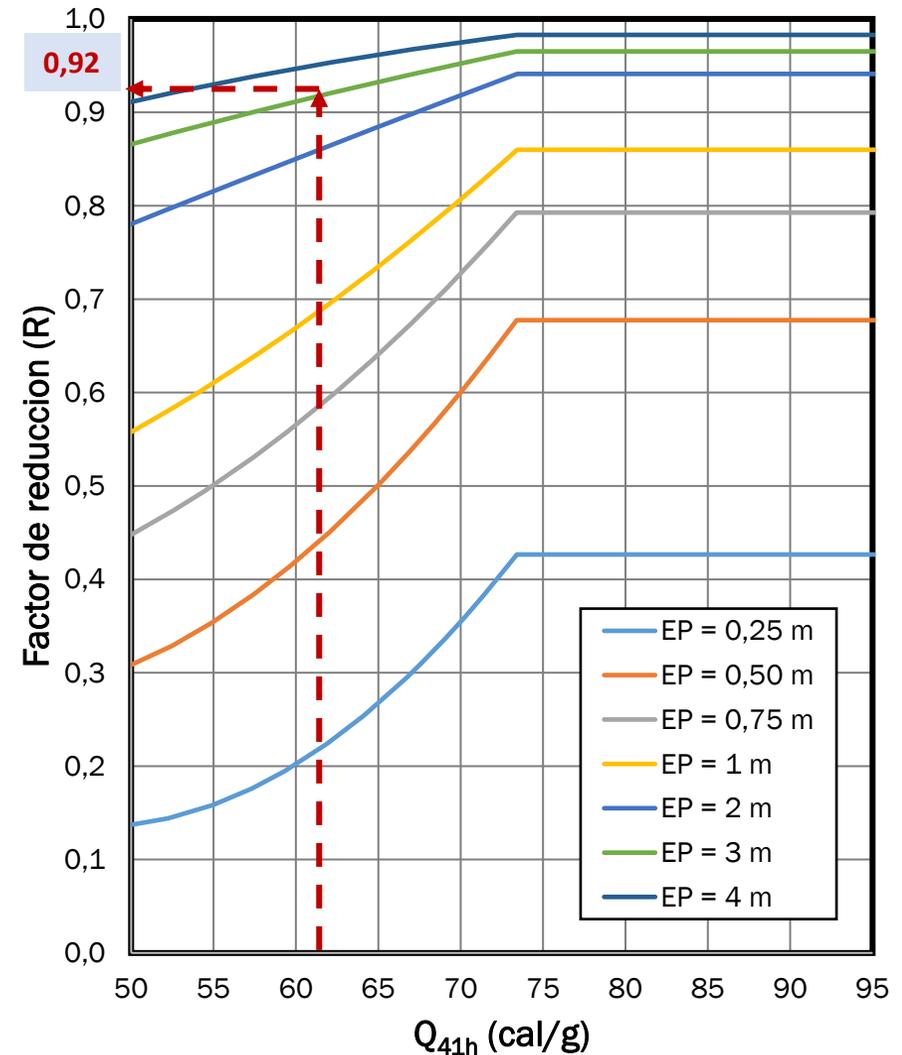
$$\Delta T_{H=3m} = R \cdot T_{adia} = (0.92) \cdot (64,3) = 59,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Paso 5: $T_{max} = T_{fresco} + \Delta T_{H=3m}$

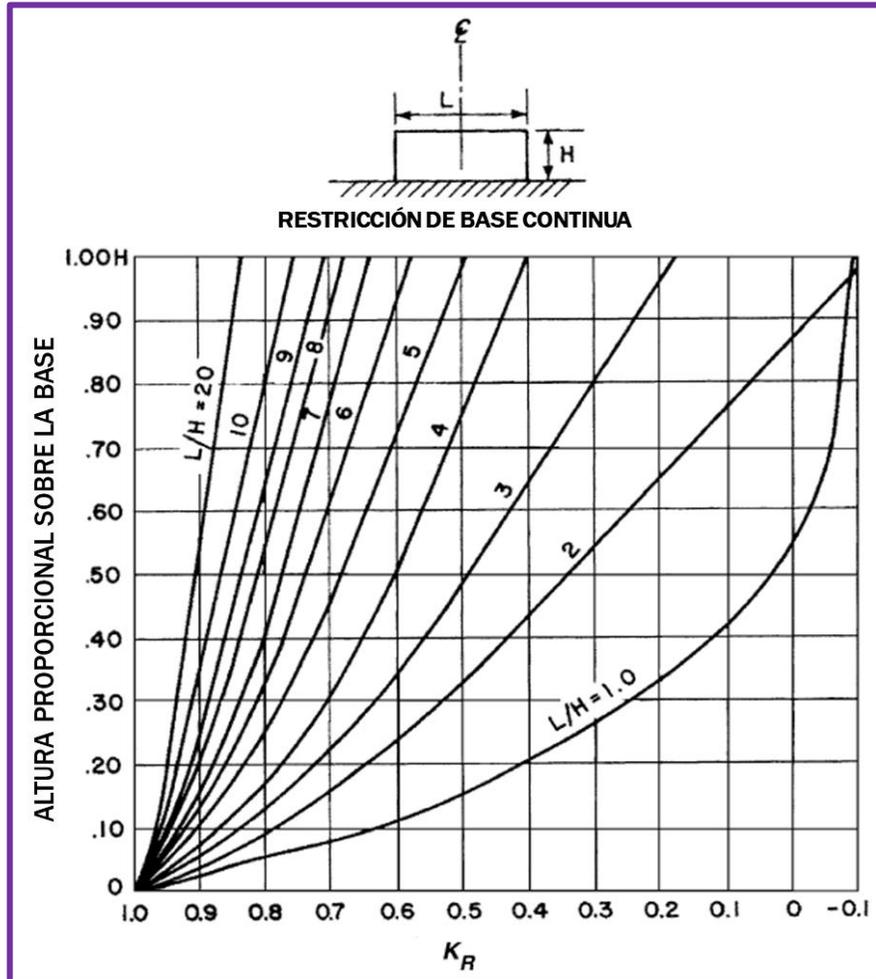
Considerando un $T_{fresco} = 19^\circ\text{C}$

$$T_{max} = 78,2 \text{ } ^\circ\text{C (Calculado)}$$

$$T_{max} = 80 \text{ } ^\circ\text{C (Real)}$$



Calculo de $\Delta T_{\text{admisible}}$



$$f_t = K_R \cdot K_f \cdot E_c \cdot \Delta_c$$

$$K_f = \frac{1}{1 + \frac{A_g \cdot E_c}{A_F \cdot E_F}}$$

$$E_c = \rho_c^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f'c}$$

$$\Delta_c = \frac{\Delta L}{L} = \alpha \cdot \Delta T$$

Donde:

E_c : Modulo de elasticidad del concreto (MPa)

E_F : Modulo de elasticidad de la base (MPa)

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

A_F : Área de cimentación u otro elemento que restringe el acortamiento del elemento, generalmente tomado como una superficie plana en contacto (m²)

α : Coeficiente de expansión térmica (1/°C) (A menudo $\alpha=10 \cdot 10^{-6}$ 1/°C)

ΔT : Diferencial térmico (°C)

Calculo de $\Delta T_{\text{admisible}}$

$$f_t = K_R \cdot K_f \cdot E_c \cdot \Delta C$$

- Paso 1:** Determinación de parámetros y calculo ΔT :

Para fines de calculo, se analizara el diferencial térmico admisible cuando el concreto tenga $f'_c=12\text{MPa}$.

$$f_t = 0,56\sqrt{f'_c} = 1,94 \text{ (MPa)}$$

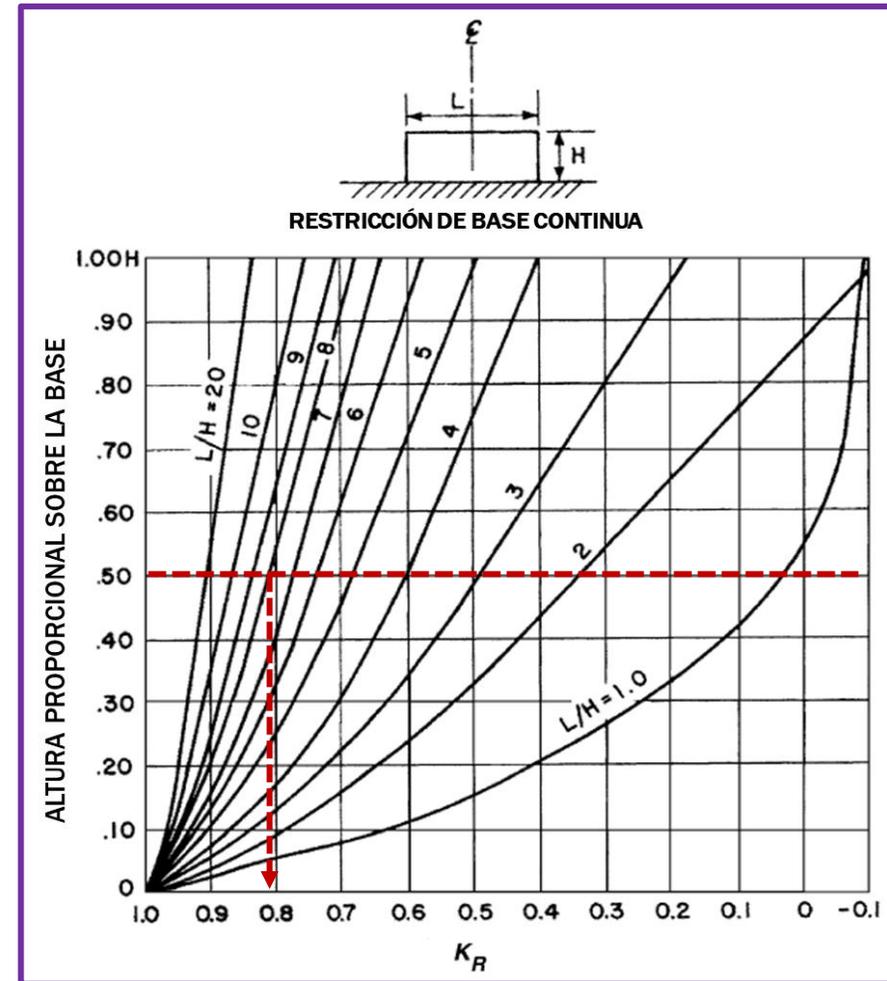
$$E_c = \rho_c^{1,5} 0,043\sqrt{f'_c} = 16969 \text{ (MPa)}$$

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

$$E_F = \rho_c^{1,5} 0,043\sqrt{f'_c} = 15491 \text{ (MPa)}$$

Debido a la geometría del elemento, $A_g=A_F$:

$$K_f = \frac{1}{1 + \frac{A_g \cdot E_c}{A_F \cdot E_F}} = \frac{1}{1 + \frac{E_c}{E_F}} = \frac{1}{1 + \frac{16969}{15491}} = 0,48$$



$L/H = 24/3 = 8$
(Sección del elemento)

$K_R = 0,81$

Calculo de $\Delta T_{\text{admisible}}$

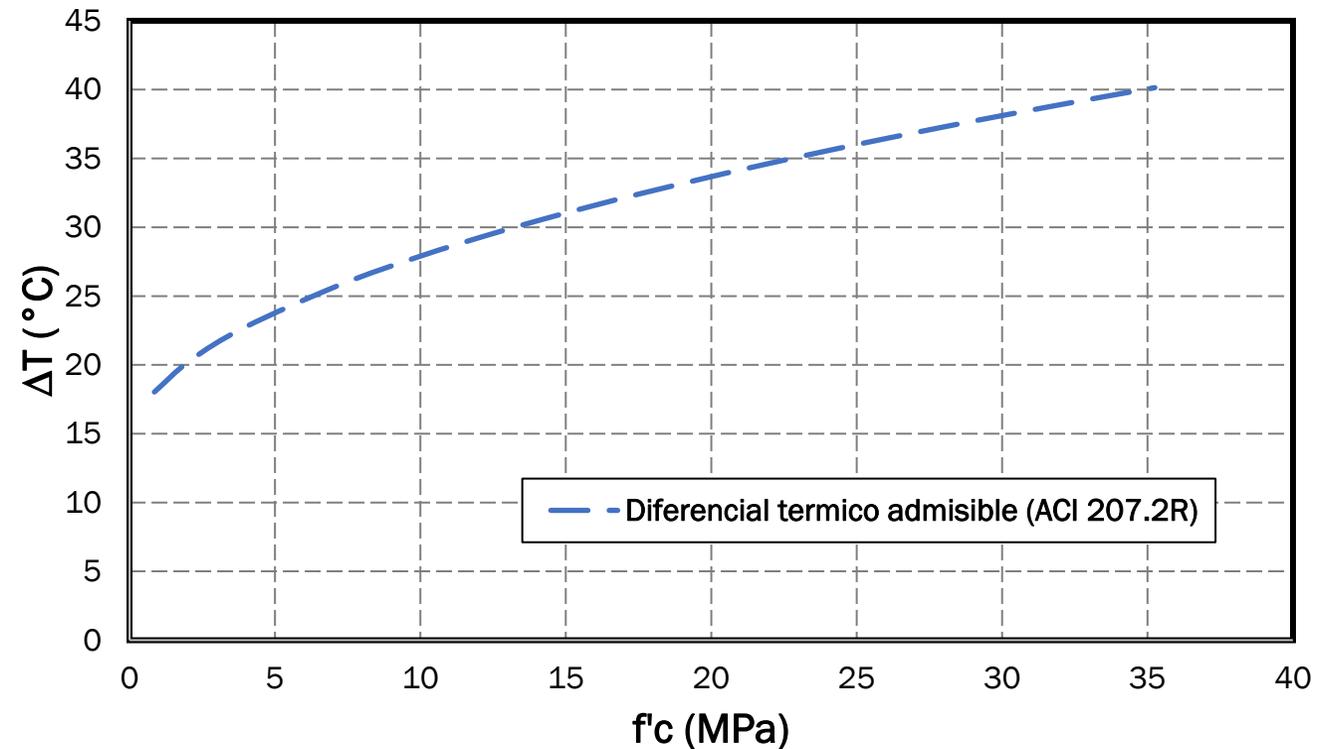
$$\Delta c = \frac{\Delta L}{L} = \alpha \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{f_t}{K_R \cdot K_f \cdot E_c \cdot \alpha}$$

$$\Delta T = \frac{1,94}{(0,81) \cdot (0,48) \cdot (16969) \cdot (10 \cdot 10^{-6})}$$

$$\Delta T = 29,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- **Paso 2:** Calculo de ΔT admisible vs. Evolución del $f'c$.



Con esta gráfica se puede determinar el ΔT admisible versus la evolución de la resistencia a compresión del concreto ($f'c$)t.

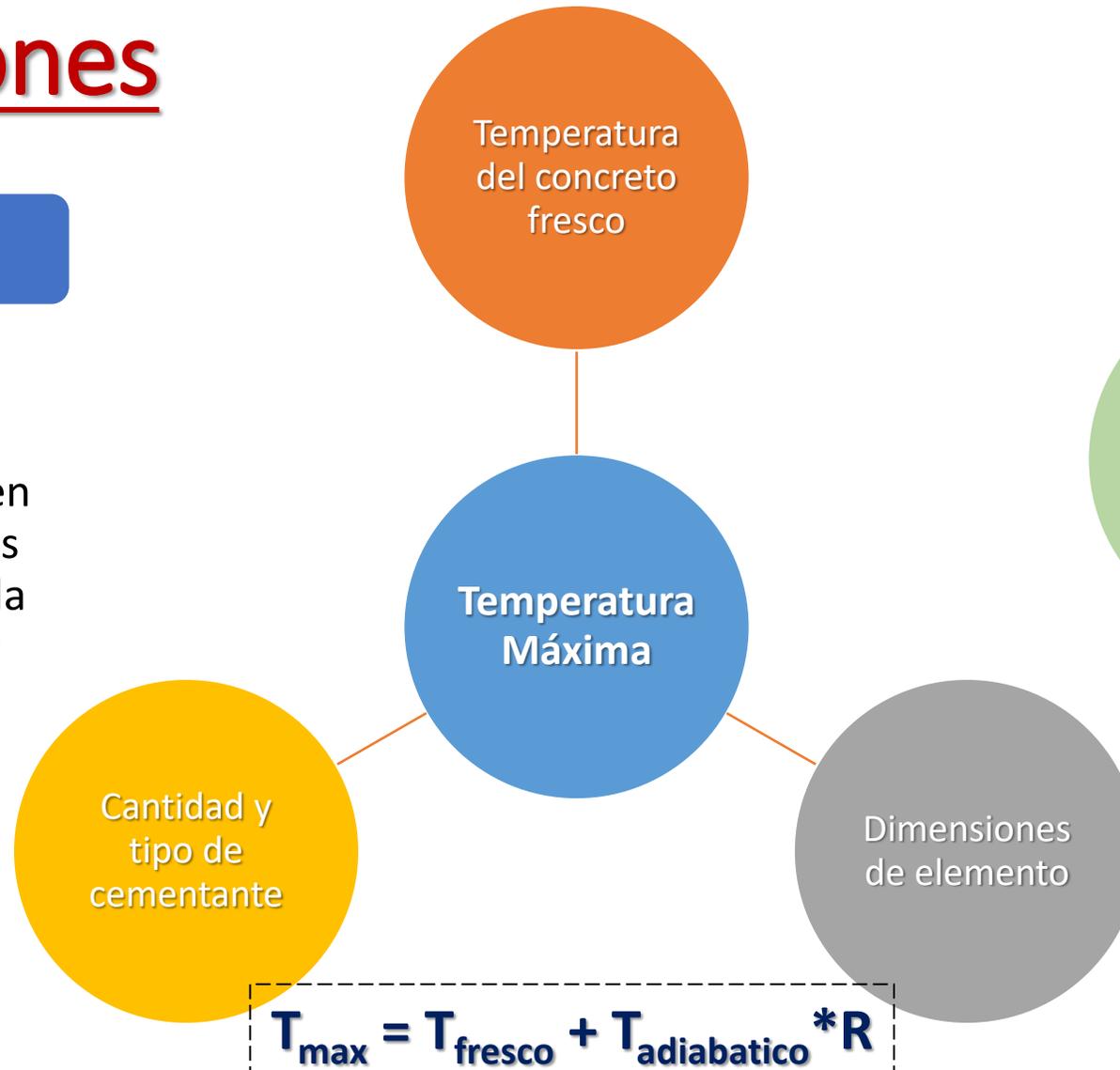
Temario

- Introducción
 - Definición
 - Comportamiento térmico
 - Experiencias de vaciado masivo
- Problemática del control térmico en concretos masivos
 - Temperatura máxima del concreto (T_{\max})
 - Diferencial térmico interno ($\Delta T_{\text{admisible}}$)
- Recomendaciones constructivas
- Métodos de calculo
 - Temperatura máxima del concreto (T_{\max})
 - Diferencial térmico interno ($\Delta T_{\text{admisible}}$)
 - Ejemplo de calculo
- Conclusiones

Conclusiones

Definición

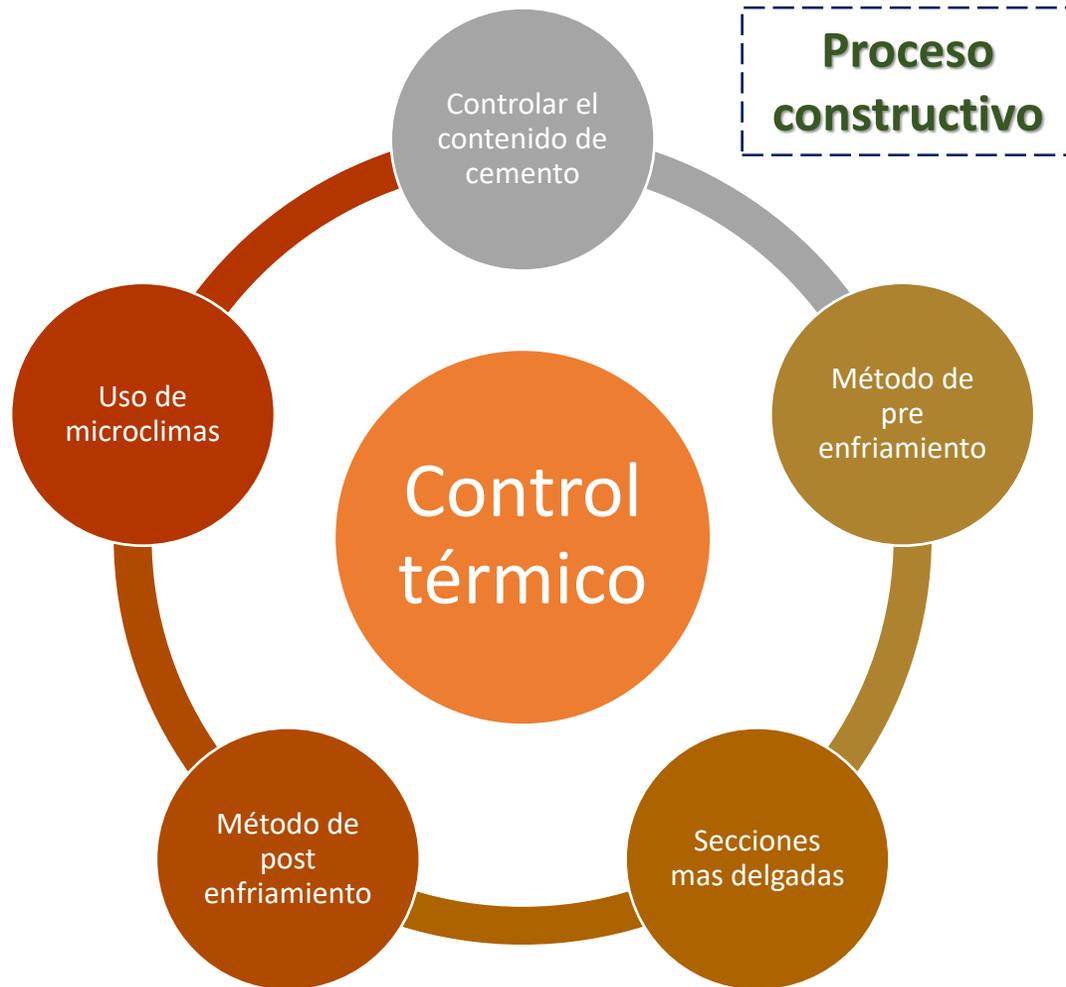
“Cualquier elemento de grandes dimensiones que genere que se tomen medidas preventivas para contrarrestar la generación de calor interior debido a la hidratación de cemento causando cambios volumétricos y con esto, fisuras o grietas”.



ACI 201.2R -2016

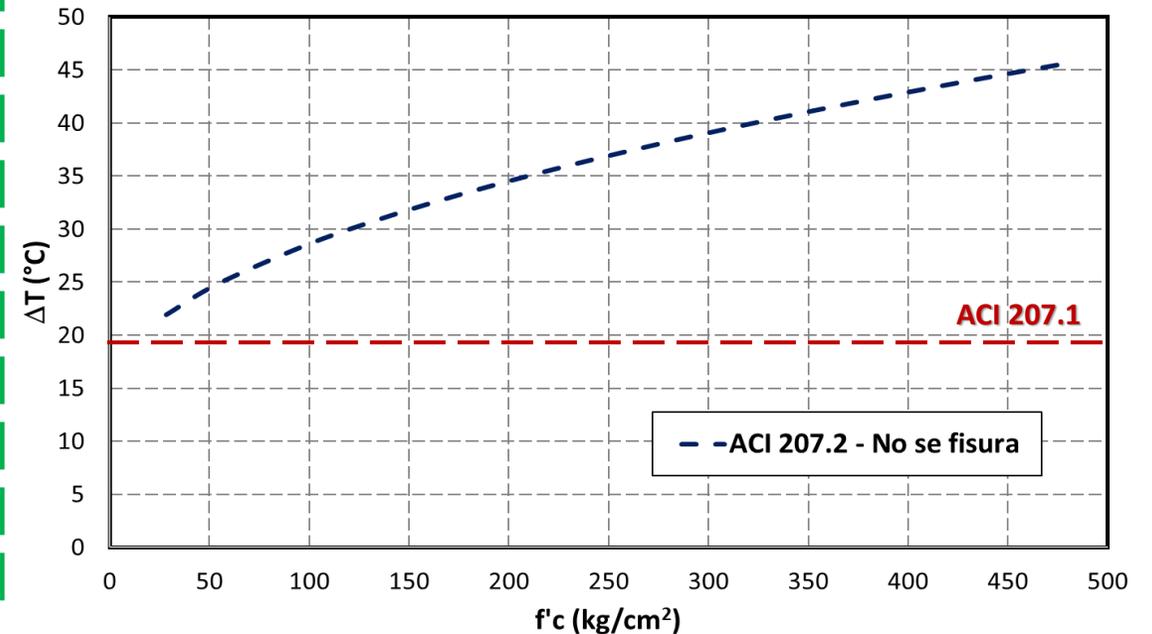
T_{max} (°C)	Previsiones
≤ 70	Sin previsiones
70 – 85	Previsiones
> 85	DEF

Conclusiones



Si las condiciones del vaciado masivo a realizar no cumplen las características de la definición de concreto masivo citada en el ACI 207.1R, entonces no podríamos concluir que el delta térmico admisible para controlar la fisuración sea 19°C.

Por lo cual es necesario realizar un cálculo a fin de delimitar el diferencial térmico admisible antes de que ocurra la fisuración (Según el ACI 207.2R).



¡Muchas gracias!