

## ANÁLISIS DE FISURACIÓN EN HORMIGÓN POR CALOR DE HIDRATACIÓN

### CRACKING ANALYSIS IN CONCRETE DUE TO THE HEAT OF HYDRATION

Felipe Lopez Rivarola<sup>a,b</sup>, Nicolás Alscher<sup>a,b</sup>, Jorge Laiun<sup>a,b</sup> y Pedro Fernandez<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> *Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. INTECIN. (UBA-CONICET). [flopez@fi.uba.ar](mailto:flopez@fi.uba.ar)*

<sup>b</sup> *SRK Consulting (Argentina), Chile 300, CABA, [latam.srk.com](http://latam.srk.com)*

**Palabras clave:** Hormigón, Fisuración, Temperatura, FEM.

**Resumen.** Durante el fraguado del hormigón se desarrollan tensiones de tracción debido a: la evolución no homogénea de la temperatura, la contracción por secado no uniforme y las restricciones por el proceso constructivo. Si estas tracciones superan la resistencia a la tracción del hormigón, este se fisurará. Asimismo, las propiedades del hormigón varían con el tiempo. Por lo tanto, para poder modelar estos procesos es necesario utilizar un modelo numérico que acople la temperatura con la deformación, y utilizar un modelo material que cuente con deformación diferida, así como la capacidad de modelar fisuras. En el presente trabajo se describe un estudio de fisuración por origen térmico y reológico del hormigón del conducto bypass de una planta de pretratamiento de líquidos cloacales. Para resolver el problema termo-mecánico se elaboró un modelo 3D en el software de elementos finitos LUSAS Civil Structural Plus. Los resultados fueron contrastados con un modelo físico-térmico a escala reducida y con mediciones luego de la construcción.

**Keywords:** Concrete, Cracking, Temperature, FEM.

**Abstract.** During the setting of the concrete, tensile stresses develop due to: the non-homogeneous evolution of temperature, the non-uniform drying, and the restrictions of the construction process. If these stresses exceed the tensile strength of the concrete, it will crack. Additionally, the properties of concrete vary with time. Therefore, to model these processes, it is necessary to use a numerical model that couples temperature with deformation, and to use a material model that has creep, as well as the ability to model cracks. In the present work, cracking due to thermal and rheological origin of the concrete of the bypass channel of a sewage liquid pretreatment plant is studied. To solve the thermo-mechanical problem a 3D model was created in the LUSAS Civil Structural Plus finite element software. The results were contrasted with a physical-thermal model on a reduced scale with measurements after construction.

## 1 INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de hidratación del cemento, se producen reacciones químicas exotérmicas que generan un aumento de la temperatura en la masa de hormigón. Estos cambios de temperatura provocan deformaciones volumétricas que, si son impedidas, generan tensiones que pueden fisurar el material.

Existen dos tipos de restricciones: las internas y las externas. Por un lado, las superficies expuestas del elemento hormigonado experimentan un enfriamiento prematuro y su contracción se ve impedida por el núcleo del elemento, que aún se encuentra caliente. Esta situación se conoce como restricción interna a la contracción. Por otro lado, el contacto del elemento hormigonado con el terreno u otro elemento endurecido, constituye una restricción externa a la deformación. Cuando la temperatura en la masa del hormigón disminuye y esta quiere contraerse, la fricción en el contacto lo impide provocando tensiones de tracción.

La evolución de la temperatura, rigidez y resistencia a la tracción del hormigón a lo largo del tiempo, junto con las restricciones a las que se encuentra sometida la pieza, definen el estado tensional y las posibles fisuras que puedan ocasionarse en esta.

En este trabajo se describe un estudio de fisuración por origen térmico y reológico del hormigón asociado a un conducto rectangular. Los resultados fueron comparados con un modelo físico efectuado a escala reducida y con mediciones luego de la construcción.

## 2 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

### 2.1 Características del modelo

Para resolver el problema termo-mecánico se elaboró un modelo tridimensional en el software de elementos finitos LUSAS Civil & Structural Plus. El conducto de hormigón tiene, entre juntas, una longitud de 12.0m, un ancho total de 5.0m, una altura de 4.2m y 0.5m de espesor (Figura 1).

La malla de elementos finitos tiene un total de 33044 elementos volumétricos lineales hexaédricos.

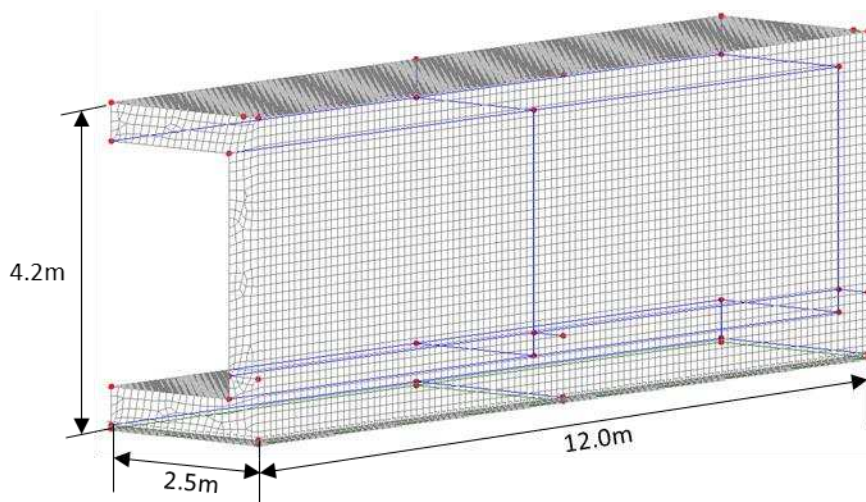


Figura 1: Malla de elementos finitos.

## 2.2 Etapas de construcción

Las etapas modeladas son:

- Activación de la solera;
- Hidratación de la solera. Duración: 3 días (0 a 3). Paso temporal: 0.05 días;
- Endurecimiento de solera. Duración: 7 días (3 a 10). Paso temporal: 0.2 días;
- Activación del tabique y losa de techo
- Hidratación del tabique y losa de techo. Duración: 3 días (10 a 13). Paso temporal: 0.01 a 0.05 días.
- Endurecimiento del tabique y losa de techo. Duración: 5 días (13 a 17). Paso temporal: 0.05 a 0.2 días.
- Activación del peso del suelo sobre la losa de techo y análisis a largo plazo. Duración: 1883 días (17 a 1900). Paso temporal: 0.5 a 100 días.

## 2.3 Modelo térmico

Para cuantificar el calor de hidratación generado por la hidratación del hormigón se utiliza el modelo de Schindler and Folliard [2005]. Los parámetros adoptados son:

- Conductividad térmica:  $2.0 \text{ J}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$ ,
- Capacidad calorífica:  $1000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ,
- Densidad:  $2400 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,
- Masa de cemento por unidad de volumen:  $380 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,
- Relación agua cemento: 0.44,
- Tipo de cemento (ver apartado 2.5).

## 2.4 Condiciones de borde térmicas

Las condiciones de borde térmicas son::

- Temperatura ambiente: Los primeros 30 días,  $30^\circ\text{C}$ . Posteriormente, una variación lineal hasta  $10^\circ\text{C}$  en el día 180 momento desde el cual se mantiene constante.
- Sobre el plano de simetría se impone una condición de flujo nulo.
- Sobre las caras restantes, una condición de transmisión por convección según Tabla 1.

Interfaz	Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]	Trasmisancia [ $\text{J}/\text{m}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}$ ]
Aire (contorno interno y superior)	$30^\circ\text{C}$ a $10^\circ\text{C}$	8.5
Suelo (contorno inferior)	$30^\circ\text{C}$ a $10^\circ\text{C}$	2.7
Encofrado (contorno externo de muro)	$30^\circ\text{C}$ a $10^\circ\text{C}$	7.0

Tabla 1: Condiciones de contorno para el modelo térmico

## 2.5 Modelo material de calor de hidratación

Se evaluaron tres variantes, cemento Tipo I (CPN: Cemento Portland Normal), cemento Tipo V (ARS: Alta Resistencia a los Sulfatos), y un cemento denominado Tipo A que tiene en cuenta la composición utilizada en la obra. En este último se utilizaron los valores promedio de la composición potencial del clínker empleado en la fabricación del Cemento Pórtland CPARS40 (Olavarría) provista por la planta hormigonera.

Tipo	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	FreeCaO	SO <sub>3</sub>	MgO
I	0.565	0.140	0.100	0.080	0.029	0.035	0.013
V	0.430	0.360	0.040	0.120	0.004	0.015	0.016
A	0.652	0.150	0.030	0.124	0.010	0.025	0.009

Tabla 2: Fracción (por peso) de los compuestos químicos de los tipos de cemento.

La Figura 2 presenta la evolución del calor generado en función del tiempo para una temperatura de referencia constante. Se observa que el valor máximo de temperatura se alcanza en los primeros días luego de hormigonado, es por esta razón que la discretización temporal ha sido mayor en los primeros días.

Para el caso del cemento Tipo A se trazaron dos curvas, una verde (Tipo A Composición) siguiendo la generación usada en el modelo numérico, y una roja (Tipo A Calor) a partir de los resultados recibidos acerca del calor de hidratación del cemento determinados mediante el método de Langavant (IRAM 1852). Se observa que los valores adoptados en el modelo para el Tipo A presentan una buena aproximación del calor generado, especialmente en los primeros 5 días.

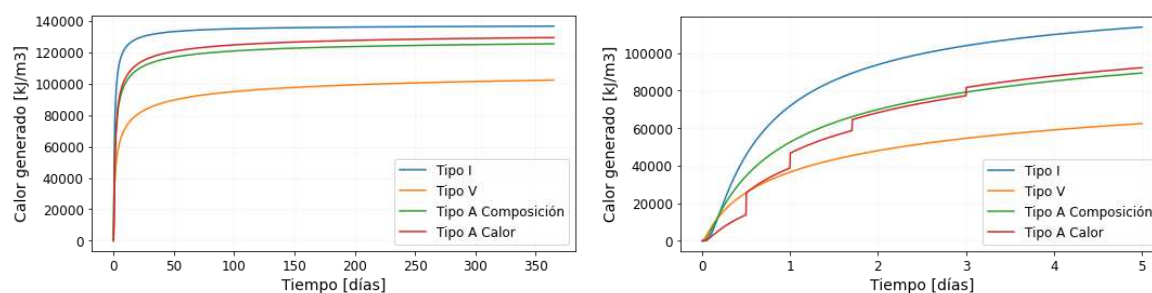


Figura 2: Curvas de calor de hidratación vs tiempo para diferentes tipos de cemento

## 2.6 Modelo material termo-mecánico para hormigón

El modelo constitutivo adoptado para la modelación y análisis del comportamiento del hormigón es el “Smoothed Multi-Crack Concrete Model” (model 109) implementado en LUSAS. Este modelo, desarrollado por Jefferson [Jefferson (2003) y Jefferson (2014)], intenta capturar las distintas complejidades del comportamiento del hormigón. Consiste en un modelo de daño con contacto integrado con plasticidad en un marco termodinámicamente consistente. El modelo acopla daño direccional con plasticidad para simular apertura y cierre de fisuras.

El daño a compresión (crushing) depende fundamentalmente de la resistencia a la compresión, y se simula con plasticidad no asociativa. El modelo tiene en cuenta el aumento de la resistencia por el confinamiento y ablandamiento/endurecimiento friccional.

La función que dicta la evolución del daño a tracción (cracking) está basado en planos de degradación. Este comportamiento está controlado por la resistencia pico a tracción, la energía de fractura, y el tamaño del elemento. La apertura de fisura estimada es función de las deformaciones del material y la longitud característica del elemento.

La ley de creep utilizada se corresponde con la establecida en el EUROCODE 2: EN1992, que sigue una hipótesis de comportamiento lineal y predice el comportamiento promedio. El modelo tiene en cuenta la contracción del hormigón a lo largo del tiempo y la evolución de la resistencia y la rigidez por la edad. La evolución de la resistencia a la tracción en el tiempo se presenta en la Figura 3. El modelo alcanza el valor indicado como valor de entrada a los 28 días.

La Tabla 3 resume los parámetros que permiten caracterizar al material modelado.

Parámetro	Unidad	Valor
Módulo de Young	N/m <sup>2</sup>	28.0E9
Coficiente de Poisson	-	0.2
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	2.4E3
Coficiente de expansión térmica	1/°C	10.0E-6
Resistencia a compresión	N/m <sup>2</sup>	35.0E6
Resistencia a tracción	N/m <sup>2</sup>	2.3E6
Deformación en el pico a compresión	-	2.2E-3
Energía de fractura	J/m <sup>2</sup>	100.0
Clase de cemento	-	Clase N
Humedad relativa	-	50.0
Tamaño nominal	m	0.5

Tabla 3: Modelo hormigón. Parámetros materiales.

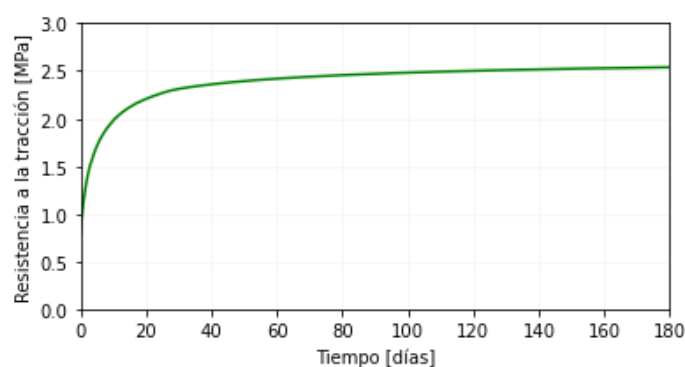


Figura 3: Evolución de la resistencia a la tracción del hormigón en el tiempo

## 2.7 Condiciones de borde mecánicas

- Apoyos en la cara inferior de la solera:
  - Interfaz de contacto: Rígida verticalmente pero no puede tomar cargas de tracción;
  - Interfaz cohesiva: Las reacciones horizontales son como máximo la carga normal por el coeficiente de fricción (se toma conservadoramente 0.50);
- Sobre el eje de simetría: condición de desplazamiento nulo en dirección perpendicular al eje del conducto.

## 3 RESULTADOS OBTENIDOS

### 3.1 Temperatura

La Figura 4 muestra, en un punto representativo, la evolución de la temperatura para los tres tipos de cementos estudiados. Luego del primer año se mantiene la temperatura de toda la estructura en 10°C hasta el día 1900.

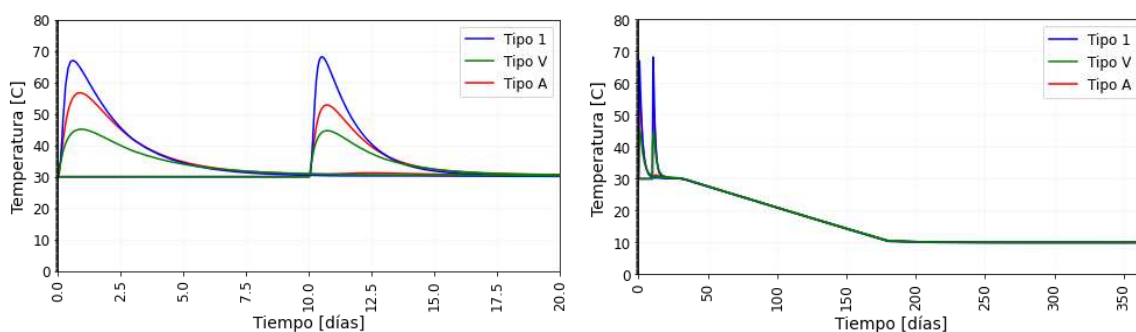


Figura 4: Perfil de temperatura representativo de la solera y el muro. Edad temprana (izq.) y largo plazo (der.).

La Figura 5 presenta, para los primeros 15 días, la evolución de la temperatura en distintos puntos de la sección transversal utilizando el cemento Tipo A. Tomando como valor de referencia el punto B, se obtiene una variación de temperatura máxima a los 10.75 días de 23.17°C.

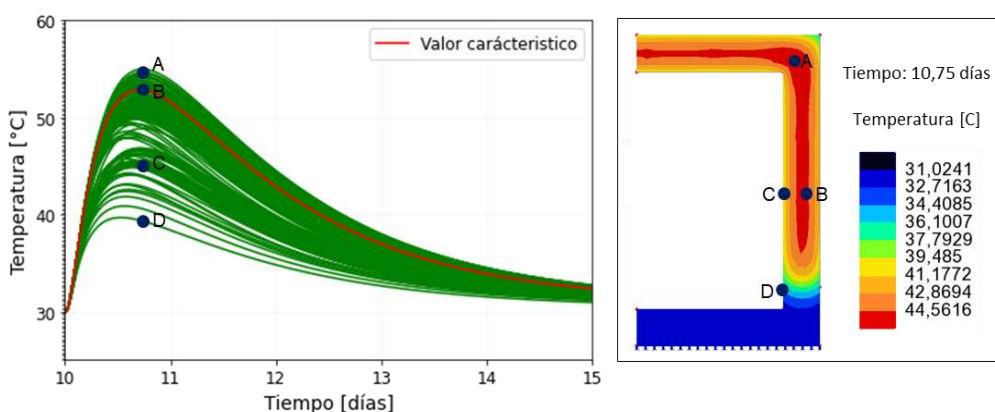


Figura 5: Perfil de temperatura distintos puntos de muro y losa techo. Edad temprana

### 3.2 Esfuerzos internos

Las temperaturas obtenidas se acoplan mediante una expansión mecánica, generando esfuerzos en el hormigón. Como la solera restringe la contracción del muro, en esa zona se generan los mayores esfuerzos de tracción (ver Figura 6). Las tracciones son máximas en los primeros días y luego, por el efecto del creep, disminuyen.

Para el caso del cemento Tipo A, los esfuerzos de tracción no superan la resistencia del hormigón y no se generan fisuras en ningún momento.

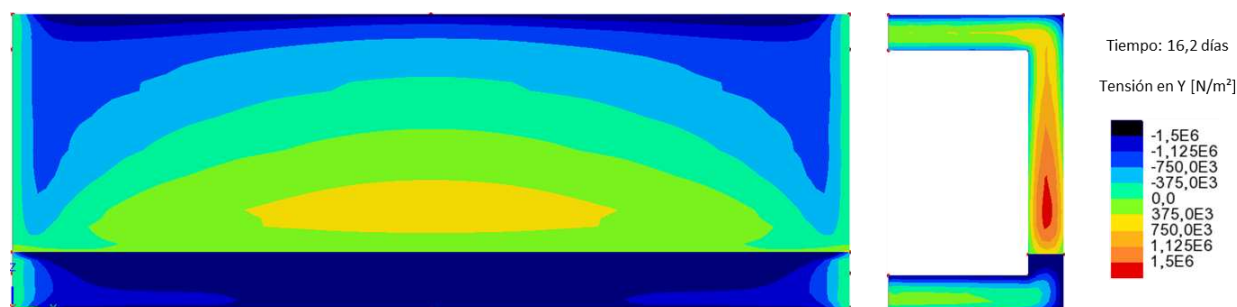


Figura 6: Muro. Tensiones en Y. Edad temprana. Caso cemento tipo A.

Únicamente para describir el comportamiento termo-mecánico de la estructura frente a tensiones que superen la resistencia a tracción del hormigón se presentan los resultados obtenidos para el cemento Tipo I (CPN), donde el daño se localiza generando fisuras principales en el muro (Figura 7). Prácticamente la totalidad de la fisuración se genera en los primeros días, y se debe a que la contracción del muro al enfriarse se encuentra limitada por la solera. Sin embargo, se observa también un aumento en el tamaño de las fisuras por la contracción por secado. Al generarse estas fisuras el material presenta un ablandamiento que disminuye las tracciones producidas, tal como se observa en la Figura 8. Asimismo, se puede notar como la tracción se concentra en la punta de la fisura hasta que se supera la resistencia y se propaga la fisura. Para mayor detalle el lector puede ver “Análisis de Fisuración por Origen Térmico y Shrinkage”, julio 2021, publicado dentro del *Insight* de SRK Consulting.

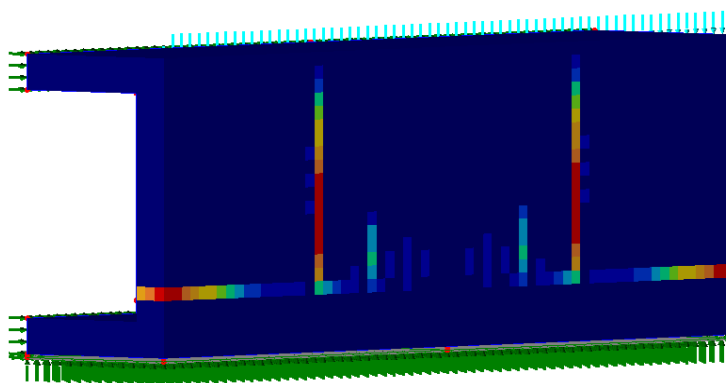


Figura 7: Mapa de fisuras. Tiempo infinito (1900 días). Cemento Tipo I.

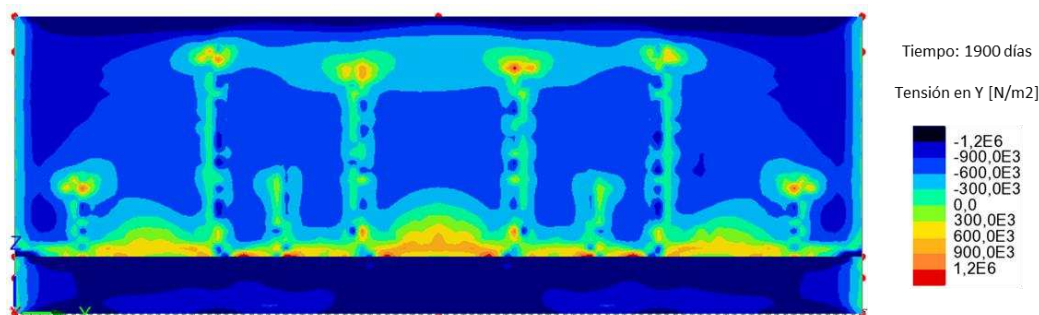


Figura 8: Mapa tensiones. Tiempo infinito (1900 días). Cemento Tipo I.

## 4 VALIDACIÓN DEL MODELO

### 4.1 Descripción del modelo físico

Con el objetivo de validar los resultados del modelo efectuado, se realizó un modelo físico a escala reducida para medir la evolución térmica de un panel de hormigón de 1.50m x 2.0m x 0.50m. Este fue contrastado contra un modelo numérico que se puede ver en la Figura 9.

El cemento empleado fue Loma Negra CPN 50 (Con agregado de escorias de alto horno). Durante el ensayo, las caras del bloque estuvieron encofradas con paneles fenólicos (F) de 25mm de espesor y placas de poliestireno expandido (P) de 0.05m de espesor. En el centro del panel se colocaron 4 termocuplas para el registro regular de temperaturas: a 30 mm, 230mm, 250mm, 470mm.

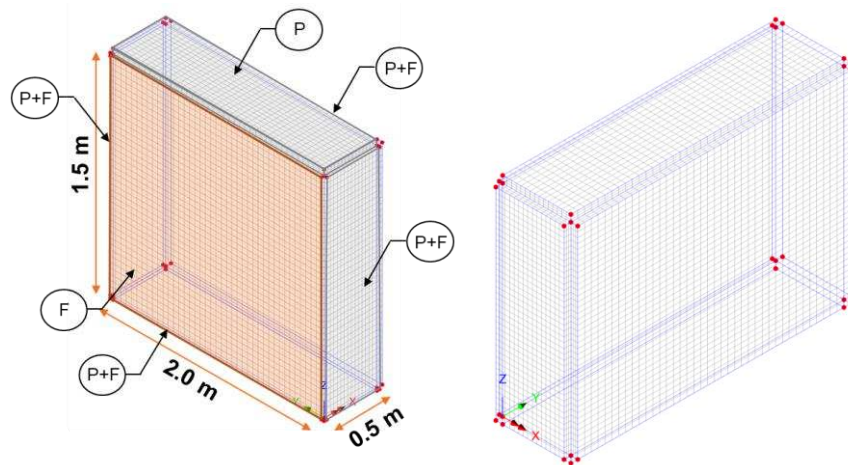


Figura 9: Condiciones de borde (izquierda) y mallado de elementos finitos (derecha)

La Figura 10 muestra el modelo físico en escala reducida. En la Figura 11 se muestra un esquema con la posición de las 4 termocupas ubicadas en el centro del panel (T1 a T4) y la termocupla para medición de temperatura ambiental de referencia (T5).

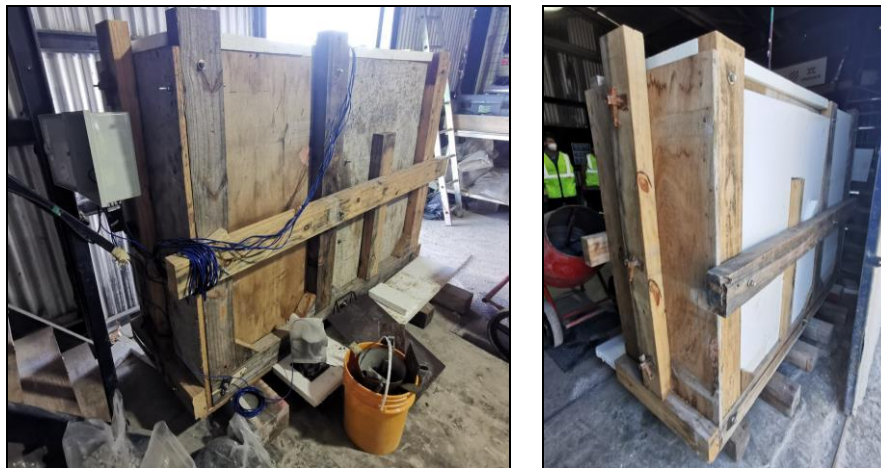


Figura 10: Modelo físico a escala reducida en obrador de la contratista.

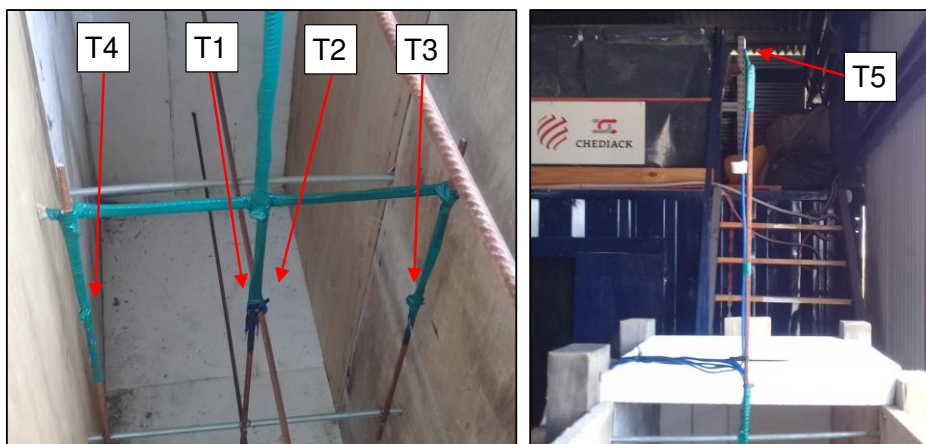


Figura 11: Ubicación de las termocupas en el modelo físico a escala reducida.



## 4.2 Resultados del modelo físico

- La temperatura ambiente osciló entre los 20°C a 27°C, con un valor medio en ~23°C.
- La temperatura del hormigón al momento del colado fue aproximadamente 30°C.
- La temperatura máxima de 61°C fue registrada con la termocupla T2 a las 24hs+/-2hs de finalizado el fragüe del hormigón, siendo el incremento de temperatura máximo en el orden de los 31°C.

## 4.3 Validación del modelo

Para el modelo numérico se utilizaron las características del cemento Tipo A (Ver Capítulo 2). Las condiciones de borde térmicas de cada material se presentan en la Tabla 4. Se consideró una temperatura media ambiente constante de 23°C

Parámetro	Unidad	Madera fenólica	Poliestireno expandido
Conductividad térmica	J/m s C	0.20	0.005
Capacidad calorífica específica	J/kg C	2.3 E 3	1.2 E 3
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	560	30

Tabla 4: Modelo hormigón. Parámetros materiales.

La Figura 12 muestra la evolución de temperatura obtenida en el modelo efectuado en los tres puntos de medición (centro del tabique y caras laterales). Se comparan los resultados con los medidos en esos mismos puntos en el ensayo a escala efectuado. Las curvas superior e inferior se relacionan con los coeficientes de convección utilizados (4.8|8.3 W/m<sup>2</sup> °C.).

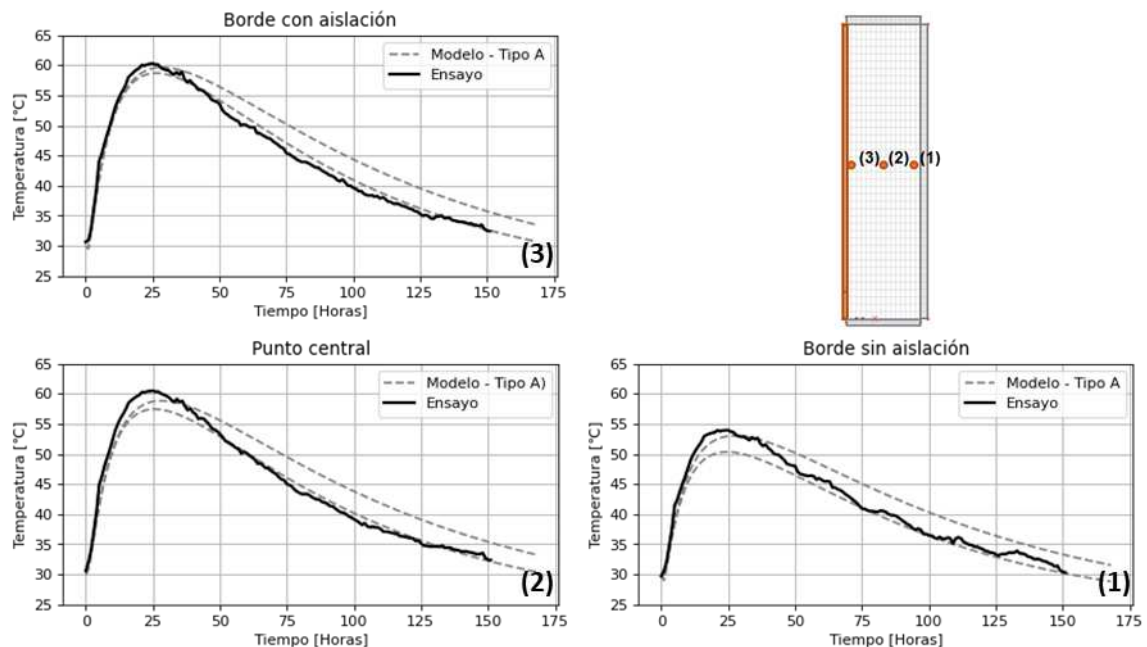


Figura 12: Perfil de temperaturas en bordes y centro del bloque. Cemento tipo A.

## 5 CONCLUSIONES

Se elaboró un modelo tridimensional de elemento finitos de un tramo de canal considerando la secuencia constructiva, la temperatura generada por la hidratación del cemento, el comportamiento reológico, y el ablandamiento del hormigón simple para distintos tipos de cementos (Tipo I, V y A).

El modelo logra captar la fisuración debido al calor generado por la hidratación del cemento, y a la contracción autógena y por secado del hormigón. Se observó que la evolución del calor de hidratación es la variable que más influye en la fisuración.

Tanto el calor de hidratación total, como la velocidad de hidratación, está principalmente controlado por la composición de la pasta de cemento, por lo que la elección del cemento es crítica para el análisis de fisuración.

Con el objetivo de validar el modelo efectuado, se realizó un modelo físico a escala en el que se midió, para el cemento utilizado, la evolución de temperatura a lo largo del tiempo. La predicción del modelo numérico correlaciona con suficiente exactitud la evolución de temperatura del bloque del modelo físico, de manera que se validaron los modelos realizados para el proceso constructivo real del conducto.

## REFERENCIAS

ACI 224R-01 – Control de la Fisuración en Estructuras de Hormigón.

ACI 224.2R-92 – Fisuración de Miembros de Hormigón en Tracción Directa.

Schindler, A. K., and Folliard, K. J., “Heat of Hydration Models for Cementitious Materials,” *ACI Materials Journal*, V. 102, No. 1, pp. 24-33, Jan.-Feb. 2005.

Jefferson, A.D., Craft, A Plastic-Damage-Contact Model For Concrete, I. Model Theory and Thermodynamics, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, No. 22, p. 5973-5999, 2003.

Jefferson AD, Mihai IC and Lyons P (2014). An approach to modelling smoothed crack closure and aggregate interlock in the finite element analysis of concrete structures. *Proceedings of EUROCC, St Anton, 2014.*