

# ESPECIFICACIÓN

## PARA HORMIGÓN MASIVO ESTRUCTURAL

SANTIAGO - JULIO - 2019

## COMISIÓN DE CONSTRUCCIÓN EN HORMIGÓN

### Integrantes

Lilian Berríos	DICTUC
Enrique Bollmann	Asintota S.A.
Jorge Bravo	Cruz y Dávila
Eugenia Carrillo	Codelco
Jorge Del Pozo	Industrial
Federico Delfin	Asociado
Edgardo Gonzalez	Universidad de Chile
Marcelo Gonzalez	Universidad Católica
Augusto Holmberg	Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile
Arturo Holmgren	Cementos Bío Bío
Susana Jara	DITEC - MINVU
Cristian Masana	Asociado
Hernán Medina	Asociado
Jorge Montegu	Asociado
Salvador Nasra	Sigdo Koppers
José Miguel Pascual	Asociado
Bernhard Paul	Asociado
Armando Quezada	Quezada y Boetsch S.A.
Rodrigo Reyes	Asociado
Gerardo Staforelli	CAVE
Patricio Tapia	Asociado
Yuri Tomicic	Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile
Renato Vargas	Asociado
Sergio Vidal	Cementos Bío Bío
Carlos Videla	Universidad Católica

## SUB COMITE HORMIGONES MASIVOS

### Integrantes

Enrique Bollmann	Asintota S.A.
Eugenia Carrillo	Codelco
Federico Delfin	IDIEM
Luis Ebensperger	Asociado
Carlos Fernández	Asociado
Marcelo Gonzalez	Universidad Católica
Augusto Holmberg	ICH
Arturo Holmgren	Cementos Bío Bío
Daniela Lara	IDIEM
Hernán Medina	Asociado
Jorge Montegu	Asociado
Salvador Nasra	Sigdo Koppers
José Miguel Pascual	Asociado
Bernhard Paul	Asociado
Armando Quezada	Quezada y Boetsch S.A.
Patricio Tapia	Asociado
Yuri Tomicic	ICH
Carlos Videla	Universidad Católica

## 1. ALCANCE

De acuerdo con el ACI116R, se considera como hormigón masivo a “cualquier volumen de hormigón con dimensiones relativamente importantes como para requerir de la adopción de medidas específicas que permitan controlar el calor generado en las reacciones de hidratación del cemento y las variaciones volumétricas consiguientes, de modo de minimizar los riesgos de agrietamiento asociados”.

Por otra parte, para incluir el caso de las estructuras de hormigón armado, se debe considerar como elementos de hormigón masivo a aquellos en los que, aparte de los aspectos dimensionales, por requerimientos de resistencia o durabilidad de la estructura, se deba utilizar mezclas de hormigón con características de alto potencial de desarrollo de calor de hidratación, con los consiguientes efectos térmicos, principalmente: gradientes térmicos críticos, que generen fisuración superficial no controlada, y reacciones químicas expansivas, al interior del elemento, conocida también como fenómeno expansivo por Formación de Etringita Diferida, FED (DEF, por su sigla en inglés), causante de su deterioro y pérdida de resistencia.

El endurecimiento del hormigón a temperaturas altas, como las que se alcanzan en el núcleo de elementos de hormigón masivo, dará origen, por su parte, a una reducción significativa en la resistencia final, con respecto a su resistencia potencial.

Estas especificaciones cubren los requisitos que debe cumplir el hormigón masivo estructural, tanto en cuanto a su composición como a las medidas que se deberán adoptar, conforme a la naturaleza e importancia de la obra y condiciones de exposición, a fin de prevenir la ocurrencia de los fenómenos asociados a las elevadas temperaturas y gradientes térmicos propios de la construcción con hormigón masivo estructural

Este documento no considera los efectos de las restricciones externas a los cambios volumétricos por efectos de la temperatura en el elemento masivo estructural, particularmente en la etapa de enfriamiento, los que deben ser evaluados por el Ingeniero diseñador.

Al Ingeniero diseñador le corresponde calificar los elementos que deben ser tratados como hormigón masivo. El Constructor podrá solicitar modificar esa clasificación para algún elemento en función del proceso constructivo que proponga.

El hormigón que se utilice en un elemento clasificado como masivo estructural deberá cumplir, en primer lugar, con todos los requisitos aplicables de NCh170-2016 y con lo establecido en las especificaciones técnicas particulares del proyecto y en cuanto a las medidas específicas para el control de los fenómenos térmicos asociados a la condición de hormigón masivo, con las disposiciones que en estas especificaciones se establecen.

*C.1 Usualmente, elementos estructurales de hormigón cuya dimensión menor sea mayor que 0,8 m y con dosis de cemento mayor que 360 kg/m<sup>3</sup> (especialmente si es grado alta resistencia) o grado de resistencia a compresión igual o superior que G35, requieren una evaluación para determinar si deben ser considerados como hormigón masivo.*

*Algunos ejemplos de obras en donde se pueden encontrar elementos de hormigón masivo con las características antes mencionadas, son:*

*- Infraestructura vial: puentes (estribos, cepas, muros, columnas, dinteles), puentes (vigas de coronamiento, vigas transversales).*

*- Instalaciones industriales: losas de fundaciones (MAT), estanques, muros cortafuego, fundaciones de máquinas.*

*- Edificación: Muros de corte, muros de núcleos de ascensores, losas de fundación, vigas, columnas.*

*En el Anexo 4 se presenta modelo simplificado que considera este efecto.*

## 2. REQUISITOS GENERALES

2.1 Los elementos que en el proyecto se clasifiquen como hormigón masivo estructural deben quedar claramente identificados en los planos de diseño y en las especificaciones técnicas correspondientes. El diseño de estos elementos debe incluir también, si fuese el caso, la ubicación de las juntas de hormigonado y de los insertos, si los hubiere.

Dependiendo de los procedimientos de construcción empleados, el Constructor puede proponer que ciertos elementos sean reclasificados para los efectos de ser tratados como normales o masivos estructurales y la posibilidad de relajar esta condición en el caso de fraccionamiento del elemento, incorporando juntas de hormigonado. Esta reclasificación debe ser aprobada por el Ingeniero diseñador por escrito, previo al inicio de la construcción, al igual que la posibilidad de incorporar juntas de hormigonado adicionales.

2.2 Para los efectos de limitar el riesgo de deterioro asociado al eventual fenómeno FED en elementos de hormigón masivo el diseñador debe definir, en función de la importancia estructural de la obra o del elemento de hormigón masivo considerado y de la condición de exposición ambiental de la obra, el nivel de prevención a adoptar.

Las obras o partes de éstas, consideradas como hormigón masivo estructural pueden ser clasificadas, para los efectos de definir las medidas preventivas correspondientes, en tres categorías CI, CII y CIII, representativas de los niveles de riesgo frente al fenómeno FED que se estaría en condiciones de

aceptar, dada la naturaleza de la obra, o el compromiso estructural de los elementos de hormigón masivo considerados. Será responsabilidad del Ingeniero diseñador definir la categoría de la obra o elemento, conforme a los criterios que se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Categorías de Obras o Elementos.

Categoría	Ejemplo de obra o elementos
CI (consecuencias menores o aceptables)	Obras de hormigón de grado < G17. Elementos no estructurales de edificación. Elementos fácilmente reemplazables. Obras provisionarias. Elementos prefabricados no estructurales.
CII (consecuencias poco tolerables)	Elementos estructurales en edificación e infraestructura (puentes típicos). Prefabricados estructurales (incluido tuberías de baja presión).
CIII (consecuencias inaceptables)	Túneles, represas, puentes y viaductos de gran relevancia. Edificios patrimoniales.

Por otra parte, complementando las clases de exposición de la NCh170-2016, en la Tabla 2 se definen las clases de exposición E 0, E 1 y E 2 adaptadas al ataque por FED. Éstas tienen en cuenta que el efecto de la presencia de agua o condiciones de alta humedad relativa del ambiente son los factores necesarios para el desarrollo de la Formación de Etringita Diferida (FED).

Tabla 2. Clases de exposición ambiental.

Clase	Ambiente de exposición	Ejemplo
E 0	Seco o moderada humedad	Elementos interiores en edificios con baja HR. Elementos exteriores protegidos de la lluvia.
E 1	Ciclos humedad/secado Alta humedad	Elementos interiores en edificios con alta HR. Elementos exteriores sin protección y expuestos a la lluvia, sin acumulación de agua. Elementos no protegidos sometidos a condensación en forma frecuente.
E 2	En contacto con agua: Sumergido, Acumulación de agua en superficie, Zona de mareas	Elementos sumergidos en forma permanente (pilotes, cepas de puentes). Elementos estructurales marinos. Elementos permanentemente expuestos a salpicadura o rocío de agua.

Los niveles de prevención a adoptar, determinados en función de la categoría de la obra y de la clase de exposición se asocian, como se describe en la Tabla 3, a la temperatura máxima que se acepta pueda alcanzar el hormigón después de su colocación, durante la etapa de endurecimiento, medida en el núcleo del elemento y controlada como se indica en 4.2. La temperatura máxima del hormigón determinada para la categoría y condiciones de exposición de la tabla se debe cumplir siempre, a menos que se utilicen cementos alternativos, de composición química aceptable, que cumplan con los requisitos que se indican en dicha tabla, o se demuestre, mediante ensayo de comportamiento, que el hormigón que se propone utilizar no es susceptible a presentar reacciones expansivas al quedar expuesto a niveles de temperatura de curado por encima del valor de temperatura máxima que entrega la tabla.

Tabla 3. Requisito de temperatura máxima admisible en el núcleo.

	E0	E1	E2	
C I	85°C	85°C	85°C	
C II	85°C	75°C <sup>2</sup>	70°C <sup>2</sup>	
C III	85°C	70°C <sup>2</sup>	65°C <sup>3</sup>	Ensayo de comportamiento.

1. El ensayo de comportamiento es el de la norma LCPC N°66, que se describe en el Anexo 1. Este ensayo corresponde a un ensayo de aptitud, previo al inicio de la obra.

2. Los valores límite se pueden incrementar en 10°C si se cumplen alguna de las condiciones siguientes:

- Verificación mediante ensayo de comportamiento
- Cemento con contenido mínimo de 25% de puzolana ó 35% de escoria y contenido de SO<sub>3</sub> ≤ 3%

3. En la combinación C III/E 2, se debe respetar el valor límite de 65°C, a menos que se verifique mediante el ensayo de comportamiento (Anexo 1) la no susceptibilidad de la mezcla utilizada. Para esta combinación el ensayo in-situ (Anexo 2) señalado en el punto 4.1 b) es obligatorio.

4. En el caso de variaciones significativas de composición química del cemento (cambio de clínker), se puede validar la nueva composición mediante verificación de conformidad con el valor límite del índice DEF, determinado según Anexo 3.

5. En cualquier caso, la temperatura máxima del hormigón debe ser inferior a 85°C.

C.2.1 El Constructor puede proponer procesos constructivos que permitan mitigar los efectos de altas temperaturas como también la reclasificación de un determinado elemento como no masivo, por ejemplo, su construcción en etapas independientes, mediante juntas de construcción, previamente aprobadas por el ingeniero diseñador.

C.2.2.1. También se puede clasificar como categoría CIII la infraestructura de vías férreas (durmientes), por efecto de curado acelerado con vapor.

C.2.2.2. Usualmente el máximo de temperatura se presenta en el centro del elemento entre 2 a 4 días después del hormigonado.

C2.2.3 Tabla 3.4. El Mandante puede establecer la obligatoriedad de informar cambios en las propiedades químicas del cemento que puedan afectar la temperatura máxima del hormigón.

C.2.2.a) Los requisitos de diferenciales de temperatura admisibles están asociados a definir el momento de retiro de las protecciones térmicas del elemento de hormigón masivo. La resistencia puede ser estimada utilizando mediciones de la madurez del elemento y corresponde a la resistencia superficial del mismo (25 mm bajo la superficie). Ver anexo 4 por métodos de estimación de la temperatura dentro de la masa de hormigón.

C.2.2.4. b) Si el hormigón alcanza sobre 65° C a una temprana edad, puede existir una disminución en la resistencia final, que podría llegar hasta un 20% al compararla con el mismo hormigón ensayado a 28 días, que se hubiese curado por debajo de 40° C. El Ingeniero diseñador debe considerar que este fenómeno afectaría sólo a un volumen de hormigón en torno al núcleo del elemento masivo.

En cuanto a los requisitos para la protección frente al agrietamiento se debe cumplir con lo siguiente:

- a. El diferencial de temperatura entre el núcleo y cualquiera de las superficies del elemento de hormigón masivo no debe exceder los valores indicados en la Tabla 4.

Tabla 4. Requisitos de diferenciales de temperatura entre el núcleo y el recubrimiento.

Resistencia real a compresión (cilíndrica)	<10 MPa	Entre 10 y 25 MPa	>25 MPa
$\Delta T, ^\circ C$	20	25	30

- b. El Ingeniero Diseñador debe considerar en su especificación del hormigón masivo la eventual disminución en la resistencia a largo plazo que sufre el hormigón que ha sido expuesto a un curado a alta temperatura ( $>65^\circ C$ ) a edades tempranas. Este efecto es especialmente importante de considerar en las secciones sometidas a esfuerzos de corte relevantes y también en puntos donde la resistencia de hendimiento del hormigón sea relevante, como son los puntos de traspaso de carga al hormigón de los pernos de anclaje. Para compensar esta pérdida de resistencia, el Ingeniero Diseñador puede especificar la resistencia a la compresión del hormigón a la edad de 56 días, o la más tardía que sea compatible con las condiciones del proyecto, por ejemplo 90 días.

## 3. MATERIALES

### 3.1 Cemento

El cemento debe cumplir con NCh148 y debe corresponder a un cemento con bajo calor de hidratación, preferentemente con adiciones. Debe utilizarse la mínima dosis de cemento compatible con la resistencia requerida para el elemento.

### 3.2 Áridos

Los áridos deben cumplir con los requisitos de NCh163 y su Coeficiente de Dilatación Térmica debe ser el menor posible. Se debe usar el mayor tamaño máximo compatible con los procedimientos de colocación.

### 3.3 Aditivos

Se pueden emplear los mismos aditivos que se utilizan en el hormigón convencional, con excepción de los aditivos acelerantes de fraguado, sin embargo, la utilización de aditivos debe ser autorizada por escrito por el Ingeniero diseñador, previo al hormigonado del elemento masivo.

*C.3. Como referencia, se puede consultar el apéndice 5 “Dosificación de Mezclas para Hormigón Masivo” del ACI 211.1*

*C.3.2 De ser posible, se recomienda emplear árido calizo, que permite obtener hormigones con coeficiente de dilatación  $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  en lugar de  $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , que es el que se obtiene al emplear grava silícea.*

## 4. EJECUCIÓN

### 4.1 Información que debe remitir el Constructor

El Constructor debe informar y remitir para su aprobación, a lo menos 30 días antes del inicio de la faena de hormigón masivo, un Plan de Control de Temperatura, donde se describan las medidas y procedimientos a utilizar para lograr el cumplimiento con los límites de temperatura máxima al interior del elemento y con el diferencial de temperatura máximo admisible, dentro de los primeros días de colocado el hormigón. Se deben también describir las acciones a tomar en caso de ser excedidos dichos límites.

A continuación, se detalla la información que, sin ser excluyente de otras posibles medidas, debe contemplar el Plan de Control de Temperatura:

- a.** Cantidad y tipo de cemento en el hormigón y tamaño máximo del árido a utilizar;
- b.** Aumento de la temperatura del hormigón, en condiciones adiabáticas, estimada mediante modelación computacional o utilizando métodos simplificados (ver Anexo 4), o determinada mediante medición en obra en el ensayo de maqueta (ver Anexo 2). Este último ensayo se considera obligatorio en el caso de elementos masivos correspondientes a la combinación C III/E 2 de la Tabla 3;
- c.** Temperatura máxima del hormigón al momento de la colocación;
- d.** Temperatura máxima para el hormigón colocado, estimada a partir de las condiciones esperadas

al momento de la colocación y el uso de las medidas propuestas para controlar la temperatura;

- e.** Descripción de los procedimientos y equipos específicos que se contemplan para lograr que la temperatura máxima del hormigón colocado no exceda el límite máximo de temperatura especificado;
- f.** El diferencial máximo de temperatura estimado para las primeras horas después de hormigonado el elemento, a partir de las condiciones esperadas al momento de la colocación del hormigón y del uso de las medidas de control propuestas;
- g.** Descripción de los procedimientos y equipos específicos que se contemplan para asegurar que el diferencial de temperatura en el elemento hormigonado no exceda el valor límite correspondiente, especificado en Tabla 4;
- h.** Descripción de las medidas y equipos específicos que se consideran para monitorear y registrar las temperaturas y diferenciales de temperatura al interior del elemento, durante el período de control considerado;
- i.** Plano que contenga la ubicación de los sensores de temperatura en el elemento a hormigonar;
- j.** Descripción del formato y frecuencia de envío de los datos de temperatura registrados durante el período de control;
- k.** Descripción de las medidas que se deberán adoptar en caso de

excederse los límites especificados para la temperatura máxima o el diferencial máximo de temperatura en el elemento;

- l.** Descripción de los procedimientos de curado a implementar en la obra, incluyendo materiales, métodos y duración del tratamiento;
- m.** Descripción de los procedimientos de descimbre y desmolde del elemento con las medidas contempladas para asegurar que el diferencial de temperatura en las superficies temporalmente expuestas, no exceda el límite especificado y las medidas para asegurar mantener las condiciones de curado después de retirado el moldaje;
- n.** Si por algún motivo el contenido cemento utilizado, y/o su composición química, se modifica, el plan de control de temperatura deberá ser debidamente actualizado.

## 4.2 Control de la temperatura del hormigón

Se debe monitorear la temperatura en el núcleo del elemento de hormigón y registrar el diferencial entre esa temperatura y la temperatura superficial, desde el inicio de la colocación del hormigón hasta el momento en que se retiran las protecciones, de acuerdo a lo indicado en la sección 4.3.

### 4.2.1 Monitoreo de las temperaturas del hormigón

A menos que se especifique lo contrario o se establezca algo diferente en el plan de control térmico, la instrumentación mínima para el registro de temperaturas debe contemplar la colocación de sensores de temperatura, dos en el centro de la masa del elemento y otros dos sensores a una profundidad de 25 mm desde la superficie exterior más cercana. El segundo sensor, en cada caso, obedece a la necesidad de contar con respaldo adecuado, que asegure el registro de la información requerida para verificar el cumplimiento con los parámetros de control especificados. Además, se debe contar con un sensor de temperatura para monitorear la temperatura ambiente imperante en el sitio, durante el período de control.

A menos que se especifique lo contrario, la frecuencia con que se debe monitorear la temperatura se debe ceñir a intervalos de tiempo que, conforme a la cláusula 5. 2 de la norma prNCh3565, se fijan cada 30 minutos o menos para las primeras 48 horas, para posteriormente continuar registrando cada 1 hora y se debe mantener por un mínimo de 7 días después de la colocación del hormigón.

Los sensores deben ser capaces de medir y registrar temperaturas en el rango que va entre la temperatura

mínima ambiente que se registra en el lugar del proyecto y al menos 85 °C, con una precisión de al menos +/- 1,0 °C. Los datos tiempo-temperatura registrados y almacenados por los sensores son transferidos y procesados a través de un PC. Se debe verificar que los sensores de temperatura funcionan correctamente antes de colocar el hormigón. Los datos de los sensores deben estar disponibles para revisión por parte del diseñador del proyecto.

### 4.2.2 Cumplimiento de Temperaturas Máximas

Se debe comparar las temperaturas y diferencias de temperatura con los límites máximos especificados en 2.2 durante el intervalo de medición especificado en el plan de control térmico.

Si se excede cualquiera de los límites, se debe tomar acciones inmediatas para remediar tal situación conforme a lo establecido en el plan de control térmico aprobado. No se debe colocar hormigón masivo adicional hasta que haya sido identificada la causa del incumplimiento por temperatura máxima o diferencial máximo de temperatura y se hayan aceptado las medidas correctivas del caso.

### 4.3 Curado y protección

Inmediatamente después de su colocación, se debe proteger el hormigón contra el secado prematuro, el calor excesivo, las bajas temperaturas y el daño mecánico.

Cuando se utilice la resistencia del hormigón como criterio para finalizar el curado y protección, se debe cumplir lo indicado en la cláusula 13.2.3 (b) de la norma NCh170-2016, utilizando el sensor ubicado a 25 mm de profundidad desde la superficie. La curva madurez-resistencia se debe calibrar de acuerdo a los procedimientos de

*C.4.1.b) El aumento de temperatura adiabática del hormigón permite estimar de manera conservadora la temperatura máxima a la que puede llegar el hormigón masivo una vez colocado. Esta propiedad del hormigón puede ser obtenida a partir de un ensayo directo o un cálculo basado en la dosificación y propiedades de los materiales componentes del hormigón.*

*C.4.1.g) Las medidas de reducción de temperatura o diferenciales de temperatura pueden incluir protecciones adicionales para reducir el gradiente térmico, cambios en los procedimientos para la colocación o sistemas especiales de enfriamiento, si los hay.*

*Se pueden considerar también recomendaciones similares a las establecidas para hormigonado en tiempo caluroso respecto de los materiales como son:*

*a) Áridos: Mantenerlos a la sombra, húmedos para que al evaporar bajen la temperatura.*

*b) Agua: Estanques a la sombra, cañerías enterradas, estanques pintados de blanco, reemplazo de parte del agua con hielo.*

*C.4.1.k) Si se excede el límite de temperatura máxima, no existen medidas efectivas para controlar dicho aumento, salvo intensificar las mediciones de temperatura y controlar el gradiente térmico de la superficie con el ambiente, para disminuir el riesgo de agrietamiento. En todo caso, se debe proceder a una revisión de los procedimientos para adoptar las medidas correctivas necesarias para las próximas etapas de hormigonado.*

prNCh 3565.

Si no se cuenta con un procedimiento para estimar la resistencia del hormigón, entonces la protección se debe mantener al menos hasta que la diferencia entre la temperatura superficial del hormigón y la temperatura ambiente (medida a la sombra), registrada durante un período de 12 horas continuas como mínimo, sea menor que 5°C. En este caso, el plazo de curado y protección no podrá ser menor a 7 días si la temperatura media diaria ambiental en dicho periodo es igual o mayor de 10°C. Si lo anterior no se cumple, el Ingeniero Diseñador podrá especificar un aumento de los plazos de curado y protección.

Cualquiera sea el sistema de curado empleado, se deben adoptar medidas para evitar una diferencia brusca entre la temperatura superficial del hormigón y la temperatura ambiente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACI Committee 116; ACI 116R: 2000 (R2005) Cement and Concrete Terminology American Concrete Institute (2000).
2. ACI Committee 201; ACI 201.2 R-16 Guide to Durable Concrete; American Concrete Institute (2016).
3. ACI Committee 207; ACI 207.1R-96 Mass Concrete; American Concrete Institute (1996).
4. ACI Committee 207; ACI 207.2R-95 Effect of Restraint, Volume change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete; American Concrete Institute (2002).
5. ACI Committee 211; ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009); American Concrete Institute (2009).
6. ACI Committee 301; ACI 301-16 Specifications for Structural Concrete; American Concrete Institute (2016).
7. NCh170-2016, Hormigón – Requisitos generales: INN (2016).
8. John Gajda and Martha Vangeem; Concrete International, V.24, N°1: 58-62 - Controlling Temperatures in Mass Concrete; American Concrete Institute (2002).
9. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées; Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne; LCPC (2017).
10. Montecinos, H.; Hormigones masivos: influencia inhibidora de las adiciones incorporadas al cemento Portland sobre el fenómeno DEF. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil (2012).
11. Tapia, F.J.; Vulnerabilidad de los hormigones masivos frente al fenómeno expansivo por formación de etringita tardía, en función del contenido de puzolana de cementos nacionales; Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil (2015).
12. Parra, F.; Estudio experimental sobre la eficiencia de una ceniza volante como adición inhibidora del fenómeno expansivo por formación de etringita retardada (DEF) en el hormigón; Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil (2015).
13. Carrillo, E.; Evaluación del efecto de la temperatura y del tiempo de fraguado en la resistencia estimada del hormigón mediante madurez; Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería (2011).

## ANEXO 1 • ENSAYO DE COMPORTAMIENTO PARA FED

En este tratamiento, el hormigón sujeto de análisis es curado de forma acelerada, induciendo altas temperaturas a edades tempranas, con el objeto de transformar la etringita en monosulfato incorporado en los compuestos hidratados C-S-H y otros. Posteriormente se aplican ciclos de humedecimiento - secado, con el fin de facilitar el microfisuramiento al interior de las probetas, y de esta forma se active el fenómeno expansivo FED en el hormigón endurecido.

Este tratamiento corresponde al método LCPC66, que es similar al especificado en el método Duggan.

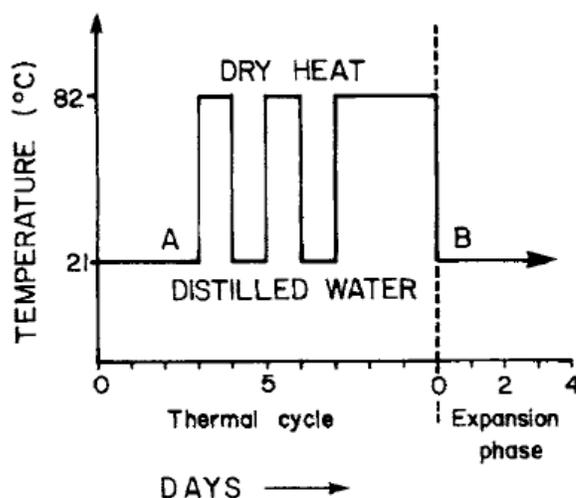


Figura A1.1. Ciclos de humedecimiento Secado (Grabowski, Czarnecki, Gillot, Duggan, & Scott, 1992).

El ensayo comprende cuatro etapas:

- Fabricación del hormigón
- Tratamiento térmico que simula el calentamiento del hormigón (como máximo hasta 85°C)
- Ciclos de humedad - secado
- Inmersión definitiva en agua para realizar mediciones de expansión longitudinal en el tiempo

Interpretación de resultados

Se debe registrar como mínimo:

- Registro de la temperatura de inmersión
- Registro de variaciones de longitud (expansión) en el tiempo, para cada probeta
- Gráfico con expansión individual y promedio de las tres probetas en el tiempo de inmersión

Criterio de aceptación (LCPC N°66)

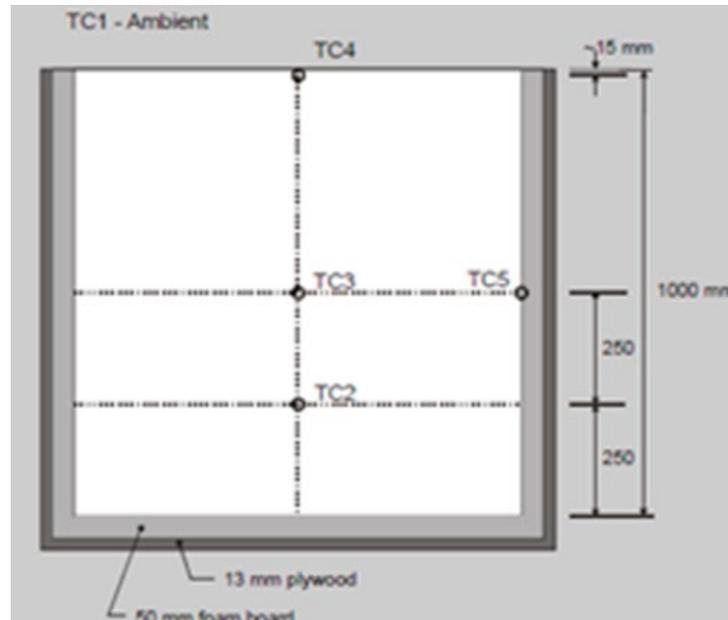
La expansión longitudinal media debe ser  $\leq 0,04\%$  y cada valor individual  $\leq 0,06\%$  a los 12 meses y que la variación mensual de expansión longitudinal media medida a partir del tercer mes sea  $\leq 0,004\%$ .

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

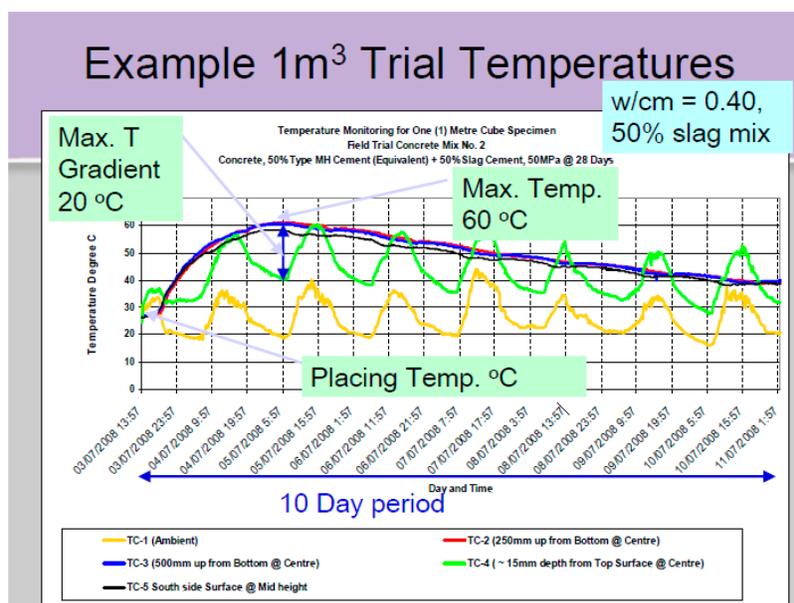
1. ACI Committee 116; ACI 116R: 2000 (R2005) Cement and Concrete Terminology American Concrete Institute (2000).
2. ACI Committee 201; ACI 201.2 R-16 Guide to Durable Concrete; American Concrete Institute (2016).
3. ACI Committee 207; ACI 207.1R-96 Mass Concrete; American Concrete Institute (1996).
4. ACI Committee 207; ACI 207.2R-95 Effect of Restraint, Volume change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete; American Concrete Institute (2002).
5. ACI Committee 211; ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009); American Concrete Institute (2009).
6. ACI Committee 301; ACI 301-16 Specifications for Structural Concrete; American Concrete Institute (2016).
7. NCh170-2016, Hormigón – Requisitos generales: INN (2016).
8. John Gajda and Martha Vangeem; Concrete International, V.24, N°1: 58-62 - Controlling Temperatures in Mass Concrete; American Concrete Institute (2002).
9. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées; Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne; LCPC (2017).
10. Montecinos, H.; Hormigones masivos: influencia inhibidora de las adiciones incorporadas al cemento Portland sobre el fenómeno DEF. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil (2012).
11. Tapia, F.J.; Vulnerabilidad de los hormigones masivos frente al fenómeno expansivo por formación de etringita tardía, en función del contenido de puzolana de cementos nacionales; Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil (2015).
12. Parra, F.; Estudio experimental sobre la eficiencia de una ceniza volante como adición inhibidora del fenómeno expansivo por formación de etringita retardada (DEF) en el hormigón; Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil (2015).
13. Carrillo, E.; Evaluación del efecto de la temperatura y del tiempo de fraguado en la resistencia estimada del hormigón mediante madurez; Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería (2011).

# ANEXO 2 • ENSAYO DE APTITUD IN SITU (MAQUETA) PARA SELECCIONAR LA MEZCLA ADECUADA, REPRESENTATIVA DEL ELEMENTO DE HORMIGÓN MASIVO A EJECUTAR

Probeta confeccionada in situ con el cemento y el diseño de mezcla de hormigón a emplear en la obra:



Ejemplo de registro de temperaturas y verificación de los requisitos:



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Doug Hooton, John A. Bickley; Design for durability: The key to improving concrete sustainability; Construction and Building Materials 67 (2014).
2. Tia M., Lawrence A., Do T. A., Verdugo D., Han S., Almarshoud M.; Maximun heat of mass concrete – Phase 2; FDOT Proyect No: BDV31-977-07, University of Florida, College of Engineering (2016).

## ANEXO 3 • CÁLCULO DEL ÍNDICE DEF (FED)

Considerando varios de los componentes que se han mencionado como influyentes en mayor o menor medida en el fenómeno expansivo DEF, Zhang et al el año 2002 definió el "Índice DEF". Esta ecuación relaciona algunos componentes con potencial expansivo y entrega un valor que da una idea del potencial riesgo que tiene un hormigón de sufrir expansión por el fenómeno DEF conocido el tipo de cemento usado. La ecuación que define el "Índice DEF" se muestra a continuación (Zhang et al 2002).

Índice DEF

$$\text{Índice DEF} = \left( \frac{SO_3}{Al_2O_3} \right)_m \times \left[ \frac{(SO_3 + C_3A)_W}{10} \right] \times \sqrt{Na_2O_{eq}}$$

Dónde:

$\left( \frac{SO_3}{Al_2O_3} \right)_m$ : Razón molar  $SO_3/Al_2O_3$ .

$(SO_3 + C_3A)_W$ : Es el peso (en porcentaje) combinado entre los contenidos de  $SO_3$  y  $C_3A$ .

$Na_2O_{eq}$ : Es el peso (en porcentaje) del contenidos de  $Na_2O_{eq}$ , correspondiente a los álcalis totales.

El estudio concluye que no se desarrollan expansiones para valores del Índice DEF inferiores a 1,1 mientras que sobre este valor siempre se observan expansiones en los elementos estudiados.

Alternativamente a este método, el Proveedor del hormigón podrá proponer evaluar el calor de hidratación como forma de validar la equivalencia del nuevo clinker con aquél ya aprobado para el proyecto

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Montecinos, H.; Hormigones masivos: influencia inhibidora de las adiciones incorporadas al cemento Portland sobre el fenómeno DEF. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil (2012).
2. Zhaozhou Zhang, Jan Olek, Sidney Diamond, Studies on delayed ettringite formation in heat-cured mortars II. Characteristics of cement that may be susceptible to DEF, Cement and Concrete Research 32, 2002.

## ANEXO 4 • MÉTODOS PARA ESTIMAR EL AUMENTO DE TEMPERATURA EN CONDICIÓN ADIABÁTICA O SEMI-ADIABÁTICA AL INTERIOR DE UN ELEMENTO MASIVO DE HORMIGÓN

Métodos para estimar el aumento de temperatura en condición adiabática o semi-adiabática al interior de un elemento masivo de hormigón

### 1. Desarrollo de temperatura adiabática

Es posible determinar la curva de desarrollo de temperatura adiabática en el tiempo de una mezcla de hormigón mediante el cálculo del incremento adiabático de temperatura, el cual es función del calor específico, contenido de cemento, calor de hidratación y densidad de la mezcla.

La expresión que permite calcular el incremento de temperatura adiabática en el tiempo es la siguiente:

$$\Delta T_{ad}(t) = \frac{C \cdot q_c(t)}{c_{e,h} \cdot \rho}$$

Donde:

$\Delta T_{ad}(t)$ : incremento adiabático de temperatura en el tiempo, en °C.

$c_{e,h}$ : calor específico del hormigón, en kJ/kg/°C.

C: contenido de cemento, en kg/m<sup>3</sup>.

$\rho_h$ : densidad húmeda del hormigón, en kg/m<sup>3</sup>.

$q_c(t)$ : calor de hidratación del cemento en el tiempo, en kJ/kg.

De esta forma es posible calcular el desarrollo de temperatura adiabática en el tiempo de un elemento de hormigón como sigue:

$$T_{ad}(t) = T_i + \Delta T_{ad}(t)$$

Donde:

$T_i$ : temperatura de colocación del hormigón, en °C.

## 2. Método PCA

La Portland Cement Association (PCA), en su texto “Diseño y Control de Mezclas de Hormigón” [1], entrega un método rápido y simple para estimar la temperatura máxima, en condiciones adiabáticas, que se alcanza al interior de elementos masivos de hormigón.

El método PCA asume un aumento de **12°C** por sobre la temperatura de colocación, por cada **100 kg** de cemento Portland tipo I (sin adiciones) que contempla la mezcla.

La aplicación del método está especificada para mezclas de hormigón que contienen entre **300 y 600 kg/m<sup>3</sup>** de cemento, y para elementos masivos con una dimensión mínima de **1,8 m**.

El comité 207 de la ACI propone complementar este método considerando que el calor contribuido por los materiales cementicios suplementarios (SCMs por sus siglas en inglés) corresponde al 50% del calor generado por el peso equivalente en cemento Portland tipo I. En otras palabras, el método permite calcular la máxima temperatura que alcanza el interior de un elemento masivo de hormigón, en condición adiabática, según la siguiente expresión:

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

Donde:

$T_i$ : temperatura de colocación del hormigón, en °C.

$W_c$ : contenido de cemento Portland tipo I en la mezcla, en kg/m<sup>3</sup>.

$W_{SCM}$ : contenido de materiales cementicios suplementarios en la mezcla, en kg/m<sup>3</sup>.

Limitaciones del método:

- No entrega un desarrollo de temperatura en el tiempo.
- No permite determinar el momento en que se alcanza la máxima temperatura en el elemento.
- No permite cuantificar diferenciales de temperatura entre distintos puntos del elemento.

### 3. Método gráfico ACI 207

El comité 207 del American Concrete Institute (ACI), en su reporte técnico sobre los efectos de fisuración que generan las variaciones térmicas y de volumen en hormigón masivo [2], entrega un método predictivo de desarrollo de temperatura al interior de elementos masivos de hormigón, basado en ábacos y ecuaciones determinados de forma empírica (de ahí su denominación de “método Gráfico”). Ver Figura 1.

El método Gráfico de la ACI permite ajustes según el tamaño del elemento, condiciones de exposición, tipo de cemento, temperatura de colocación, y uso de adiciones. El método considera una condición semi-adiabática.

La metodología de evaluación se basa en ábacos resultantes de desarrollos experimentales en los que se caracterizó el comportamiento térmico de un hormigón con un contenido de 223 kg/m<sup>3</sup> de cemento ASTM tipo I, con una superficie específica de 1.800 cm<sup>2</sup>/gr, y con un coeficiente de difusión térmica de 0,11 m<sup>2</sup>/día.

El resultado final que entrega el método es la temperatura máxima alcanzada al interior del elemento, el tiempo al que ésta es alcanzada y, de conocer la temperatura ambiente del lugar, estima el diferencial de temperatura entre el núcleo del elemento donde se desarrolla la temperatura máxima y la superficie del elemento que se encuentra expuesta a las condiciones ambientales.

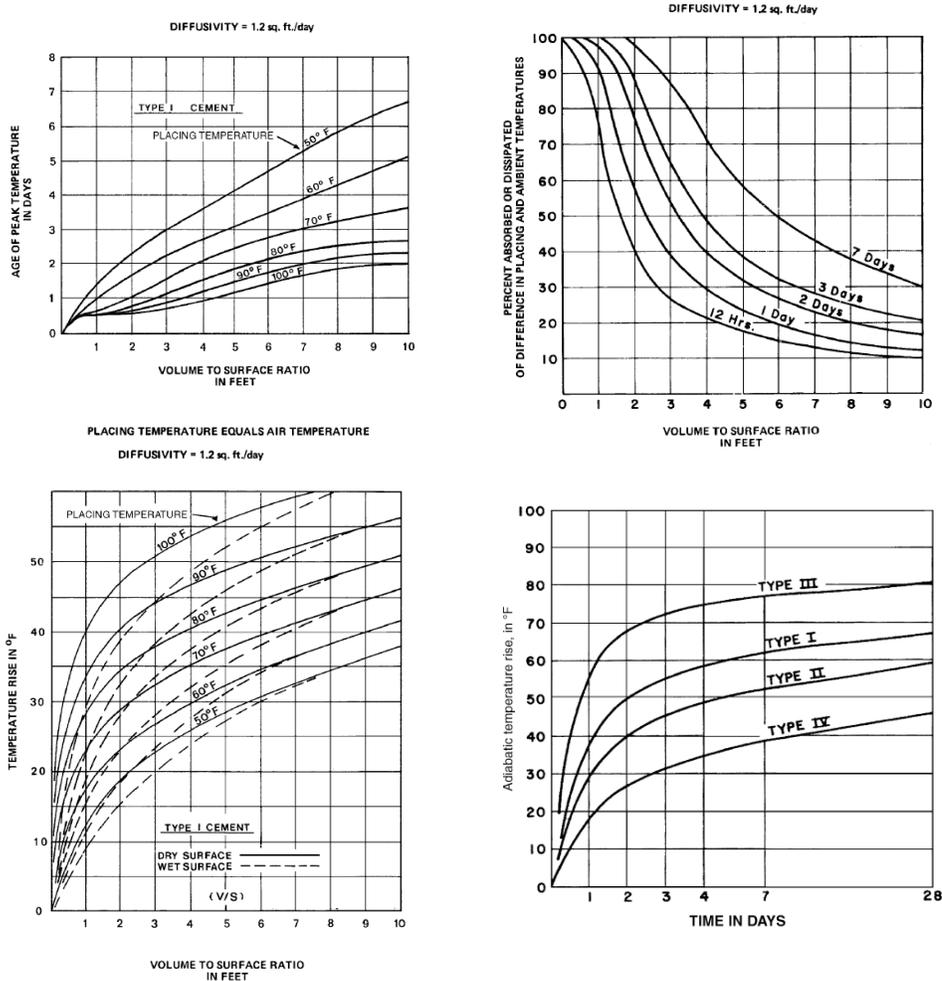


Figura 1: ábacos empleados en el método gráfico del comité ACI 207 [1]

Limitaciones del método:

- La interpretación de los ábacos es de baja precisión.
- El método considera sólo cementos clasificados según ASTM C150, por lo que al evaluar un cemento que se encuentre fuera de ella se debe determinar su equivalente según esa clasificación.
- Método no considera interacción entre el elemento de hormigón y el medio en el que se encuentra (radiación, convección aire-hormigón, etc.).

#### 4. Método de Schmidt

Este método corresponde a un método simplificado de diferencias finitas, donde las temperaturas son calculadas para nodos discretos predefinidos en pasos de tiempo discretos. El paso de tiempo se determina como sigue:

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

Donde:

$\alpha$ : coeficiente de difusión térmica, en  $m^2/seg$ .

$\Delta t$ : paso de tiempo utilizado, en seg.

$\Delta x$ : espaciamiento entre nodos, en m.

De acuerdo al comité 207 de la ACI, el método de Schmidt se basa en el teorema de que, si el elemento en cuestión se divide en un número de elementos iguales, y si una serie de limitaciones físicas se satisfacen simultáneamente, entonces la temperatura para un incremento dado al final de un intervalo de tiempo es el promedio entre las temperaturas de dos elementos vecinos al inicio de ese intervalo. En términos matemáticos, si se consideran  $\theta_p$ ,  $\theta_q$  y  $\theta_r$  como las temperaturas de tres elementos sucesivos en el tiempo  $t$ , entonces al tiempo  $t+\Delta t$  se tiene:

$$\theta_q + \Delta\theta_q = \frac{\theta_p + \theta_r}{2}$$

El método de Schmidt es adaptable tanto a casos de estudio en 1, 2 y hasta 3-dimensiones, y se puede emplear para el estudio de estructuras masivas complejas, teniendo el alcance para evaluar la geometría del elemento, el comportamiento no lineal del hormigón, la interacción de la estructura con su fundación, relleno o cualquier material, los efectos de la secuencias constructiva, gradientes térmicos, incorporación de aislación, y fuerzas gravitacionales y superficiales [1].

Para determinar la temperatura en cada nodo se emplea el desarrollo de temperatura adiabática en el tiempo del cemento en base a sus resultados de calorimetría. De esta forma, en cada paso de tiempo  $\Delta t_i$  la temperatura en un nodo se calcula como el promedio de las temperaturas de los nodos vecinos en el paso de tiempo anterior ( $\Delta t_{(i-1)}$ ), sumado al desarrollo de temperatura adiabática en el paso de tiempo actual ( $\Delta t_i$ ).

Para mayores detalles sobre la aplicación de este método y ejemplos demostrativos, referirse al documento ACI 207.2R-07 [2].

El método considera una condición semi-adiabática.

### Limitaciones del método:

- La definición de las condiciones de borde al aplicar el método pueden resultar determinantes para los resultados obtenidos.
- Existe una complejidad asociada a la aplicación del método, ya que se requiere programar un cálculo iterativo para dar con las curvas de temperatura resultantes.

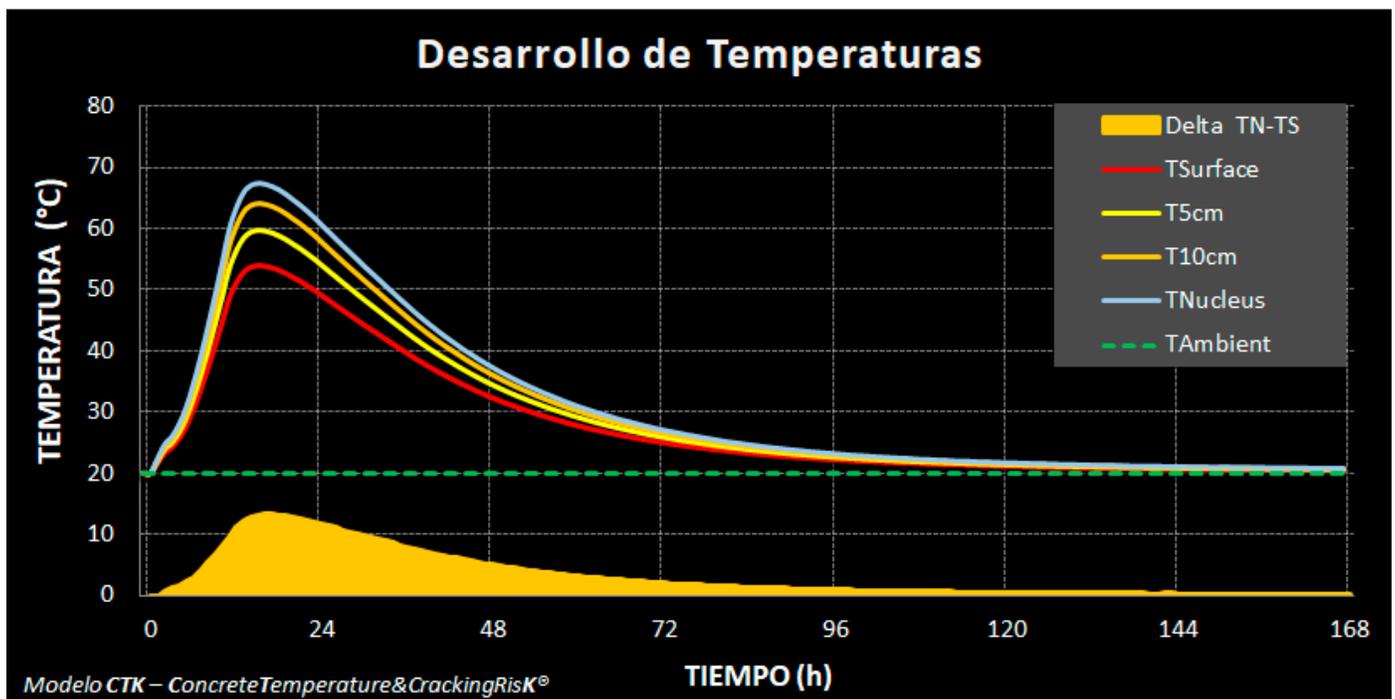
### 5. Modelo CTK-Concrete Temperature&Cracking Risk®

#### a. Desarrollo de Temperaturas

Este Modelo permite determinar el Desarrollo de Temperaturas en una estructura de hormigón, durante los primeros 7 días posteriores a la colocación, en función de las propiedades y contenido de cemento, propiedades térmicas, geometría del elemento, características de aislación y protección, condiciones de borde como temperatura del hormigón fresco y condiciones ambientales como temperatura, humedad y viento, y finalmente tipo de curado y medidas de protección del hormigón.

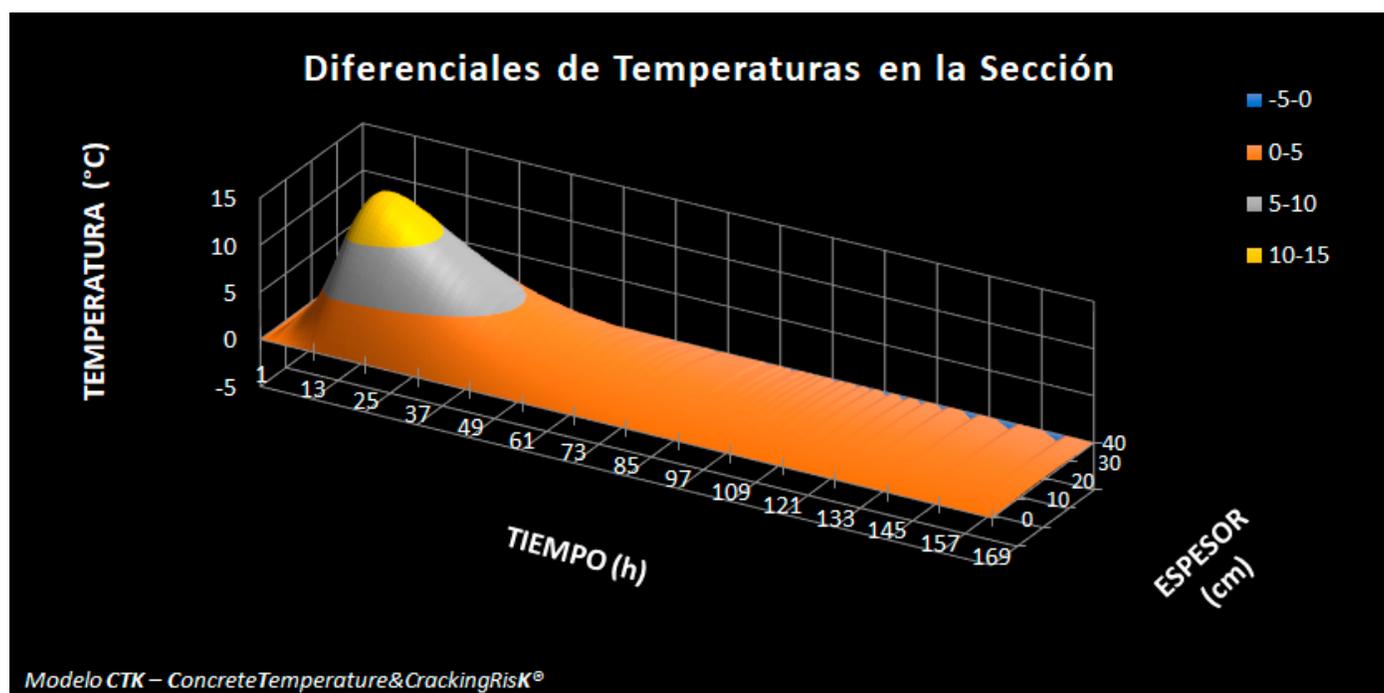
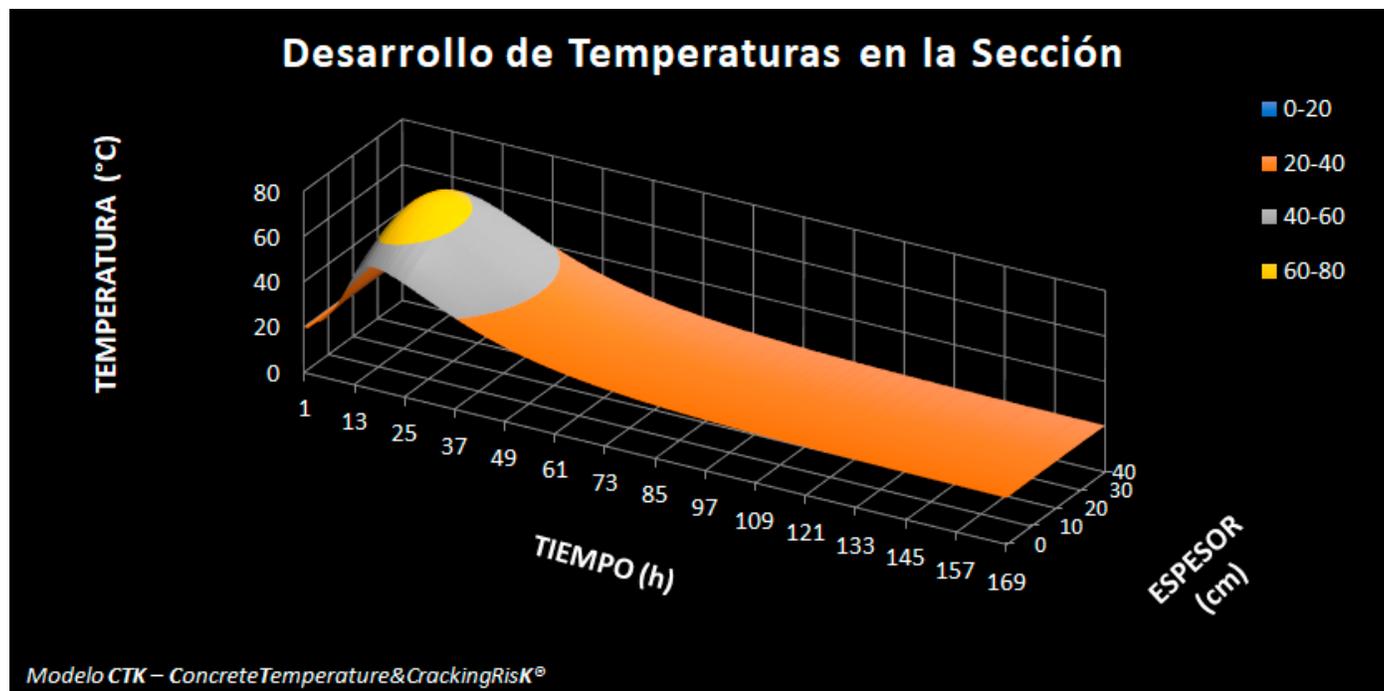
El **Modelo CTK** [3] [4] fue evaluado experimentalmente en una Tesis de Grado [5], donde presentó un 2% de desviación respecto de la temperatura máxima  $T_{max}$  alcanzada experimentalmente, y una desviación de 20% respecto del tiempo de ocurrencia de esta temperatura.

Este modelo, a través de un análisis uni-dimensional, determina mediante el estudio de la curva de Calor de Hidratación del cemento, las temperaturas esperadas en una sección. Para ello considera un Índice de Enfriamiento que depende de las propiedades térmicas del hormigón, como Calor Específico, Conductividad, Difusividad y Coeficiente de Transferencia de Calor. Se determina la curva de Calor Adiabático, la del Núcleo y la Superficial y a distintas profundidades según requerimiento.



Un análisis tridimensional de la información permite visualizar el estado de temperaturas durante los primeros 7 días en cualquier punto de la sección, y en especial el diferencial de temperaturas interno que ocurre en las primeras horas entre el núcleo y la superficie del hormigón.

El método considera una condición semi-adiabática.



## b. Riesgo de Agrietamiento a Temprana Edad

Este Modelo permite a partir del Desarrollo de Temperaturas calculado en la Parte a realizar una estimación del Riesgo de Agrietamiento a Temprana Edad. Para ello considera adicionalmente el desarrollo de las propiedades mecánicas del hormigón, como resistencias a la Compresión y Tracción junto al Módulo de Elasticidad, las propiedades visco-elásticas del hormigón, como la Relajación de Tensiones por efecto de la Fluencia, y el Grado de Restricción externo del elemento.

Adicional a las deformaciones térmicas, incorpora aquellas debido a la Retracción Química/Autógena y por Secado. Las tensiones estimadas para un Grado de Restricción dado son comparadas con la capacidad admisible de tracción del hormigón, determinando así el Riesgo de Agrietamiento y la profundidad de las grietas que pueden producirse en la altura de un elemento.

Conceptualmente, la expresión siguiente contienen la totalidad de los efectos indicados, todos variables en el tiempo, y que hacen posible realizar una estimación de tensiones en el tiempo t:

$$\sigma_t = (\epsilon_{as_t} + \epsilon_{T_t} + \epsilon_{S_t}) * E_t * \psi_t * \gamma_R$$

Dónde:

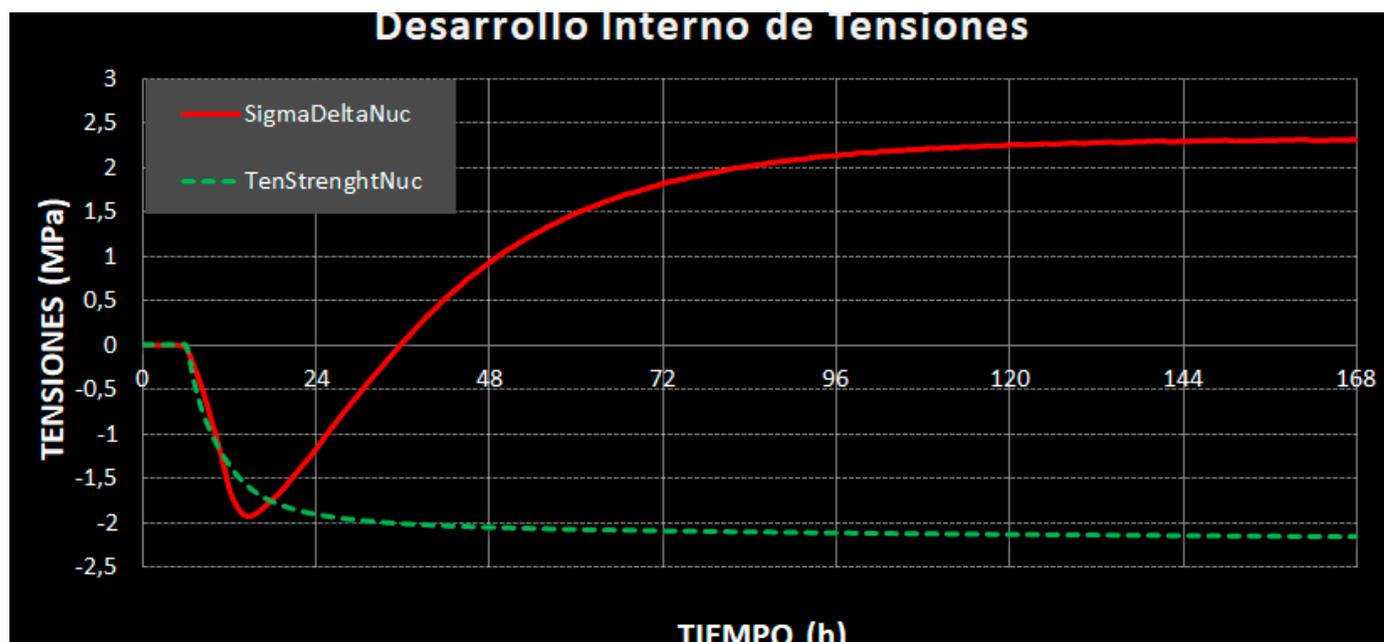
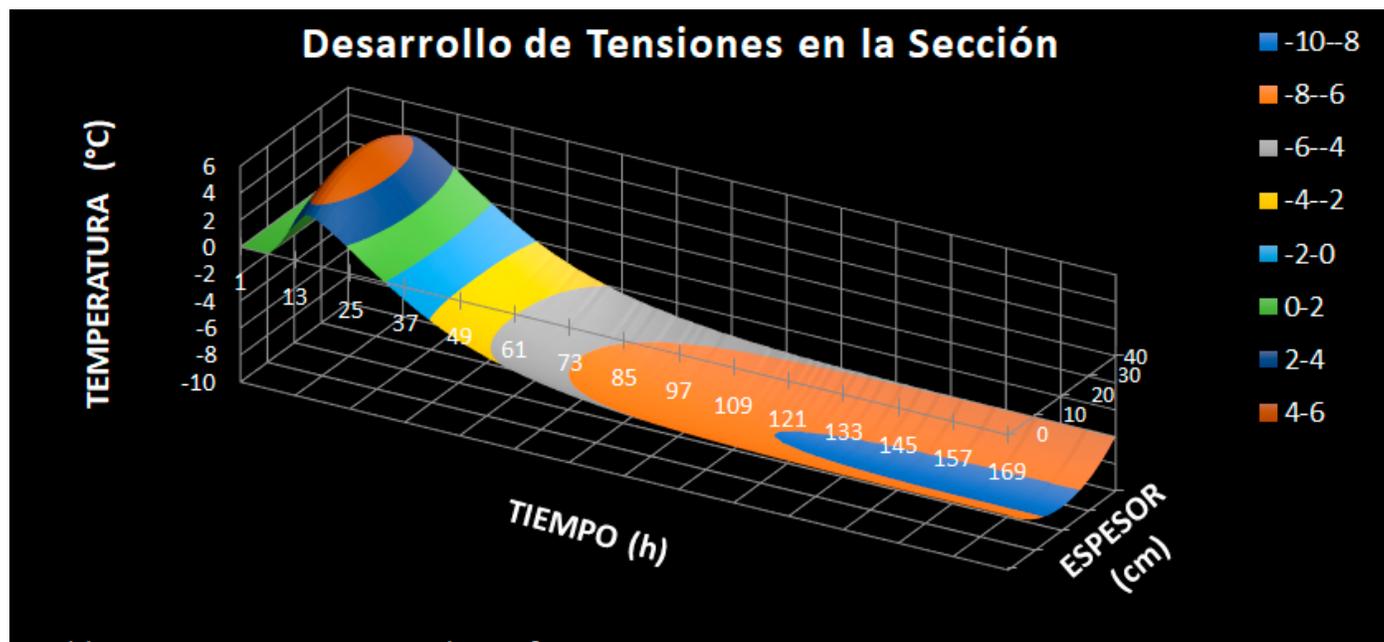
$\sigma$	= Tensión de Tracción en el hormigón	[MPa]
$\epsilon_{as}$	= Retracción Autógena esperada	[ $\mu s$ ]
$\epsilon_T$	= Retracción Térmica esperada	[ $\mu s$ ]
$\epsilon_S$	= Retracción Hidráulica esperada	[ $\mu s$ ]
$E$	= Módulo de Elasticidad del hormigón	[MPa]
$\Psi$	= Función de Relajación de Tensiones del hormigón	[-]
$\gamma_R$	= Grado de Restricción del elemento	[-]

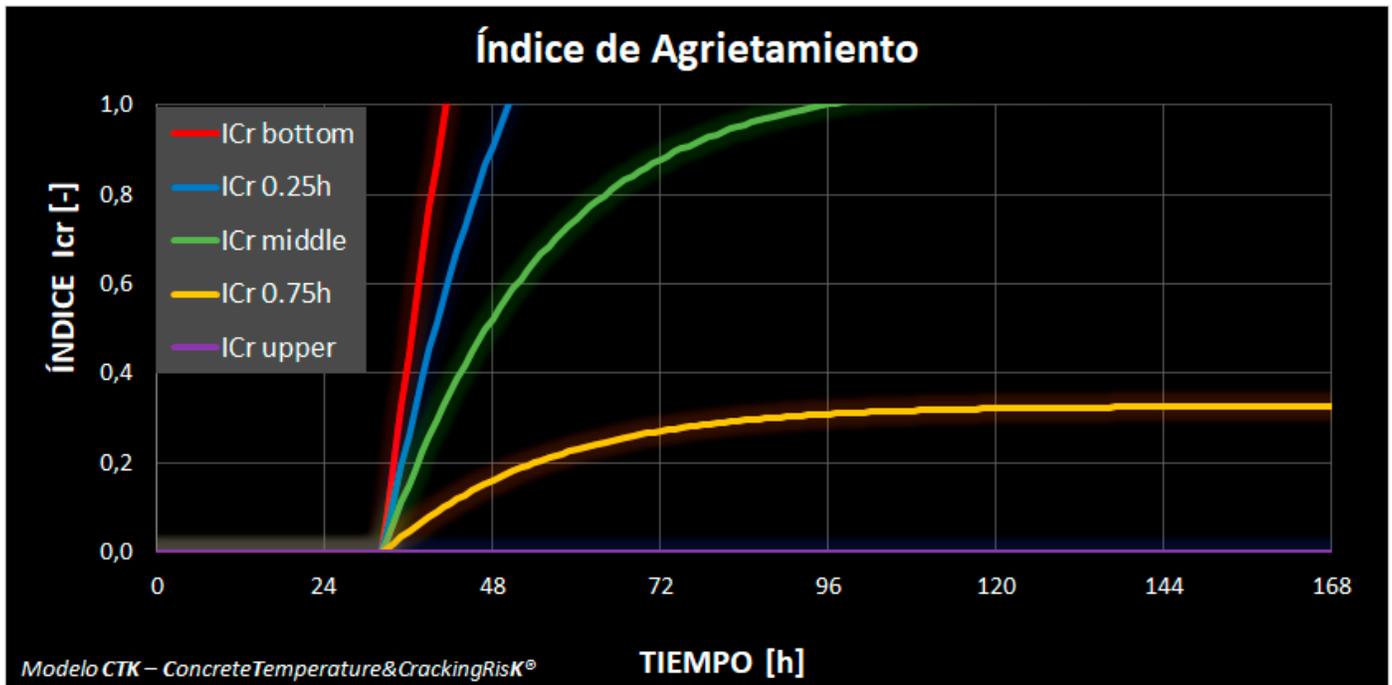
Al momento que las Tensiones de Tracción  $\sigma_t$  sobrepasan el desarrollo de la Resistencia a la Tracción  $f'_t$  del hormigón, ocurre el Agrietamiento en el hormigón: la grieta traspasa completamente la sección de lado a lado. A su vez se define el Índice de Agrietamiento  $I_{Cr}$ , que indica la altura hasta la cual se formará la grieta:

$$si \sigma_t > f'_t \rightarrow \text{Arietamiento} \quad I_{Cr} = \frac{\sigma_t}{f'_t}$$

Un análisis tridimensional de la información permite visualizar el estado de tensiones durante los primeros 7 días en cualquier punto de la sección, y en especial el momento en que ocurre la primera grieta, y si ocurre agrietamiento interno. Limitaciones del método:

Para aumentar la precisión del método es necesario realizar una caracterización completa de los materiales componentes de la mezcla de hormigón.





### 3. Resumen de métodos

A modo de resumen, la Tabla 1. muestra los parámetros de entrada que cada método requiere para su evaluación. Además, la Tabla 2 . muestra los tipos de parámetros que cada uno de los métodos entrega como resultado.

Dado que el desarrollo de temperatura adiabática (Método 1) se emplea como parámetro de entrada en otros métodos (Schmidt y CTK), se deja fuera de las tablas de resumen.

Tabla 1: parámetros de entrada necesarios para evaluar cada método [5]

Método predictivo	Contenido de cemento	Contenido de SCM	Temperatura de colocación	Tipo de cemento	Dimensiones del elemento	Condiciones de borde	Temperatura ambiente	Parámetros térmicos del hormigón	Calor de hidratación del cemento	Desarrollo de temperatura adiabática	Interacción con el medio
PCA	✓	✓	✓								
Gráfico	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Schmidt	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CTK	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 2: parámetros de interés que estima cada método [5]

Método predictivo	Desarrollo de temperatura en el núcleo	Desarrollo del diferencial de temperatura	Temperatura máxima en el núcleo	Tiempo al que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo	Diferencial máximo de temperatura	Tiempo al que se alcanza el diferencial máximo de temperatura
PCA*			✓			
Gráfico			✓	✓		
Schmidt	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CTK	✓	✓	✓	✓	✓	✓

\*: Determina Temperatura Adiabática

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Kosmatka, S. & Wilson M.; “Design and Control of Concrete Mixtures”; Portland Cement Association (2011).

[2] ACI Committee 207; “ACI 207.2R: Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete”; American Concrete Institute (2007).

[3] Ebersperger, L. et al.; “Thermal Cracking of Massive Concrete Structures”, Chapter 8, Cracking Risk and Regulations, RILEM Star Report Technical Committee 254-CMS, Ed. by E. Fairbairn & M. Azenha, Chapter 8 (2018).

[4] Ebersperger, L.; “A simplified 1D Stress Approach for Cracking Risk Prediction”; SynerCrete’18 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete; Madeira, Portugal (2018).

[5] Lara, D.; “Evaluación de Métodos Predictivos del Comportamiento Térmico de Elementos Masivos de Hormigón Confeccionados con Cementos de Origen Nacional”; Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil (2018).